

### چکیده

طیف وسیعی از ساختمانهایی که ضوابط آیین نامه های جدید را برآورده نمی کنند یا بر اساس آیین نامه های قدیمی طراحی شده اند نیاز به مقاوم سازی دارند ، همچنین زمانی که تغییر کاربردی يك سازه منجر به ایجاد ضعف در برخی اجزای سازنده آن گردد به عنوان مثال افزایش بار ترافیکی يك پل ، لزوم قرار گیری ماشین آلات سنگین در قسمتی از ساختمان موجود با حفظ قابلیت بهره برداری از سازه می توان آن را به یکی از روشهای موجود مقاوم سازی نمود و تنش در آرماتورها و عرض ترکهای موجود را کنترل نمود . یکی از تکنیکهای مقاوم سازی محلی سازه استفاده از FRP Laminates است

مهمترین عوامل مؤثر در مقاوم سازی ( 1 ) دلایل مالی ( 2 ) دلایل اجتماعی می باشد .

عوامل مؤثر در انتخاب روش مقاوم سازی

1 ) ارزش سازه در مقابل اهمیت سازه Cost versus importance of structures

2 ) نیروی انسانی موجود Available workmanship

3 ) طول مدت اجرا یا زمان عدم استفاده Duration of work /disruption of use

4 ) اجرا بر اساس عملکرد مطلوب مالک Fulfillment of the performance goals of owner

5 ) توجه به تناسب زیبایی شناسی (معماری) و نقش سازه های تکمیل سازه موجود

Functionally & aesthetically compatible & complementary to the existing structures

6 ) تداخل برگشت پذیری Reversibility of intervention

7 ) کنترل کیفی سطح عملکرد Level of quality control

8 ) اهمیت تاریخی و سیاسی سازه Political and historical significance

9 ) سازگاری مقاوم سازی سازه با سیستم سازه ای موجود

Structural compatibility with the existing structural system

10 ) نا منظمی در سختی ، مقاومت و شکل پذیری

Irregularity of stiffness strength and ductility

11 ) کنترل آسیب وارده به اجزای غیر سازه ای

Controlled damage to non- structural components

12 ) ظرفیت مناسب باربری سیستم فونداسیون

Sufficient capacity of foundation system

13 ) مواد ترمیمی و روش موجود و ممکن مقاوم سازی

Repair materials and technology available

بطورکلی بانگاهی به عملکرد ساختمانهای بتنی در زلزله های مخرب ، نقاط ضعف زیر مشخص گردیده است.

- عدم تامین مقاومت برشی لازم در هر طبقه (توسط ستونها و دیوارهای برشی)
- شکست برشی ستونهایی که طولشان به طور ناخواسته توسط دیوارها و سایر عناصر غیر سازه ای کوتاه شده است (شکست ستون کوتاه)

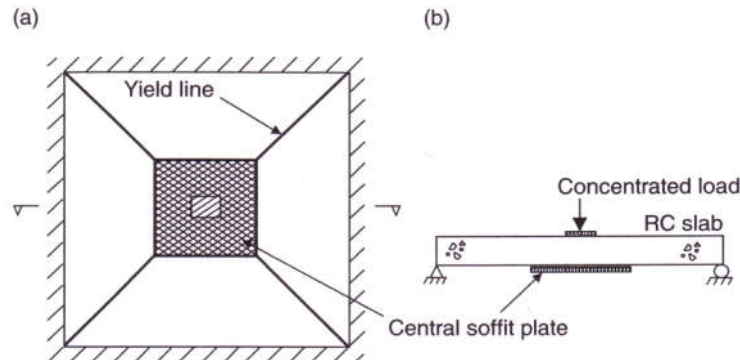
- شکست برشی تیرها و ستونها که موجب تردی رفتار سازه میگردد
- لغزش میلگردها در اتصال تیر به ستون
- شکست برشی اتصال تیر به ستون
- شکست ترد دیوارهای برشی که دارای بازشو هستند و یا دیوارهایی که با اعضای افقی بهم متصلند (دیوار برشی درگیر)
- پیچش ناشی از برون محوری
- تمرکز تخریب در یک طبقه بدلیل توزیع نامنظم سختی در ارتفاع

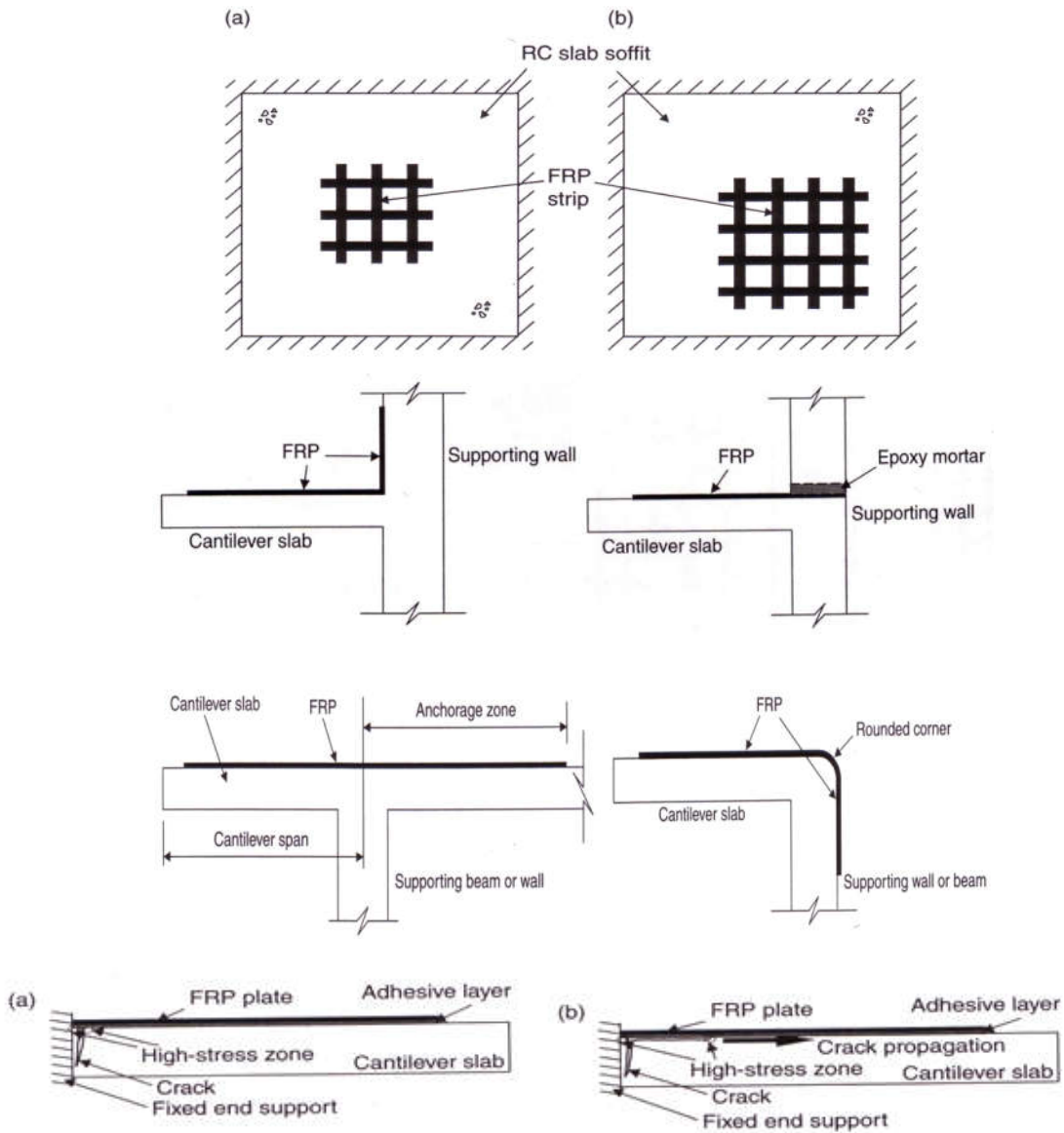
### دلایل تقویت سازه های بتنی

- خطاهای طراحی
- خطاهای اجرایی
- افزایش بار سازه
- تغییر آیین نامه ها
- قلاب مهار انتهایی آرماتورهای عرضی
- جزییات وصله آرماتورهای طولی
- کمبود فولادی محصور کننده

### روشهای بهسازی لرزه ای

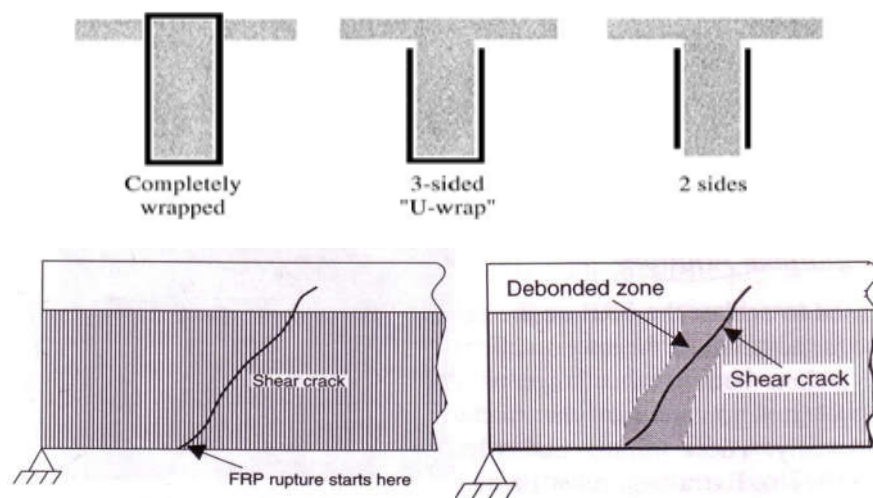
1. اصلاح موضعی اجزای سازه ای که دارای عملکرد نامناسبی در اثر زلزله می باشند
2. رفع یا کاهش نامنظمی در ساختمان موجود
3. تامین سختی جانبی لازم برای کل سازه
4. تامین مقاومت لازم برای کل سازه
5. کاهش جرم ساختمان
6. کامل نمودن مسیر بار
7. افزایش انسجام ساختمان با کلاف بندی
8. تغییر کاربری به منظور کاهش سطح عملکرد مورد انتظار از ساختمان
9. به کارگیری سیستم های جداساز لرزه ای





مقاوم سازی زمانی که کمبود مقاومت، سختی و شکل پذیری در اعضا و اتصالات وجود دارد ضرورت می یابد

- (A) شکست خمشی
- (B) شکست چسبندگی در اثر بروز ترک خوردگی در طول دهانه دال
- (C) جدا شدن انتهای صفحه FRP در تماس چسب و بتن
- (D) شکست مهاربندی الیاف
- (E) شکست مهاربندی انتهایی ثابت شده (برای دالهای طره ای)



**روشهای مختلف تقویت برشی از لحاظ موقعیت قرارگیری بر روی تیر**

	مزایا	معایب
چسباندن پهلو	آسانی نصب صرفه جویی در مقدار FRP	کمترین تاثیر در مقاومت برشی دارد بیشترین قابلیت برای شکست ناشی از جدا شدن دارد
ژاکت U	نسبت به شکست ناشی از جدا شدن حساسیت کمتری دارد در تقویت برشی موثرتر است همچنین بعنوان مهار کننده تقویت خمشی استفاده می‌گردد	ممکن است نیاز به مهار مکانیکی در انتهای آزاد لایه U داشته باشد
دور پیچ	کمترین حساسیت نسبت به شکست ناشی از جدا شدن را داراست	در بعضی موارد دسترسی به بالای تیر به علت دال بالای تیر بسیار مشکل می‌باشد

**مقایسه روشهای استفاده از صفحات ممتد و**

**ناپیوسته**

توزیع الیاف	مزایا	معایب
صفحات پیش ساخته نا پیوسته	صرفه جویی در میزان FRP و چسب یکنواختی در چسب استفاده شده	نصب سخت
صفحات ممتد	کاربرد نصب آسانتر	یکنواختی در چسب حاصل نمی‌گردد افزایش مقدار FRP و چسب

**مقایسه جهت قرارگیری الیاف**

مزایا	معایب
-------	-------

عمودي $\beta = 90$	کاربرد آسان موثر برای تقویت برشی	تأثیر کمتر در کنترل ترک برشی
$\beta = 45$	کاربرد مشکل تر برای کنترل ترک های برشی موثرتر	بصورت ژاکت U غیر قابل اجرا
الیاف دو جهتی $\beta = 0$ $\Phi = 90$ $\beta = 45$ $\Phi = 135$	بیشترین تأثیر برای کنترل ترکهای برشی بیشترین تأثیر برای تقویت برشی	برای دورپیچ کردن احتیاج به الیاف تک جهته با عرض زیاد می باشد میزان الیاف استفاده شده در کامپوزیت زیاد می باشد



(a) FRP plate/sheet rupture in tension

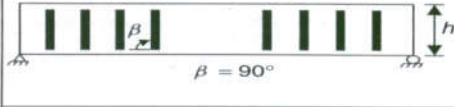



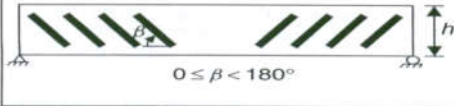



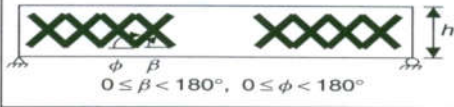



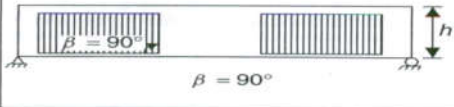







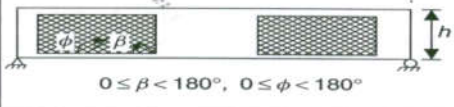





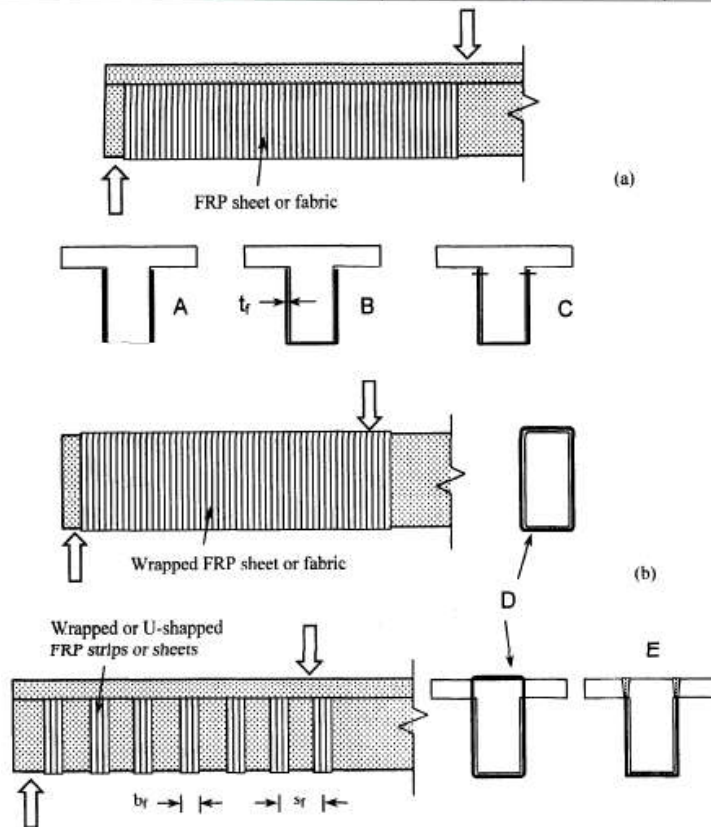
(b) Concrete crushing in compression (tension failure)

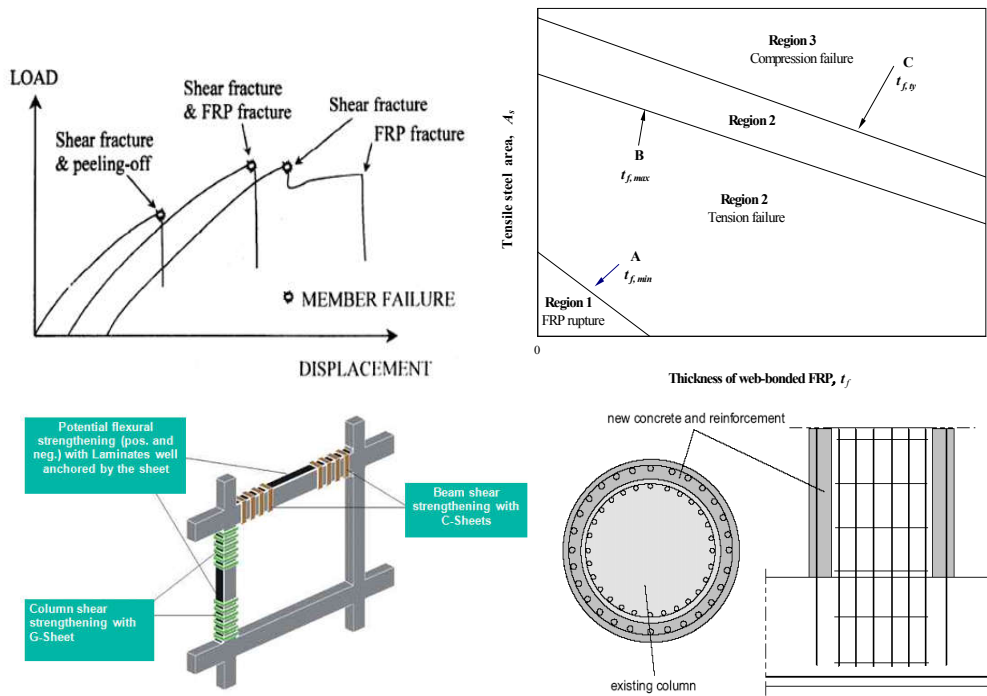


(c) Ripping off of concrete cover, with  
FRP still bonded to the concrete

1. Yielding of reinforcing steel in tension followed by the rupture of FRP (FRP rupture).
2. Yielding of reinforcing steel in tension followed by concrete crushing (tension failure).
3. Crushing of concrete in compression before yielding of the reinforcing steel (compression failure).

Fibre orientations and distributions	Bonding scheme and notation		
 <p><math>\beta = 90^\circ</math></p>	 <p>SS90</p>	 <p>US90</p>	 <p>WS90</p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SS<math>\beta</math></p>	 <p>US<math>\beta</math></p>	 <p>WS<math>\beta</math></p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ, 0 \leq \phi &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SS<math>\beta/\phi</math></p>	 <p>US<math>\beta/\phi</math></p>	 <p>WS<math>\beta/\phi</math></p>
 <p><math>\beta = 90^\circ</math></p>	 <p>SP90</p>	 <p>UP90</p>	 <p>WP90</p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SP<math>\beta</math></p>	 <p>UP<math>\beta</math></p>	 <p>WP<math>\beta</math></p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ, 0 \leq \phi &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SP<math>\beta/\phi</math></p>	 <p>UP<math>\beta/\phi</math></p>	 <p>WP<math>\beta/\phi</math></p>

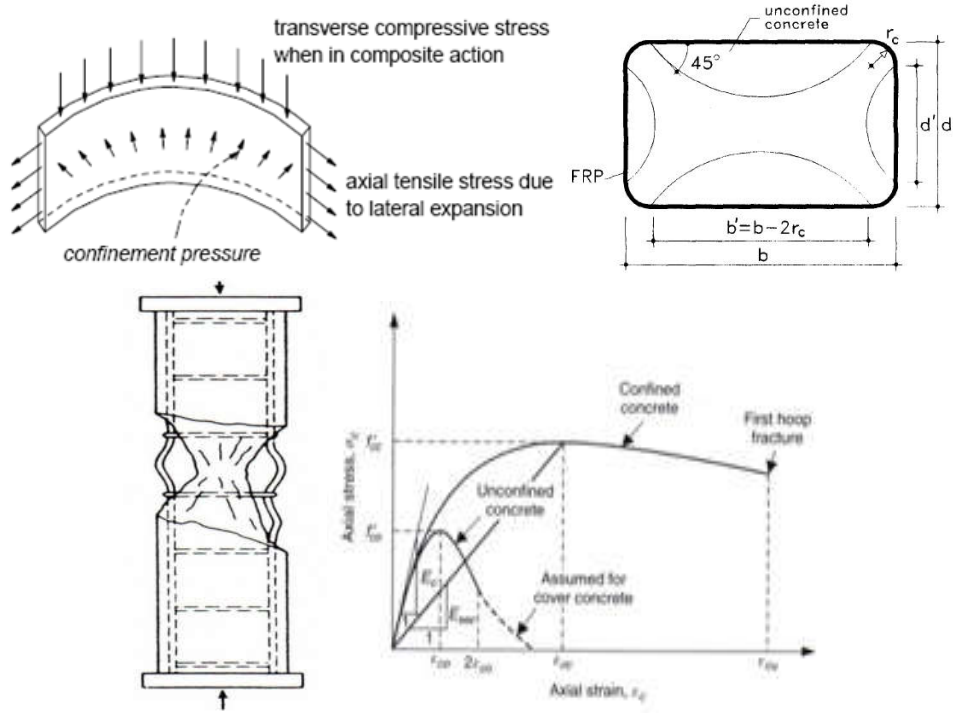


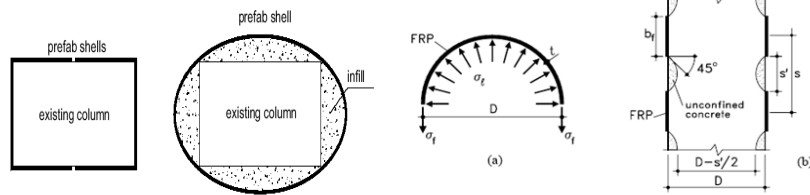


### Jacketing

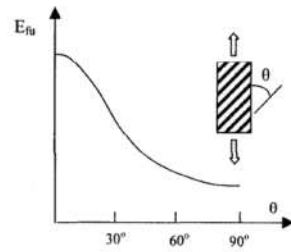
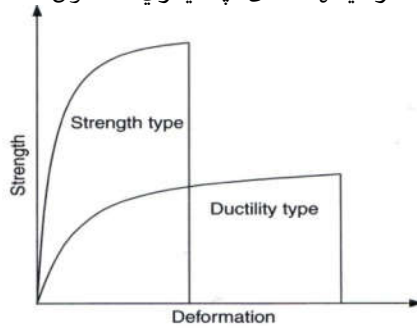
حالات مختلف شکست در یک نشیمن ( برکت یا کربل )

- 1- شکست برشی در بر ستون
- 2- جاری شدن میلگردهای کششی اصلی
- 3- شکست فشاری در ناحیه بین ترک و لبه خارجی
- 4- شکست موضعی در انتهای آزاد.

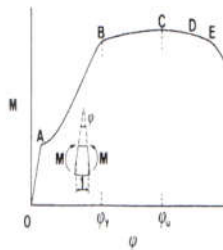




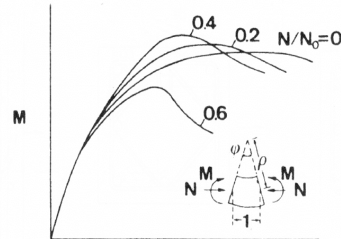
(A) مقاومت سازه‌ای از نظر افزایش شکل پذیری ستون  
 (B) مقاومت سازه‌ای از نظر افزایش مقاومت ستون



رابطه بین مدول الاستیسیته FRP و راستای الیافها



A: تری‌اوبه  
 B: تسلیم‌بلکردگشتی  
 C: بارنهایی  
 D: شکست بتن  
 E: کماتش‌بلکردفتاری



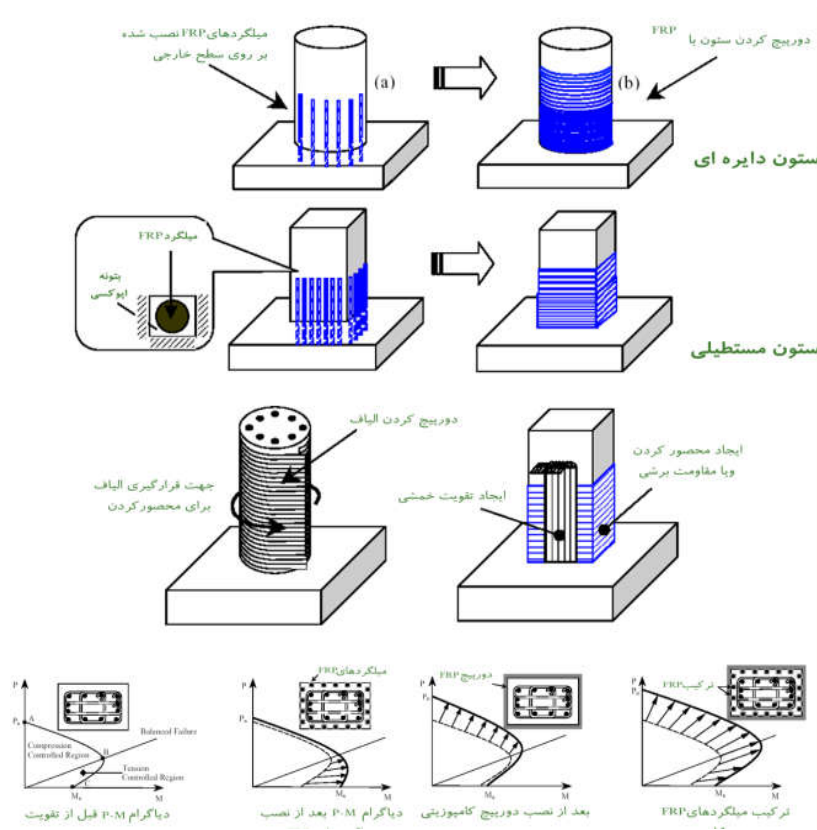
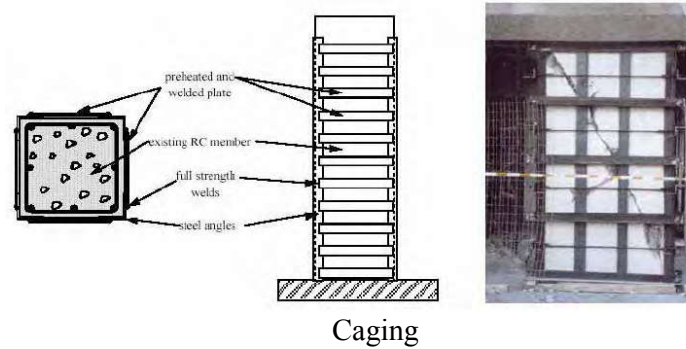
معایب	مزایا	روش
کنترل کیفی ضعیف و نیاز به عوامل انسانی برای اجرا	انعطاف پذیری آن در انطباق با اشکال گوناگون مقطع ستون + سادگی در حمل و نقل اجرا و عدم نیاز به تجهیزات ویژه	دورپیچ
نیاز به تجهیزات و دستگاه ویژه، انعطاف پذیری کم در ابعاد خاص مقطع ستونها	کنترل کیفیت پیشرفته کاهش نیاز به نیروی کار درمحل	پیچیدن مارپیچی
هزینه پیش‌ساخته کردن پوسته‌ها، محدودیت برای استفاده بروی ستونهای با شکلهای مقطع گوناگون	حداقل نیاز به نیروی کار در محل مفید برای اصلاح شکل ستونها	پوسته پیش ساخته

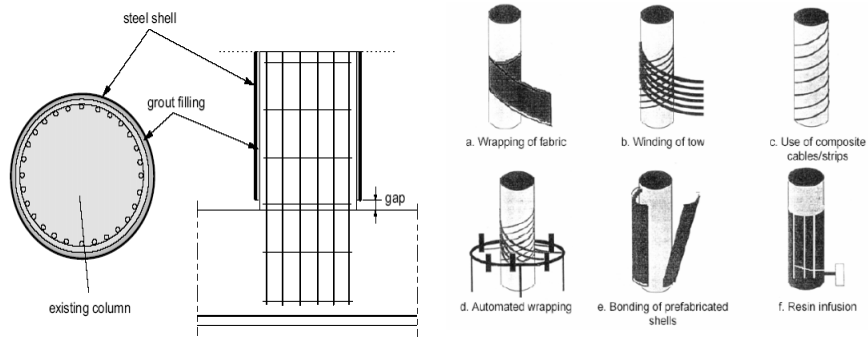


- ظرفیت بار محوري
- ظرفیت خمشی
- ظرفیت برشی
- شکل پذیری

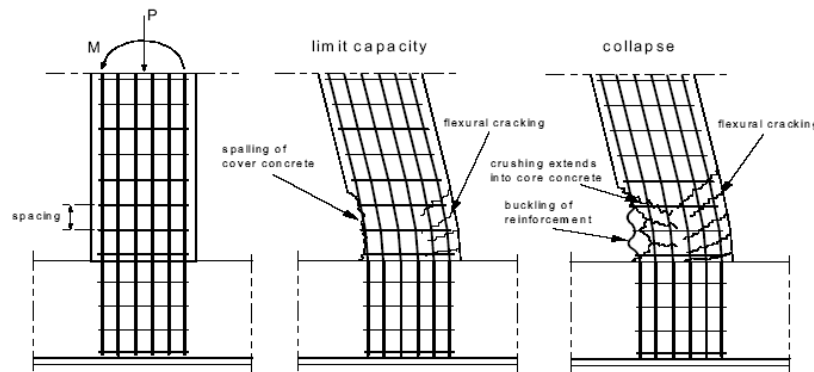
سه حالت شکست متداول ستونهای بتنی به شرح زیر می باشد:

- (A) شکست برشی  
 (B) شکست ناشی از تشکیل قسمتهایی در طول ستون که به حالت پلاستیک در آمده اند.  
 (C) شکست چسبندگی در وصله آرماتورهای طولی





## Encasing



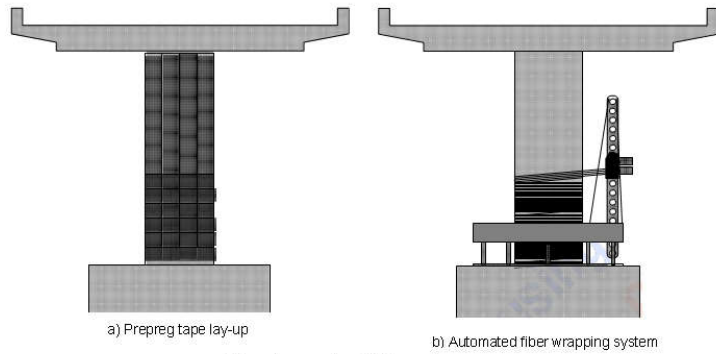
1- سیستمهای *Wet lay-up*: در این سیستم لایه های FRP که شامل یکسری از الیافهای هم جهت و یا چندجهتی خشک است، در محل نصب از رزین آغشته شده و بعد از اتصال به سطح بتن همانجا عمل آوری می گردند که به عبارتی شبیه به ریختن بتن در محل است.

2- سیستمهای پیش آغشته شده<sup>1</sup>: در این سیستم لایه های FRP که از ورقه های الیاف تک جهتی و یا چندجهتی که عمل آوری نشده ولی از قبل در محل تولید توسط رزین آغشته و اشباع شده، تشکیل گردیده و همانند روش قبلی در محل نصب عمل آوری می شوند. این روش معمولاً نیاز به حرارت اضافی جهت عمل آوری دارد.

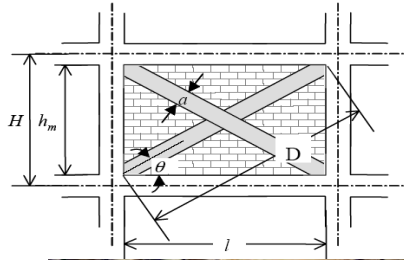
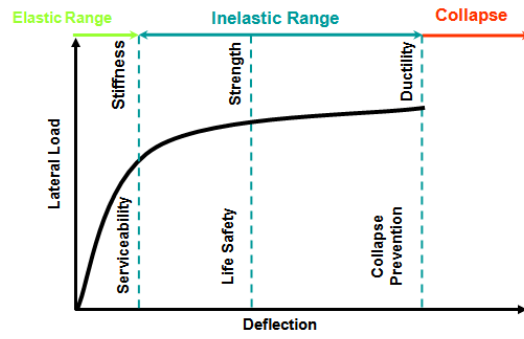
3- سیستمهای پیش ساخته<sup>2</sup>: این نوع سیستمها شامل انواع گوناگونی از شکلهای کامپوزیتی ساخته شده در خارج کارگاه می باشد. معمولاً یک چسب همراه بتونه و آستر خاص جهت چسباندن این ورقه به سطح بتن مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع سیستم شبیه به بتن پیش ساخته، است.

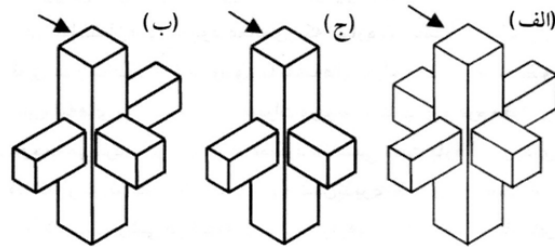
<sup>1</sup> Prepreg

<sup>2</sup> Precured

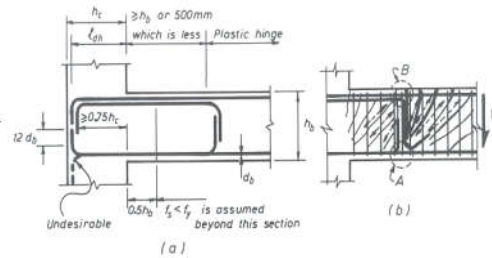
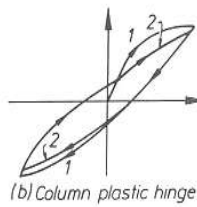
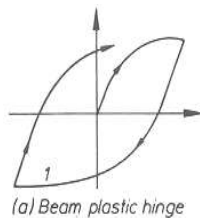
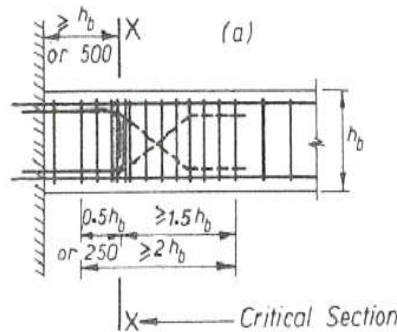
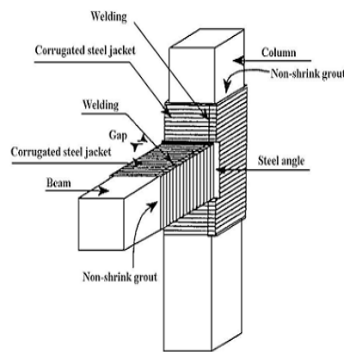
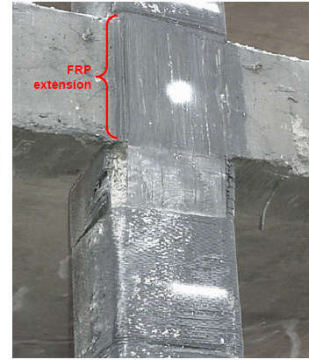


Schematic examples of FRP wrappings.





الف اتصال میانی ب اتصال کناری ج اتصال گوشه



تعداد زیادی از ساختمانهای قاب خمشی بتنی موجود واقع در مناطق لرزه خیز برای زلزله های شدید و متوسط مقاومت ناکارآمد داشته و مقاومت جانبی ناکافی با جزئیات اعضا و اتصالات تقویتی ضعیف مهمترین دلایل عملکرد لرزه ای نامناسب اینگونه سازه هاست در زلزله مکزیک 1985 و نورتریج 1994 رفتار فاجعه بار اکثر سازه های موجود و نیاز به تعمیر و بهسازی لرزه ای اشاره شد و در سبایی از زلزله مکزیک که آگاهی را برای نیاز به تقویت و تعمیر سازه های موجود در سراسر جهان بخاطر ایمنی ناکافی و حفظ سرمایه مالکان ساختمانها بالایی برد، می توان گرفت.

تحلیل ساختمانهای بتنی موجود که ناحیه بحرانی اتصالات تیر به ستون آنها در قابهای بتن آرمه آسیب دیده اند و طراحی برای رفتار غیر الاستیک و زلزله های شدید یا مهلک بوده و نیازمند بروزرسانی و تقویت می باشند و جزئیات نامناسب اتصالات بخصوص در ناحیه بحرانی اتصالات تیر ستون خارجی منجر به گسیختگی زود هنگام بدلیل تمرکز تنش برشی بالا میشود و گسیختگی عدم چسبندگی آرماتورهای طولی بخصوص در اتصالات داخلی زمانی که آرماتور به سور مناسب مهار با قلابهای استاندارد مهار نشده اند مشاهده می شود. گسیختگی های مهار و برشی به طور ویژه در اتصالات خارجی مشهود می باشد و تقویت اتصالات بتنی کار دشواری می باشد و روشهای

مختلفی برای تقویت اتصالات بکاربرده شده اند که یکی از روشهای معمول تقویت اتصال بتنی با ژاکت فولادی با ورقه فولادی مسطح یا موجدارمی باشد. برای غلبه بر مسائل و مشکلات این روش، نیروی انسانی ماهر، جزئیات دقیق و هنرمندانه با ابعادبزرگتر و حفاظت در برابر خوردگی بکاررفته و در تحقیقات اخیر تمرکز پلیمر تقویت شده FRP بوده که با چسب اپوکسی بصورت ورقه های منعطف یا نوار با الیاف جهت دار برای تحمل نیروهای کشش ناشی از برش می باشد. دورپیچ FRP کمک به جلوگیری از نفوذ و گسترش ترک خوردگی در هسته اتصال و محل تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای تیر و مجاور ناحیه اتصال می نماید. افزایش شکل پذیری کلی سازه ها و مقاومت بستگی به سطح خسارت مطلوب یا تقویت اتصال مطابق با استاندارد اجباری و بارهای اعمالی دارد.

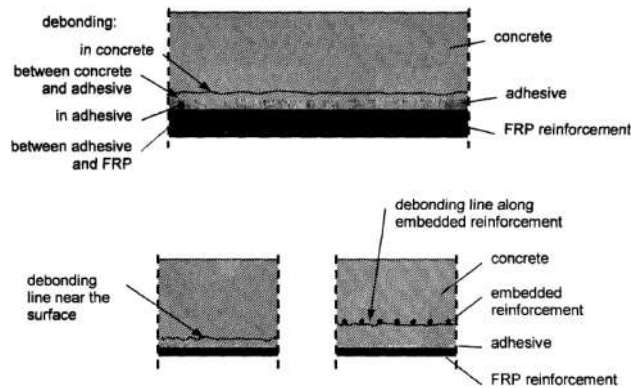
مفهوم ستون قوی-تیرضعیف به عنوان یک راهبرد مناسب برای طراحی قابهای مقاوم لرزه ای در دنیا پذیرفته شده است برای این اساس هسته اتصال و ستون در ناحیه الاستیک تحت بارهای جانبی باقی مانده و استهلاک انرژی کافی و مناسب با تغییر شکل پلاستیک انتهای تیر رخ می دهد بنابراین خسارت در انتهای تیر مجاور اتصال متمرکز می شود و با هزینه مناسب و به آسانی می توان آن را تعمیر نمود.

اکثر تحقیقات اتصالات بتنی تقویت شده با FRP مربوط به تقویت برشی هسته اتصال میباشد و تعداد کمتری مطالعات پیرامون افزایش ظرفیت خمشی تیرهای ناحیه اتصال تیر-ستون صورت گرفته است و ورقه های FRP در وجه کششی مقاطع تیرها بکار رفته اند و درباره سیستمهای چسباندن ورقه FRP در ناحیه اتصال و جابجایی مفصل پلاستیک اتصال به سمت تیر بر اثر تقویت با FRP تحقیقات محدودی انجام شده است.

#### مهار میلگرد کششی تیر در محدوده اتصال

در صورتی که در هر دو وجه مقابل اتصال، تیر وجود داشته باشد، میلگردهای کششی یک تیر از اتصال عبور کرده و وارد تیر دیگر شده و میلگرد کششی آن تیر را به وجود می آورد و هیچ گونه وصله ای نباید در روی اتصال انجام بگیرد.

در صورتی که تیر فقط در یک طرف موجود باشد، میلگرد کششی آن توسط یک قلاب استاندارد در ناحیه اتصال مهار می گردد. با توجه به اینکه FRP در حالت معمولی از یک تیر به تیر دیگر از طریق اتصال عبور نمی نماید عملاً تقویت خمشی تیر در ناحیه اتصال امکان پذیر نمی باشد



## انواع الیاف برای سیستم های FRP

### چکیده:

سازه های بتن مسلح مدت هاست که در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده بوده است و عنصر محوری در مسلح سازی این سازه ها، فولاد می باشد. اگرچه فولاد مزایا و قابلیت های مهندسی بسیار قابل توجهی دارد، اما دارای اشکالاتی از جمله وزن سنگین و مقاومت کم در برابر شرایط نامساعد محیطی، دما، رطوبت و خوردگی می باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی مواد جایگزینی به نام FRP ساخته شده است که ضمن دارا بودن مشخصات مقاومتی بسیار خوب و آسانی کاربرد، در مقابل خوردگی و آسیب های محیطی نیز بسیار مقاوم می باشد.

در حال حاضر، استفاده از FRP در بسیاری از کشورهای جهان مرسوم گشته است و همچنان این فناوری در حال توسعه و پیشرفت می باشد. در کشور ما نیز، استفاده از این مصالح جایگزین خصوصا در سازه های آبی و نیز در ترمیم و بهسازی سازه ها بسیار ضروری به نظر می رسد که در اینجا بررسی و تحقیق مفید و جامعی در باره استفاده از FRP به عنوان جایگزین فولاد در سازه های بتنی صورت گرفته و مزایا و معایب آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** انواع الیاف، برای سیستم های FRP

### 1- مقدمه:

### 2- سازه های بتنی پیش تنیده و پس تنیده

در این قسمت به موارد کاربرد رشته ها و تاندون ها جهت کارهای پیش تنیدگی و پس تنیدگی اشاره می گردد.

### 1-2- مواد کاربرد در آمریکای شمالی

پل کالگری، کانادا:

شکل 6-7 یک پل بزرگراه بتنی با استفاده از کابل های کمپوزیت الیاف کربن (CFCC) و تاندون های Leadline را نشان می دهد. این پل به صورت مورب و یکسره با دو دهانه به طول های  $22/83mm$  و  $19/23mm$  ساخته شده و در آن از 13 شاهتیر با مقطع پیش ساخته بتنی T شکل برای هر دهانه استفاده شده است. شاهتیرها دارای عمق  $1.1m$  و ضخامت جان  $160mm$  می باشند. از 26 شاهتیر، چهار مورد آن با استفاده از کابل های CFCC به قطر  $15.2mm$  پیش تنیده شده بودند. دو شاهتیر اضافی دیگر (هر یک در یک دهانه) توسط رشته های Leadline به قطر  $8mm$  پیش تنیده شده

بودند. بقیه شاهرها با استفاده از رشته‌های فولادی پیش‌تنیده شده بودند. در این پل از طریق سیستم فیبرهای نوری و کرنش‌سنج‌های متصل به CFCC، رفتار رشته‌های Leadline و رشته‌های فولادی پایش (مانیتورینگ) می‌شود.



شکل 7-6- پل کانگری، کانادا

سازه آبی،  
شکل 7-7 سا

مل را نشان می‌دهد. یکی از دهانه‌ها یک عرشه پیش‌تنیده با کابل‌های گرافیت است و دیگری یک عرشه کمپوزیتی فایبرگلاس می‌باشد. دهانه‌ها توسط 12 پایه  $356 \times 356 \text{ mm}$  به طول  $13/7 \text{ m}$  نگه داشته می‌شوند و به 6 کابل و رشته مارپیچی CFRP مسلح می‌باشند. سرپوش پایه‌ها با کابل‌های GFRP پست‌تنیده گردید. برای پیش‌تنیده نمودن  $6 \text{ m}$  از عرشه به عرض  $5/5 \text{ m}$  و به ضخامت  $457 \text{ mm}$ ، 180 کابل GFRP مورد استفاده قرار گرفت.



شکل 7-7- سازه آبی، کالیفرنیا

2-2- موار  
ساختمان کل

دال‌های مسطح این ساختمان با استفاده از میله‌های AFRP به قطر  $15 \text{ mm}$  پست‌تنیده گردید. این دال‌ها بر اساس کنترل ترک و خیز طراحی گردیدند. سیستم پست‌تندگی توسط یک سلول بار (load cell) و یک فشارسنج روغنی پایش می‌شود. مجتمع مسکونی اومورو (Omuro):

این ساختمان شامل تیرهای پیش‌تنیده شده بطور جزئی (partially prestressed) می‌باشد که در آنها از تاندون‌های FIBRA به قطر  $13\text{mm}$  استفاده شده است. کشش در تاندون‌ها توسط سلول‌های بار پایش می‌شود. میل‌های FRP نیز به صورت آرماتورهای غیر پیش‌تنیده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

پل عابر پیاده ناکاتسوگاوا (Nakatsugawa):

در دال ساده پیش‌تنیده این پل، از رشته‌های CFCC استفاده شد. این پل به صورت یک قطعه از پیش ساخته شد و دارای عرض  $2.5\text{m}$  و طول  $8\text{m}$  بود. مهارهای استفاده شده در این سازه از جنس لوله‌های فولادی، با انتهای تاندون‌های CFCC فرو رفته به داخل لوله‌ها و تزریق شده با اپوکسی بودند. نیروهای کششی مجاز در هنگام پیش‌تنیدگی  $0.60P_U$ ، بلافاصله پس از پیش‌تنیدگی  $0.55P_U$  و تحت بارهای سرویس  $0.50P_U$  بودند. این پل به عنوان یک سازه غیر فلزی ساخته شد و آرماتورهای CFRP با آماده‌سازی سطحی (به منظور بهبود پیوستگی بتن با آرماتور) به عنوان خاموت و آرماتورهای حرارتی مورد استفاده قرار گرفتند.

### 3- مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی

مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با اتصال صفحات FRP به سطح بتن با استفاده از چسب‌های پلیمری به طرز موثری برای بهبود عملکرد تحت بار و حالت‌های حدی تبدیل شده است. در گذشته از صفحات فولادی استفاده می‌شد که دارای معایبی بودند از جمله: مشکل جابجایی به علت وزن سنگین و امکان خوردگی در محل اتصال.

### 3-1- موارد کاربرد در آمریکای شمالی

پروژه‌های پوشش دادن ستون‌ها:

سازمان حمل و نقل کالیفرنیا به عنوان بخشی از برنامه بهسازی لرزه‌ای عمومی خود، ژاکت‌های محصور کننده‌ای را به دور ستون پل‌ها از جنس پوشش‌های فایبرگلاس، قرار داد. برای چسباندن این صفحات پوششی به ستون‌ها از اپوکسی استفاده شد. مواد چسبنده انبساطی به زیر این پوشش‌ها به منظور چسباندن مطمئن آنها به بتن تزریق شد. این صفحات به دور 11 ستون به قطر  $1.8\text{m}$  و 4 ستون به قطر  $1.2\text{m}$  پیچیده شد. این ستون‌ها در زلزله 17 ژانویه سال 1994 متحمل هیچ‌گونه آسیبی نشدند. این تکنیک پیچیدن پوشش صفحه‌ای به دور ستون‌ها در پروژه‌های دیگری نیز در کالیفرنیا انجام شده است. برای مثال در شهرهای لوس‌آنجلس و سانتامونیکا، پیچیدن پوششی از مصالح



کمپوزیتی برای 200 ستون در سال 1993 و 1994 اجرا گردید (شکل 7-8).

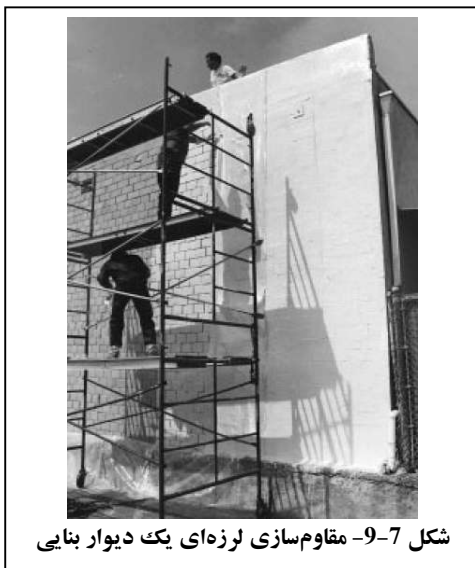


اپوکسی  
با مقاومت  
199 برای  
بتمان یک

شکل 7-8- ستون پل که GFRP به دور آن پیچیده شده است

مقاوم سازی دیو  
پارچه های کمپو  
به سطح دیوار ه  
این اجزاء را  
ترمیم صدمات و  
طبقه، ناشی از ر  
گرفت (شکل 9-7 و 10-7).

این دیوار که از بلوکهای بنایی غیر مسلح به عرض 200mm ساخته شده بود، در کل مقطع به طول 18/3m و ارتفاع 6m به شدت ترک خورده بود. صفحات نازکی از ساختارهای کمپوزیتی برای وجوه خارجی و داخلی این دیوار استفاده شد.

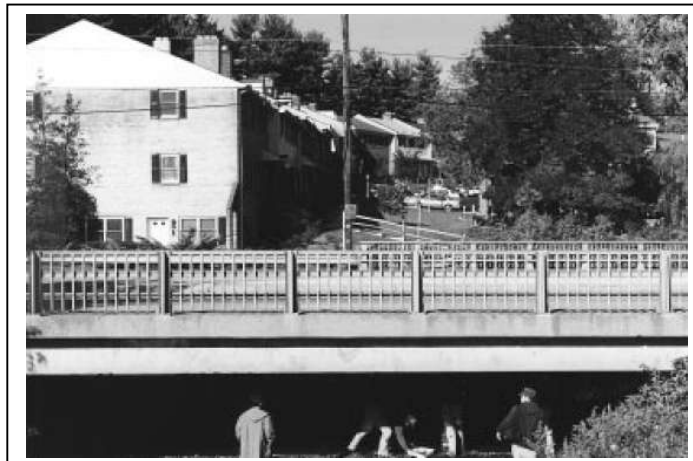


شکل 7-9- مقاوم سازی لرزه ای یک دیوار بنایی



شکل 7-10- بهسازی یک دیوار بتنی صدمه دیده

برای تقویت این تیر پیش‌ساخته ، پیش‌تنیده و یک دهنه که دارای طول  $16/5m$  و مقطع مستطیلی بود (شکل 7-11)، از صفحات الیاف کربنی استفاده شد. وجود ترک‌های ناشی از کمبود آرماتورهای برشی در آن، علت اصلی انجام کار تقویت و بهسازی بود. سازه بزرگ پل از 24 تیر پیش‌تنیده با مقطع مستطیلی که در مجاور یکدیگر قرار گرفته بودند، تشکیل شده بود. برای اهداف مشاهده، 6 مورد از تیرها مقاوم‌سازی شدند. یک لایه از صفحه CFRP یک جهت به همراه الیاف قائم به سمت تیر، برای 4 تیر مورد استفاده قرار گرفت. در دو تیر دیگر از صفحاتی با مدول بالاتر و وزن بالاتر استفاده شد که در یکی از آنها بجای یک لایه، از دو لایه استفاده گردید.



شکل 7-11- پل خیابان فولک

### 3-2- موارد

پل ایبج، س  
صدمه اتفاق

عملیات تعمیر و نگهداری، برمیم این پل در سال 1991 را ضروری نمود. 3 لایه بلند CFRP به طول  $5m$ ، دو تا از آنها به ابعاد  $150mm \times 1.75mm$  و یکی از آنها به ابعاد  $150mm \times 2mm$  برای بهسازی سطح پایینی پل بکار رفت.

### 3-1-1- وزن مخصوص ( specific gravity )

آرماتورها و تاندون های FRP دارای چگالی بین  $g/cm^3$   $1/5$  تا  $2$  می باشند که تقریباً 4 برابر سبک تر از فولاد هستند. وزن کم آنها موجب کاهش هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی و کاهش زمان جابجایی و نصب، در محل در مقایسه با آرماتورهای فولادی می‌گردد.

این مزیتی است که باید در هر تحلیل برای انتخاب محصول بدان توجه شود.

### 3-1-2- انبساط حرارتی

خود بتن مسلح خود یک ماده مرکب است که در آن آرماتورها نقش ابزار تقویتی را داشته و بتن به عنوان خمیر عمل می‌کند. بنابراین ضروری است که رفتار دو

ماده تحت تنش‌های حرارتی مشابه باشد تا تغییر شکل‌های ناهمگون بتن و آرماتورها به تا حداقل برسد. بسته به خواص مخلوط ضریب خطی انبساط حرارتی برای بتن از  $6 \times 10^{-6}$  تا  $11 \times 10^{-6}$  بر  $^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند. در جدول 1-3 ضرایب انبساط حرارتی برای محصولات معمولی FRP فهرست شده است.

	Steel reinforcing bar	Steel tendon	GFRP bar	GFRP tendon	CFRP tendon	AFRP tendon
Tensile strength, MPa (ksi)	483-690 70-100	1379-1862 200-270	517-1207 75-175	1379-1724 200-250	165-2410 240-350	1200-2068 170-300
Yield strength, MPa (ksi)	276-414 40-60	1034-1396 150-203	Not applicable			
Tensile elastic modulus, GPa (ksi)	200 29,000	186-200 27,000-29,000	41-55 6000-8000	48-62 7000-9000	152-165 22,000-24,000	50-74 70,000-11,000
Ultimate elongation, mm/mm	> 0.10	> 0.04	0.035-0.05	0.03-0.045	0.01-0.015	0.02-0.026
Compressive strength, MPa (ksi)	276-414 40-60	N/A	310-482 45-70	N/A	N/A	N/A
Coefficient of thermal expansion ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) ( $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ )	11.7 6.5	11.7 6.5	9.9 5.5	9.9 5.5	0.0 0.0	-1.0 -0.5
Specific gravity	7.9	7.9	1.5-2.0	2.4	1.5-1.6	1.25

جدول 1-3- مقایسه خواص مکانیکی (در راستای طولی)

شده در راستای طولی (یعنی راستای مقاوم آن) اندازه‌گیری شده است. مقادیر ارائه شده، برخی محصولات رایج موجود را پوشش می‌دهند. برخلاف فولاد، مقاومت کششی میله‌های FRP تابعی از قطر میله است. این بدین معنی است که به علت جهش در برش، الیاف واقع در مرکز مقطع میله تنشی به اندازه الیاف واقع در نزدیکی سطح خارجی میله را تحمل نمی‌کنند. این پدیده منجر به کاهش مقاومت و بازده در میله‌های با قطر بیشتر می‌گردد. برای مثال برای GFRP تولید شده در ایالات متحده، مقاومت کششی از حدود 480MPa برای میله با قطر 28/7mm تا 890MPa برای میله با قطر 9/5mm متغیر می‌باشد. برخی تاندون‌های FRP از طریق تابیدن 7 میله GFRP (Glass) S-2 یا CFRP با قطر 3mm تا 4mm ساخته می‌شوند. مقاومت نهایی این تاندون‌ها قابل مقایسه با رشته‌های پیش‌تنیده فولادی می‌باشد. برای تاندون‌های GFRP مقاومت نهایی از 1380 MPa تا 1724MPa متغیر می‌باشد، در حالیکه برای تاندون‌های CFRP این مقدار بین 1862 MPa تا 2070MPa متغیر می‌باشد.

### 3-1-4- ضریب ارتجاعی کششی

چنانکه در جدول 1-3 ذکر شده است ضریب ارتجاعی طولی میله‌های GFRP تقریباً 25 درصد فولاد است. این ضریب برای تاندون‌های CFRP که اغلب دارای الیاف محکم تری هستند از میله‌های GFRP بیشتر می‌باشد.

### 3-1-5 - مقاومت فشاری

میله های FRP در فشار، ضعیف تر از کشش هستند و این به دلیل مشکلات آزمایش دقیق کمپوزیت های یک جهته در فشار می باشد و نیز مربوط به روشهای نگه داشتن و تنظیم قطعه و نیز اثرات پایداری الیاف می باشد. با وجود این، مقاومت فشاری کمپوزیت های FRP برای اغلب کارها، نگرانی اول به شمار نمی رود. مقاومت فشاری به صاف یا دندانه دار (آجدار) بودن میله نیز بستگی دارد. مقاومت فشاری در محدوده 317 MPa تا 470 MPa برای میله های GFRP که دارای مقاومت کششی حدود 552 MPa تا 896 MPa بوده اند، گزارش شده است. مقاومت های فشاری بالاتر برای میله های با مقاومت کششی بالاتر مورد انتظار می باشد.

### **3-1-6- ضریب ارتجاعی فشاری**

برخلاف سختی کششی، سختی فشاری میله های FRP با اندازه، نوع، کنترل کیفیت ساخت و نسبت طول به قطر نمونه ها تغییر می کند. ضریب ارتجاعی فشاری میله های FRP کوچکتر از ضریب ارتجاعی کششی آنها می باشد. براساس آزمایشات نمونه های شامل 55 تا 60 درصد حجمی الیاف پیوسته

E-Glass با خمیر وینیل استر شامل رزین ایزوفتالیک، ضریبی به اندازه 34 GPa تا 48GPa بدست آمده است.

### **3-1-7- مقاومت برشی**

به طور کلی مقاومت برشی کمپوزیت ها بسیار کم است. برای مثال میله های FRP براحتی در راستای عمود بر راستای طولی با اهرای معمولی بریده می شوند. این نقص در اغلب موارد می تواند از طریق جهت گیری میله های FRP به گونه ای که بارهای اعمالی به صورت کششی محوری ظاهر شوند، برطرف گردد. آزمایشات برش با استفاده از یک روش آزمایش Isoipescu با مقیاس کامل صورت گرفته است (Porter et al.1993). این روش آزمایش برش با موفقیت برای بدست آوردن خواص برشی میله های FRP بر روی بیش از 200 نمونه انجام شده است.

### **3-1-8- خزش و شکست خزشی**

الیافی مانند کربن و شیشه مقاومت بسیار خوبی نسبت به خزش دارند در حالیکه این مطلب برای رزین ها صدق نمی کند. بنابراین جهت گیری و حجم الیاف تاثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد خزشی میله ها و تاندون های مسلح سازی خواهند داشت. گزارشات یک مطالعه بر روی میله های GFRP با کیفیت بالا نشان می دهد که کرنش اضافی ایجاد شده توسط خزش، در حدود 3 درصد کرنش الاستیک

اولیه می باشد. در بارگذاری تحت شرایط نامطلوب محیطی، میله ها و تاندون های FRP که در معرض بار ثابت قرار دارند، ممکن است پس از مدت زمانی که «زمان تحمل» نامیده می شود ناگهان گسیخته شوند. این پدیده که شکست خزشی نام دارد، برای کلیه مصالح ساختمانی از جمله فولاد نیز صادق می باشد. اما برای میله های پیش تنیده فولادی این پدیده چندان مهم نمی باشد. فولاد می تواند بارهای کششی معمول را که در حدود 75 درصد مقاومت نهایی هستند تحمل نماید که البته نمی توان از عدم گسیختگی و کاهش مقاومت آن مطمئن بود. هنگامیکه نسبت تنش کششی تحملی به مقاومت کوتاه مدت FRP افزایش یابد زمان تحمل کاهش می یابد. آزمایشاتی در ارتباط با خزش در آلمان بر روی کمپوزیت های GFRP با سطح مقطع های مختلف انجام گرفت. این مطالعات نشان می دهد که اگر تنش تحملی، محدود به 60 درصد مقاومت کوتاه مدت باشد، شکست خزشی روی نمی دهد.

محدودیت فوق برای تنش ممکن است برای اکثر سازه های بتن مسلح اهمیت کمی داشته باشد چرا که تنش تحملی در آرماتورها، اغلب زیر 60 درصد می باشد. با این وجود در کاربردهای کمپوزیت های FRP به عنوان تاندون های پیش تنیده، این امر مستلزم توجه ویژه ای است. باید توجه داشت که فاکتورهای دیگری مانند رطوبت نیز تاثیر نامطلوبی بر رفتار خزشی داشته و ممکن است منجر به زمان تحمل کمتر شوند.

بار تحملی کوتاه مدت (48 ساعت) و بلند مدت (1سال) متناظر با 50 درصد مقاومت نهایی به تاندون های GFRP و CFRP در دمایی اتاق اعمال گردید. نمونه ها، خزش بسیار کمی از خود نشان دادند و مدول کششی و مقاومت نهایی پس از آزمایش تغییر قابل ملاحظه نکردند (Anigol 1991 و Khubchandani).

### 3-1-9- خستگی

میله های FRP مقاومت خستگی خوبی را نشان می دهند. اغلب تحقیقات در این زمینه بر روی الیاف با مدول بالا بوده است، (مثلاً آرامید و کربن) که در معرفی سیکل های بزرگ بارگذاری کششی-کششی در کاربردهای هوافضا، قرار گرفتند. در آزمایشاتی که بارگذاری در 10 میلیون سیکل، تکرار گردید، این نتیجه بدست آمد که کمپوزیت های کربن - اپوکسی دارای مقاومت خستگی بهتری نسبت به فولاد هستند. در حالیکه مقاومت خستگی کمپوزیت های الیاف شیشه در نسبت های تنش پایین، کمتر از فولاد می باشد (Schwarz 1992). در تحقیق دیگری (Porter et al. 1993)

نشان داده شد که میله های GFRP دارای مقاومت خستگی خوبی در برش در 10 میلیون سیکل تکرار می باشند. همچنین در یک بررسی دیگر، میله های GFRP که برای کارهای پیش تنیدگی ساخته شده بودند در معرض بارهای تکرار شونده دوره ای با تنش حداکثر 496MPa و محدوده تنش 345MPa قرار گرفتند. این میله ها توانستند 4 میلیون سیکل بارگذاری را پیش از گسیختگی در ناحیه نگی داشته شده تحمل کنند. تاندون های CFRP مقاومت خستگی خوبی را از خود نشان دادند، و در مورد آزمایش خستگی کششی برای 2 میلیون سیکل تکرار نیز نتایج همین گونه بود. تنش متوسط در حدود 60 درصد مقاومت نهایی، با مقدار حداقل و حداکثر سطوح تنش برابر 55 و 64 درصد مقاومت نهایی بود. ضریب ارتجاعی تاندون ها پس از آزمایش خستگی تغییر نکرده بود.

### **3-2- فاکتورهای موثر بر خواص مکانیکی**

خواص مکانیکی کمپوزیت ها به عوامل بسیاری چون تاریخچه و مدت زمان بارگذاری، دما و رطوبت بستگی دارد. این عوامل به یکدیگر وابسته بوده و بنابراین تعیین تاثیر هر یک با ثابت نگه داشتن بقیه عوامل دشوار می باشد.

#### **3-2-1- رطوبت**

جذب بیش از حد آب در کمپوزیت ها می تواند موجب افت قابل ملاحظه مقاومت و سختی شود. جذب آب تغییراتی در خواص رزین ها ایجاد کرده و می تواند موجب تورم و تاب برداشتن کمپوزیت ها شود. بنابراین ضروری است که خواص مکانیکی مورد نیاز کمپوزیت ها تحت شرایط محیطی یکسان تعیین گردد. با این حال رزین هایی هستند که ترکیبات آنها طوری است که ضد رطوبت بوده و ممکن است در سازه ای که انتظار می رود در تمام زمان ها مرطوب باشد، استفاده شوند. در مناطق سردسیر، اثر سیکل های یخ زدن و ذوب شدن نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

#### **3-2-2- آتش و دما**

بسیاری از کمپوزیت ها دارای خواص خوب و گاهی عالی در دماهای بالا هستند. اغلب کمپوزیت ها براحتی آتش نمی گیرند. اثر دمای بالا بر روی رزین ها بیشتر از الیاف است. رزین ها دارای مقادیر زیادی کربن و هیدروژن هستند که قابل اشتعال اند و تحقیقات بر روی توسعه رزین های مقاوم به آتش در حال انجام می باشد. آزمایشاتی که در آلمان صورت گرفته نشان داده است که میله های FRP از نوع E-Glass می توانند 85 درصد مقاومت خود در دمای اتاق را پس از نیم ساعت قرارگرفتن در

معرض دمایی 300 درجه سانتی گراد و تحت تنش 50 درصد حداکثر مقاومت کششی خود، تحمل نمایند. در عین حال که این رفتار، از عملکرد فولاد از پیش تنیده بهتر می باشد اما در دماهای بالاتر، کاهش مقاومت افزایش یافته و مقاومتی در حد فولاد حاصل می شود.

مسئله آتش برای اعضای بتنی مسلح با کمپوزیت های FRP با مسئله قرارگیری مستقیم مصالح در معرض آتش متفاوت می باشد. در این حالت بتن به عنوان حائلی برای حفاظت FRP از تماس مستقیم با شعله ها عمل می کند. اما چنانکه دما در داخل عضو افزایش یابد، خواص مکانیکی FRP ممکن است به میزان قابل ملاحظه ای تغییر نماید. بنابراین توصیه می شود که استفاده کنندگان، اطلاعاتی راجع به عملکرد نوع خاص FRP و رزین آن در دماهای بالاتر، درجایی که احتمال آتش سوزی بالاست، در اختیار داشته باشد.

### **3-2-3- اشعه ماوراء بنفش**

کمپوزیت ها ممکن است از اشعه های ماوراء بنفش موجود در نور خورشید صدمه ببینند. این اشعه ها موجب واکنش های شیمیایی در یک خمیر پلیمری می شوند که می تواند منجر به تنزل خواص ماده گردد. اگرچه این مشکل می تواند از طریق اضافه کردن مواد افزودنی مناسب به رزین حل شود، اما این نوع آسیب، هنگامیکه اعضای FRP در مسلح سازی داخلی سازه های بتنی بکار می روند و در معرض اشعه مستقیم خورشید نیستند، چندان مهم نمی باشد.

### **3-2-4- خوردگی**

آرماتورهای فولادی دچار خوردگی می شوند و افزایش حجم مواد آنها موجب ترک خوردگی و پوسته شدن بتن می شود که این امر موجب تسریع خرابی آن می گردد. یکی از مزایای مهم کمپوزیت ها این است که دچار خوردگی نمی شوند. اما باید توجه داشت که کمپوزیت ها در اثر قرارگیری در معرض محیط های خورنده ممکن است صدمه ببینند. در عین حال که میله های GFRP مقاومت بالایی در برابر اسیدها دارند، اما ممکن است در یک محیط قلیایی دچار آسیب شوند. در مطالعه ای که اخیراً بر روی کاربردهای بتن پیش تنیده صورت گرفته است، یک نوع خاص از رشته های FRP شیشه و اپوکسی موجود در داخل بتن، در معرض یک شبیه سازی آب شور جزر و مدی قرار گرفتند که منجر به جذب آب و کاهش مقاومت گردید. اگر چه این نتایج را نمی توان عمومیت داد، اما اهمیت انتخاب سیستم صحیح رزین - الیاف برای یک کاربرد خاص

از روی این نتایج مشخص می‌شود. تاندون های FRP که از الیاف کربن ساخته شده اند به اغلب مواد شیمیایی مقاوم هستند.

### **3-2-5- سالخوردگی زودرس**

نیاز به حصول داده های هوازدگی بلند مدت در یک مدت محدود موجب پیدایش روشهای تحلیلی چون سالخوردگی زودرس به منظور پیش بینی دوام سازه های کمپوزیتی در معرض محیطهای خشن با گذشت زمان، گردیده است. تحقیق انجام شده در Pilkington Bros (Porte et al.1982) نشان می‌دهد که پیش بینی های سالخوردگی بلند مدت که در مدت زمانی کوتاه و در دماهای بالاتر صورت گرفته است، همبستگی خوبی را با سالخوردگی ناشی از هوازدگی در طبیعت نشان می‌دهد. براساس این یافته ها، محققین دو رابطه برای سالخوردگی زودرس کمپوزیت های FRP ارائه نموده اند. رابطه اول یک فاکتور تسریع براساس میانگین سالانه دمای یک اقلیم خاص را بدست می‌دهد. رابطه دوم رابطه ای بین دمای حمام آب و تعداد روزهای اضافه شده برای سالخوردگی زودرس به ازای یک روز در حمام آب را نشان می‌دهد (Porter et al. 1992, Lorenz 1993). با استفاده از این دو رابطه، میخپرچ‌های (dowel) مرکب از الیاف E-Glass قرارگرفته در رزین وینیل استر، در دمای بالای 60 C برای مدت 4 هفته، دچار سالخوردگی شدند. نمونه ها در حمام محلول آب‌آهک و نمک به منظور ایجاد سالخوردگی آزمایش شدند. یک دوره سالخوردگی زودرس به مدت 633 روز در دمای بالای 60 درجه سانتی‌گراد در این محلول ها، بدون خرابی قابل ملاحظه برای یک حمام آهک بکارگرفته شد. این سالخوردگی زودرس معادل تقریباً 50 سال بود.

### **4- پیش تنیدگی:**

#### **4-1- مقاومت تیرهای بتنی پیش تنیده FRP**

مشخصات تاندون های FRP از روی رفتار تنش - کرنش خطی - الاستیک آنها در نزدیکی گسیختگی مشخص می‌شود. بنابراین شکست یک تیر بتنی پیش تنیده شده با FRP، هم به دلیل گسیختگی کششی تاندون های FRP و هم به دلیل خرد شدن بتن صورت می‌گیرد. گسیختگی کششی ناشی از گسیختگی تاندون های FRP در ابتدا از دورترین تاندون نسبت به تار خنثی آغاز می‌شود. این نوع گسیختگی برای یک تیر بتنی پیش تنیده شده با FRP در مقایسه با تیر مشابه مسلح به فولاد پیش تنیدگی، ترد و شکننده می‌باشد. نوع دوم گسیختگی یعنی خرد شدن بتن هنگامی روی می‌دهد که کرنش بتن پیش از وقوع کرنش کششی نهایی در



تاندون FRP به حد نهايي خود برسد. اين حالت گسيختگي مشابه رفتار تيرهاي بتني مسلح در قسمت فوقاني با فولاد پيش تنيدگي مي باشد. اعضاي بتني عموماً در قسمت تحتاني با فولاد مسلح مي شوند تا تسليم فولاد قبل از خرد شدن بتن اتفاق افتاده و حالت گسيختگي نرم اتفاق بيفتد.

#### 4-1-1- مقاومت خمشي

Tanigaki و همکاران (1989)، آزمایشات بلند مدت خمشی را به منظور مطالعه رفتار مقاومت نسبت به بار تیرهای بتنی بطور جزئی پيش تنیده شده با AFRP انجام دادند. چهار تیر بتنی پيش تنیده با عمق  $300\text{mm}$  مورد آزمایش قرار گرفتند. میله های به هم تابیده AFRP با سطوح زبر ماسه سیلیسی و سطوح صاف برای پيش تنيدگي سه تیر مورد استفاده قرار گرفتند و تیر چهارم پس تنیده شد. میله های AFRP نیز به منظور آرماتورهای اصلی در همه تیرها استفاده شد. نیروی پيش تنيدگي اولیه در دو تیر تغییر داده شد. بارهای متمرکز معادل  $P_{CT}$  (بار ترک اولیه) و  $1.5P_{CT}$  برای مدت 1000 ساعت اعمال گردید و ترک خوردگی و خیز تیرها ثبت گردید. پس از 1000 ساعت، نسبت انحنا و خیز به مقادیر برآورد شده الاستیک، 5 تا 8 برابر برای تیرهای در معرض بار  $P_{CT}$  و حدود 10 برابر برای تیر در معرض  $1.5P_{CT}$  افزایش یافت. تشکیل تدریجی ترکهای جدید در 100 ساعت اول مشاهده گردید. در مدت باقیمانده آزمایش، ترکهای بسیار کمی شکل گرفت و تغییرات خیز با زمان متوسط بود. در همه نمونه ها، کرنش بتن از کرنش آرماتور سریعتر افزایش می یافت که نشانه حرکت به سمت پایین تار خنثی بود.

نرمی سازه ها تضمین می کند که آنها بطور ناگهانی و بدون علائم هشدار دهنده گسيخته نشوند و تحمل تغییر شکل های زیاد را در نزدیکی حداکثر باربری خود دارا باشند. نرمی یک عضو بتنی مسلح به صورت نسبت تغییر شکل نهایی به تغییر شکل در هنگام تسليم فولاد بیان می شود. نرمی ممکن است به صورت انحناء مقطع  $(\frac{F_u}{F_y})$  یا به

صورت خیز  $(\frac{D_u}{D_y})$  یک عضو بیان شود.

در تاندون های FRP حالت تسليم وجود ندارد بلکه به طور ناگهانی به شکل ترد گسيخته می شوند. بنابراین نرمی اعضاي پيش تنیده با تاندون های FRP نمی تواند همانند اعضاي پيش تنیده فولادی تعریف شود. مقایسه

تیرهای بتنی مسلح به FRP و فولاد در یک نیروی پیش‌تنیدگی یکسان، نشان داده است که اگر گسیختگی در اثر خرد شدن بتن باشد، گشتاور نهایی و خیز نهایی یکسان خواهد بود. بعلاوه پس از بار برداری تیر دارای FRP که کمی گسیخته شده، تیر کاملاً به شکل اول برمی‌گردد، در حالیکه مجموعه‌ای از تغییر شکل‌های ثابت برای تیرهای پیش‌تنیده شده با فولاد اتفاق می‌افتد. اگر گسیختگی به خاطر گسیختگی تاندون FRP روی دهد، یک تیر مشابه پیش‌تنیده با فولاد در همان طراحی اعضای بتنی پیش‌تنیده با تاندون‌های FRP در زیر بارهای زنده عادی ممکن است منجر به ایجاد مقاطعی با درصد کم آرماتور مسلح‌سازی گردد. در نتیجه شکست این تیرها تابع گسیختگی تاندون‌ها می‌باشد که موجب تغییر شکل‌های کوچکتر در مقایسه با تیرهای مشابه پیش‌تنیده شده توسط فولاد می‌گردد.

Seu و همکاران (1991)، شش تیر بتنی پیش‌تنیده با دهانه  $2/4 m$  با تکیه‌گاه ساده و بارگذاری شده در دو نقطه را مورد آزمایش قرار دادند. سه تیر با تاندون‌های GFRP و سه تیر با تاندون‌های فولادی مسلح شده بودند. در این آزمایش سه سطح مقطع مختلف مورد استفاده قرار گرفتند که عبارت بودند از:  $6 \times 9$  اینچ،  $6 \times 10$  اینچ و  $6 \times 12$  اینچ. پاسخ پیش از ترک خوردگی برای تیرهای مسلح به فولاد و تاندون‌های GFRP که دارای پیش‌تنیدگی موثر یکسان بودند، کاملاً برابر بود. اما، پاسخ پس از ترک خوردگی نمونه‌های مسلح به GFRP، انعطاف پذیرتر از پاسخ تیرهای مسلح فولادی بود. در هنگام گسیختگی، ترک‌ها در تیر مسلح به GFRP در ناحیه با ممان ثابت در مقایسه با تیرهای مسلح به فولاد پیش‌تنیده عریض‌تر بودند. گسیختگی کششی همراه با لغزش تاندون‌ها در تیرهای GFRP روی داد.

#### 4-1-2- کاهش پیش‌تنیدگی و مقاومت در برابر خستگی

هنگامیکه یک عضو بتنی پیش‌تنیده ترک خورده در معرض بارهای تکراری قرار می‌گیرد، گسیختگی ناشی از خستگی تاندون ممکن است روی دهد. مقاومت در برابر خستگی با محاسبه محدوده تنش  $f_m$  ایجاد شده در تاندون پیش‌تنیده تحت بارگذاری مکرر و مقایسه این محدوده تنش با مقدار بدست آمده از منحنی S-N برای یک سیستم پیش‌تنیده خاص، مورد بررسی قرار می‌گیرد. توصیه‌های FI (1992) مشخصات مقاومت خستگی فولاد پیش‌تنیده را به این صورت تعریف می‌کند: محدوده تنش تحمل شده به تعداد 2

میلیون دفعه با حداکثر تنش نزدیک  $0.85f_{py}$  و احتمال گسیختگی 10 درصد. عمر تاندون ها در معرض خستگی در تیرهای پیش تنیده کمتر از تاندون های آزمایش شده در هوا می باشد. برای تیرهای پس تنیده بارگذاری شده، انحناء تاندون باعث می شود که تاندون بر روی دندانها های ترک های زود ایجاد شده، ساییده شود. همچنین توجه ویژه ای باید به مقاومت خستگی مهارها مبذول گردد. این وسایل اغلب می توانند مقاومت کامل تاندون را تحت شرایط یکنواخت بارگذاری بکار گیرند اما هنگام اعمال بارهای تکراری این مقدار کمتر می گردد

Budelmann, Rostasy (1991)، میله های GFRP را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها گزارش کردند که مقاومت خستگی تاندون های FRP متاثر از ویژگی مهارها (قیدها) می باشد. اما مقاومت خستگی GFRP به طور قابل توجهی کمتر از سیم پیش تنیدگی با مهار گوه ای می باشد.

Mikami و همکاران (1990) سه تیر پیش تنیده شده با استفاده از تاندون های به هم تابیده AFRP را تحت بار تکراری، مورد آزمایش قرار دادند. تیرها دارای مقطع  $200mm \times 250mm$  بودند و هر یک شامل تاندون پیش تنیده با تنش حدود 45 درصد مقاومت کششی خود بودند. دهانه هر تیر  $1600mm$  بود و در هر طرف از تکیه گاهها یک برجستگی  $400mm$  بود. دو تیر در تعداد سیکل های 1 میلیون بار به بارگذاری اولیه دارای نسبت حدود  $1/3$  بودند. تیر سوم تا حدود  $0/88$  ظرفیت یکنواخت نهایی بارگذاری شد و در تعداد سیکل های 229000 گسیخته شد.

Kumagai و Noritake (1991)، دو تیر بتنی پیش تنیده با تاندون های AFRP با دهانه  $10m$  را آزمایش کردند. یک کابل سهمی شکل با 19 میله مسلح سازی هر یک به قطر  $6mm$  برای پس تنیده کردن تیرها استفاده شدند. تیر اول تحت یک بار یکنواخت آزمایش شد. تیر دوم مکرراً بارگذاری شد تا به  $0/45M_u$  (گشتاور خمشی در اولین ترک)،  $0/55 M_u$  و  $0/5 M_u$  برسد که  $M_u$  نشان دهنده گشتاور نهایی یک تیر مشابه آزمایش شده تحت بار یکنواخت می باشد. تیر آزمایش شده 2 میلیون سیکل را بدون گسیختگی تحمل نمود. سپس نمونه تا حد گسیختگی بارگذاری شده و تنها 10 درصد کاهش را در ظرفیت باربری نهایی از خود نشان داد. در این آزمایش مهار کابل AFRP به خاطر خستگی اعمال شده صدمه ندید.

Mekay و Erki (1992)، مقاومت خستگی تیرهای بتنی پیش تنیده با استفاده از میله های AFRP را مورد آزمایش

قرار دادند. سه تیر بتنی با ابعاد  $150\text{mm} \times 300\text{mm}$  و دهانه  $1/05\text{ m}$  آزمایش شدند. میله های AFRP در ابتدا تا 80 درصد مقاومت کششی خود کشیده شدند. تیر اول در دو مرحله بارگذاری شد. در مرحله اول تیر به طوری بارگذاری شد که دچار ترک شد و بارگذاری تا نزدیک مقاومت نهایی ادامه یافت و سپس باربرداری شد. در مرحله دوم، تیر تا مرحله گسیختگی بارگذاری گردید. دو تیر دیگر در معرض دو سیکل بار استاتیکی بیش از حد ترک خوردگی قرار گرفتند. سپس تیرها در معرض بارگذاری سینوسی با فرکانس  $4\text{HZ}$  قرار گرفتند. حداکثر و حداقل بارها طوری تنظیم شدند که شرایط پیش تنیدگی جزئی را از طریق داشتن بار کمتر درست در زیر بار ترک و بار بالاتر برای ایجاد تغییر تنش در میله AFRP به میزان  $200\text{MPa}$  با حداکثر تنش در حدود 80 درصد مقاومت تعیین شده، را شبیه سازی نمایند. تیرها به ترتیب پس از  $1/96$  و  $2/1$  میلیون سیکل بعلت گسیختگی آرماتورها شکسته شدند. افزایش خیز دو تیر به ترتیب 10 و 20 درصد خیز اولیه بود. نتایج زیر از مطالعه حاصله بدست آمد.

1- مقاومت خستگی آرماتورهای AFRP در زیر بار حداقل به اندازه رشته های فولادی، تحت شرایط تنش استفاده شده در تحقیقات می باشد.

2- Relaxation در آرماتورهای AFRP بیشتر از رشته های فولادی عادی می باشد. یک تخمین منطقی از اثرات نامطلوب Relaxation برای AFRP در تنش اولیه در محدوده  $1200\text{MPa}$  می تواند از طریق فرمول زیر بدست می آید :

$$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1.009 - \frac{\log(t)}{65.1}$$

که  $f_{pi}$  تنش گیرداری و  $t$  زمان بر حسب دقیقه می باشد.

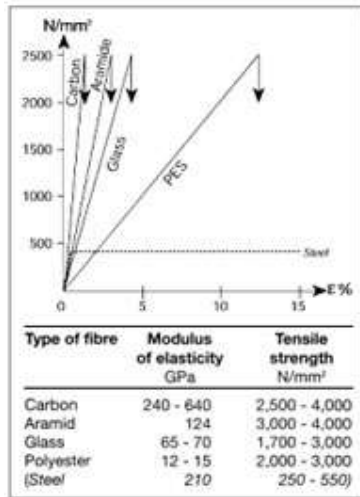
#### 4-2- مقاومت تیرهای بتنی پس تنیده

Mutsuyoshi و همکاران (1990)، 10 تیر بتنی پس تنیده با مقطع مستطیلی آزمایش کردند که در 7 عدد از آنها کابل های الیاف کربن و در بقیه فولاد پیش تنیده بکار رفته بود. نیروی پیش تنیده طراحی بین 40 درصد تا 60 درصد مقاومت کششی کابل ها متغیر بود. آماده سازی سطحی متفاوتی برای کابل های CFRP در نظر گرفته شده بود تا ویژگیهای پیوندی کابل ها و بتن، از کابل های غیر پیوندی تا پیوندی مشخص گردد. ابعاد تیر،  $150\text{mm} \times 200\text{mm}$  بوده و دهانه آن  $1500\text{mm}$  بود. در هر تیر فقط یک کابل حالت گسیختگی را نشان داد، که عبارت بود از گسیختگی کابل های CFRP و خرد شدن بتن. همچنین آزمایش نشان

داد که کاهش پیوند میان کابل های CFRP و بتن منجر به ظرفیت نهایی کمتری برای تیرها می گردد.

Yonekura و همکاران (1991)، مقاومت های خمشی و حالات گسیختگی متناظر آنها را در تیرهای بتنی پیش تنیده با CFRP و AFRP مورد آزمایش قرار دادند. مساحت تاندون های پیش تنیدگی، نیروی پیش تنیدگی اولیه و نوع و مساحت مواد مسلح سازی متغیر بودند. 11 تیر مسلح با CFRP و یک تیر مسلح با AFRP مورد آزمایش قرار گرفتند. رفتار تیرهای آزمایش شده، با تیرهای مسلح با آرماتورهای فولادی مقایسه شد. کل 16 تیر با مقطع I شکل با ارتفاع 220mm و عرض بال 150mm و دهانه 1400mm، دارای تکیه گاه ساده بوده، در دو نقطه بارگذاری شده، و بطور یکنواخت آزمایش شدند. نیروی پیش تنیدگی در پنج سطح از صفر تا 75 درصد بار گسیختگی به رشته ها اعمال شد. کرنش در نقاط مختلف روی تیرها ثبت شد تا توزیع کرنش روی مقطع بحرانی برای سطوح مختلف بار مشخص گردد. نتایج این مطالعه موارد زیر را نشان داد:

- 1- دو حالت گسیختگی کلاسیک برای تیرهای پیش تنیده با تاندون های FRP بدست آمد: گسیختگی تاندون ها و خردشدگی بتن ( شکست ناشی از گسیختگی تاندون های پیش تنیده از طریق تغییر آرایش آرماتورهای محوری قابل جلوگیری است).
- 2- مقایسه یک تیر با فولاد پیش تنیده با تیر مشابه آن با تاندون های FRP اما با نیروی پیش تنیدگی کمتر، نشان داد که حالت اخیر، خیز بیشتر و بار نهایی کمتری را پس از شکل گیری ترک ها نتیجه می دهد ( با افزایش نیروی پیش تنیدگی و مساحت تاندون های پیش تنیده، تفاوت بار نهایی و خیز نهایی دو تیر کمتر شده و حالت گسیختگی یکسان می گردد).
- 3- افزایش نیروی پیش تنیدگی منجر به خیز کمتر و بار نهایی بیشتر در یک سطح بار یکسان گردید ( شیب منحنی های بار - افت پس از ترک خوردگی بدون تغییر ماند).
- 4- در مورد تیرهای با مقادیر زیاد آرماتورهای پیش تنیده، مقاومت تیرها حتی پس از افزایش نیروی پیش تنیدگی به میزان کمی افزایش یافت.
- 5- کرنش های ثبت شده در تیرهای با آرماتورهای FRP، از تیرهای با آرماتورهای فولادی بیشتر بوده و ارتفاع تار خنثی کمتر بود، چرا که ضریب ارتجاعی آرماتورهای FRP در حدود  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{2}{3}$  آرماتورهای فولادی بود.



انتخاب نوع الیاف سیستم FRP براساس نیازمندی سازه می باشد :

- \* کیفیت سطح مورد پوشش
- \* درجه ایجاد مقاومت
- \* افزایش شکل پذیری

تقویت سازه در مقابل زلزله با استفاده از صفحات **G Sheet**



10/90 G Sheet (تار 90% و 10% پود نوار می باشد) برای تقویت دورپیچی سازه ها در مقابل زلزله تولید گردیده است. در چند مورد توسط تست های مختلف در پروژه های اجرایی شده (تست های (push pull) مشخص شده است که شکل پذیری سازه افزایش پیدا کرده است.

- E glass

AR (alkali resistant) glass - الیاف شیشه در مقابل مواد

قلیائی

## تقویت المانهای باربر با استفاده از صفحات C-Sheet240



محصول C-Sheet240 بمنظور بهبود مقاومت فشاری ستونها مورد استفاده قرار میگیرد. لمینیت های CFK قابلیت تحمل لنگر خمشی ناشی از بارهای وارده به ستونها را دارا می باشند.

در صورت استفاده از سیستم FRP مشکلی از نظر نفوذ پذیری بخار آب بوجود نمی آورد. (این مسئله توسط سیستم ضمانت میگردد)

### تقویت مقاومت خمشی با استفاده از سیستم FRP



تقویت مقاومت کششی و خمشی بوسیله استفاده از لمینیت های پیش ساخته CFK انجام میگردد. برنامه اندازه گیری ابعاد آنها با همکاری شرکت مهندسین BOW در آلمان انجام گرفته است. بوسیله برنامه تولید شده بصورت اتوماتیک مقاومت های برشی و مهاری محاسبه گردیده است.

### تقویت مقاومت برشی خارجی با استفاده از C-Sheet 640

تقویت مقاومت برشی خارجی بوسیله استفاده از لمینیت های پیش ساخته CFK انجام میگردد. بوسیله برنامه تولید شده بصورت اتوماتیک مقاومت های برشی خارجی و مهاری محاسبه گردیده است.

## نتیجه‌گیری :

با توجه به قابلیت‌ها و ویژگی‌های محصولات FRP و نتایجی که طی چند سال آزمایشات و تلاش‌های بسیار محققین حاصل گشته است، می‌توان دریافت که این محصولات می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای فولاد باشند. این مطلب از دو منظر قابل توجه و حائز اهمیت می‌باشد که یکی بکارگیری این محصولات در ساخت سازه‌ها و دیگری استفاده از آنها جهت بهسازی و مقاوم‌سازی و ترمیم سازه‌ها و ابنیه موجود می‌باشد.

رویکرد اخیر بحثی جدید و مطرح در مجامع علمی در دنیا بوده و ضرورت و اهمیت آن در بسیاری زمینه‌ها به وضوح احساس می‌گردد و پروژه‌های تحقیقاتی بسیاری نیز در این زمینه در حال انجام می‌باشد. در کشور ما نیز بحث مقاوم‌سازی و بهسازی اخیراً مورد توجه اساتید و پژوهشگران قرار گرفته و فعالیتها و اقداماتی در این زمینه آغاز گشته است. از جمله موضوعات مهم در این زمینه می‌توان به مقاوم‌سازی لرزه‌ای خطوط گاز و نفت، بهسازی سازه‌های آبی، مقاوم‌سازی سازه‌ها و ابنیه روستایی، بهسازی آثار تاریخی و غیره اشاره نمود.

نکته قابل توجه دیگر آن است که از آنجا که یکی از ویژگی‌های مهم و مفید محصولات FRP مقاومت آنها در برابر خوردگی می‌باشد، استفاده از این محصولات در سازه‌های دریایی در نواحی آبی جنوب کشور که خوردگی یکی از معضلات عمده آنها می‌باشد، همچنین بکارگیری این محصولات در سازه‌ها در شهرهای بزرگ و صنعتی که آلودگی بالای آنها در هنگام بارندگی می‌تواند منجر به تولید باران اسیدی گردد، می‌تواند تا حد زیادی مشکلات موجود را برطرف نماید.

امید است با فعالیت هر چه بیشتر پژوهشگران و توجه و عنایت کارشناسان و مسئولین به این موضوع جدید و خطیر، شاهد پیشرفت هر چه بیشتر کشور عزیزمان در این زمینه باشیم.

## پیشنهادهای:

بازرسی منظم و دقیق در حین ساخت و نیز ثبت اطلاعاتی در خصوص نفوذ مواد آلاینده نظیر دی اکسید کربن و اکسید گوگرد در قسمت بهره برداری همواره بسیار با ارزش تر از صرف هزینه‌های سنگین تعمیر و یا تعویض سازه خواهد بود.

## مراجع:

ارزیابی عملکرد و روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی - دکتر علیرضا رهایی - مهندس سعید نعمتی، 1384



تعمیر و حفاظت سازه های بتنی - دکتر علی اکبر  
رمضانیانپور - مهندس رضا پاشایی، 1383  
آسیب دیدگی های بتن ، علل و عوامل آن - مرکز تحقیقات  
ساختمان و مسکن 80  
کربناسیون در سازه های بتن مسلح- دکتر علی اکبر  
رمضانیانپور - مهندس رضا پاشایی، 1384  
جزوه درسی تکنولوژی بتن - دکتر فرشاد وزین رام، 1385

*Earthquake Engineering Research, 'Loma PRIETA Collection, University of California', Berkeley*

*Earthquake Engineering Research institute (2004), 'Northridge Earthquake of January 17, 2003 reconnaissance report', Earthquake Spectra, Supplement C to Volume 11*

*EQE International (1995). The January, 2003 Kobe earthquake; An EQE Summary Report, April*

*Richardson.G.N & Feger.A & Lee. K.L, "Seismic testing of reinforced earth walls", journal of geotechnical engineering, Div. ASCE 103 (1), 1977, pp. 1-17.*

*Wilkins.M.L., "Fundamental methods Hydrodynamics", Journal of Methods in computational physics, Vol.3, 1964, pp. 211-263.*

*Biggs.j.M., "Introduction to structural Dynamics".*

*National Building Code of India Standards Institution*

*Earthquake Damaged Buildings: An Overview of heavy debris and Victim Extrication, FEMA 158/ September 1988*

*Post-earthquake solid waste management strategy (for the City of Vancouver and the surrounding area) Wojtarowicz, Margaret, Atwater,*

*James WGiorgio Croci-The conservation and structural restoration of Architectural Heritage*

*Earthquake Engineering Research, 'Loma PRIETA Collection, University of California', Berkeley- Earthquake Engineering Research institute*

*(2004), 'Northridge Earthquake of January 17,2003 reconnaissance report', Earthquake Spectra, Supplement C to Volume 11*

*EQE International (1995). The January, 2003 Kobe earthquake; An EQE Summary Report, April*

*Richardson.G.N & Feger.A & Lee. K.L, "Seismic testing of reinforced earth walls", journal of geotechnical engineering, Div. ASCE 103 (1), 1977, pp. 1-17.*

*Wilkins.M.L., "Fundamental methods Hydrodynamics", Journal of Methods in computational physics, Vol.3, 1964, pp. 211-263.*

*Biggs.j.M., "Introduction to structural Dynamics*

## آشنایی با روشهای تقویت خمشی و برشی تیر بتن آرمه

### با ورقه FRP و مکانیزمهای گسیختگی محتمل

ایمان الیاسیان- کارشناس ارشد سازه

[iman.elvastian@gmail.com](mailto:iman.elvastian@gmail.com)

#### چکیده :

با توجه به احتمال ضعف تیرهای اصلی برخی از سازه ها چون تابلیه پلها در برش و خمش به دلیل افزایش بار ترافیکی لزوم آشنایی با برخی از روشهای تقویت آنها با ورقه FRP و انواع مودهای شکست در حالات تقویت ضروری است .

**کلید واژه ها :** تیر بتن آرمه - ورقه FRP - تقویت خمشی و برشی - مکانیزم گسیختگی

#### مقدمه :

اولین تحقیقات در زمینه تقویت خمشی تیر بتن آرمه توسط پروفیسور Meier در سال 1980 در آزمایشگاه مرکزی تست مصالح سوئیس انجام شد . روشهای سنتی تقویت چون استفاده از پس تنیدگی خارجی، ورقه های فولادی پیوند و . . . هر کدام ضعفهایی در روند اجرا دارند که به کمک آنها نمی توان به مقاومت مورد نظر رسید از اینرو در دهه های اخیر تحقیقات در زمینه تقویت اعضای باربر سازه ای چون تیر با ورقه های FRP بجای ورقه های فولادی رشد چشمگیری داشته و به مقایسه به معایب و مزایای هر دو روش پرداخته شده است .

### 1- مقاوم سازی خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP Flexural Strengthening of Beams

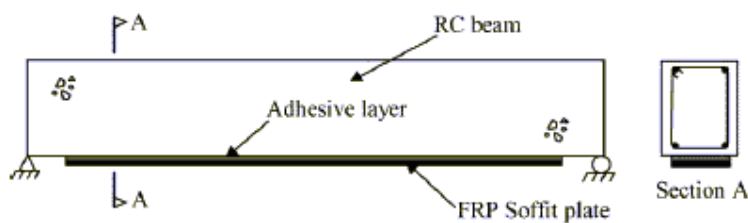
#### 1-1. مقاوم سازی خمشی تیر بتن آرمه با ورقه زیرین

FRP (FRP Soffit Plate) :

بدین صورت انجام می شود که ابتدا سطح زیرین تیر که قرار است ورقه FRP به آن چسبانده شود را آماده نموده و سطوح ضعیف را برداشته تا دانه های بتن نمایان شده و جهت پیوند مناسب آماده گردد . سپس ورقه های دست ساز<sup>3</sup> را به کمک چسب به سطح مورد نظر تیر می چسبانند در طی این روند می توان از ورقه های پیش ساخته یا مهارهای U شکل برای کاهش ریسک عدم پیوند ورقه استفاده کرد .

---

1-Wet-Lay-Up



RC beam bonded with an FRP soffit plate.

### شکل-1 تیر بتن آرمه با ورقه FRP تحتانی [3]

ورقه‌های زیرین خود به 3 قسم 1- ورقه‌های زیرین تنیده نشده **Unstressed Soffit Plates**

2- ورقه‌های زیرین تنیده نشده با مهار انتهایی **End Anchorage for Unstressed Soffit Plates**

3- ورقه‌های پیش‌تنیده زیرین **Prestressed Soffit Plates** تقسیم می‌شود.

### 1-1-1 مقاوم سازی با ورقه‌های زیرین تنیده نشده **Unstressed Soffit Plates**

پر کاربردترین حالت می‌باشد و اکثر تحقیقات روی این روش متمرکز شده است. 3 روش جهت چسباندن ورقه‌ها به کف تیر بتن آرمه وجود دارد.

1- ورقه‌های پیش‌ساخته FRP با فرایند **Pultrusion Prefabricated / Pultruded FRP Plates**

2- ورقه‌های آماده شده در محل (دست‌ساز) **Wet-Lay-Up**

3- روش تزریق چسب **Resin infusion**

در روش اول ورقه‌ها به اندازه لازم بریده شده و به سطح زیرین تیر بتن آرمه چسبانده می‌شوند، این روش دارای درجه اطمینان بالایی از نظر یکنواختی مواد و کنترل کیفیت می‌باشد. روش دستی دارای کاربرد بیشتری است این روش ارزانتر می‌باشد و در آن رزین را ابتدا به سطح بتن کشیده، سپس لایه فیبری را بوسیله غلتک به سطح بتن می‌چسبانند. این روش به نا صافی سطح بتن حساس است و این ناصافیها سبب عدم پیوند مناسب FRP و جدایی ورقه از بتن می‌گردد. روش تزریق چسب نیز خصوصیات مشابه با روش دست‌ساز دارد ولی کاربرد محدودی دارد.

### 1-1-2 مهار انتهایی برای ورقه‌های تنیده نشده : **End Anchorage for Unstressed Soffit Plates**

برای جلوگیری از گسیختگی عدم پیوند یا عدم چسبندگی (debonding) مهار مکانیکی می‌تواند نصب شود استفاده از تسمه U شکل فولادی یا از جنس FRP معمولترین

نوع این مهارها می باشد. این تسمه ها می توانند با پیچ Bolt یا چسب Bond به انتهای تیر متصل شود. در روش پیچی، اتصال بتن با FRP مستقیماً با پیچ صورت می گیرد. مهار انتهایی از جنس FRP می تواند به صورت دستی به شکل دورپیچ کامل یا نسبی نصب گردد.

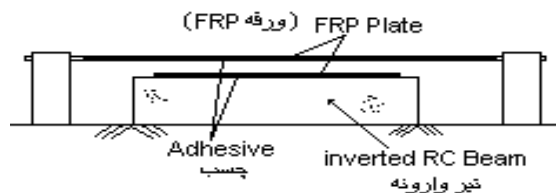


شکل-2 تیر بتن آرمه تقویت شده با ورقه FRP با نوار مهار انتهایی U شکل [1]

### 1-1-3. ورقهای پیش تنیده زیرین Prestressed Soffit Plates

ورقهای FRP ساخته شده با فرایند Pultrusion<sup>4</sup> را می توان به صورت پیش تنیده به تیر بتن آرمه متصل کرد. مهمترین مزیت استفاده از ورقهای پیش تنیده این است که قبل از وارد شدن بار به سازه ظرفیت باربری سازه را افزایش می دهد و سبب کاهش عرض ترکها می شود. از آنجایی که مقاومت کششی FRP بالا است لذا پیش تنیدگی منجر به کاربرد مؤثر آن می گردد. پیش تنیدگی نسبت به پارامتر کارگر حساس بوده و دقت بخصوصی جهت طراحی و نصب سیستم مهاریی انتهایی نیاز دارد این روش به دلیل محدودیت تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی که در این زمینه انجام شده است هنوز در مراحل آغازین می باشد. در این روش پس از آماده کردن سطح زیرین تیر، ورقه تا یک سطح موردنظر کشیده شده، سپس سطح زیرین تیر و ورق را با چسب آغشته می کنند. و تیر را بلند کرده تا در ورق فشار ایجاد شود. پس از این که چسب کمی خود را گرفت به کمک گیره ها و مهارهای مکانیکی انتهایی کشیده و پس از آن که چسب خود را گرفت این قیدهای مکانیکی انتهایی را آزاد می کنند.

**1- فرایند پلترژن:** با این روش لمینیت ها یا ورقهای پوششی با مقطع عرضی و طول معین ساخته می شود در این روش حین کشیدن نوار فیبر رزین یا ماتریس که معمولاً از پلی استر یا وینیل استر می باشد با گرمای الکتریکی به کمک روغن داغ به فیبر اضافه می شود و اتاقک پیش گرمایشی فرکانس رادیویی کنترل کننده ضخامت در زمان عمل آوری می باشد.



شکل-3 روند نصب ورقه FRP پیش تنیده [1]

## 2- مقاوم سازی برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP Shear Strengthening of Beams

گسیختگی های برشی و خمشی از مهمترین مد های گسیختگی برای تیرهای تقویت نشده می باشند. گسیختگی خمشی به دلیل نرم بودن عموماً بر گسیختگی برشی به دلیل ترد بودن ارجح می باشد. زیرا در گسیختگی نرم امکان باز توزیع تنش وجود دارد و می تواند هشدار برای کاربر باشد. در حالی که در گسیختگی ترد و ناگهانی به دلیل عدم اخطار قبلی می تواند سبب فاجعه گردد. در مقاوم سازی خمشی به کمک ورقه های خارجی FRP نشان داده شده که شکل پذیری تیر نسبت به حالت مقاوم سازی نشده بسیار کمتر می باشد. با این وجود این مد گسیختگی از گسیختگی برشی نرمتر می باشد. بنا بر این یک تیر مقاوم سازی شده باید دارای ظرفیت برشی کافی بوده به طوری که به ظرفیت خمشی برسد. زمانی که یک تیر بتن آرمه در برش ضعیف داشته باشد یا ظرفیت برشی آن از ظرفیت خمشی تیر کمتر باشد پس از انجام مقاوم سازی خمشی، مقاوم سازی برشی باید مورد توجه قرار گیرد. باید دانست که اندازه گیری ظرفیت برشی تیر مقاوم سازی شده بسیار مهم می باشد. مقاوم سازی برشی، برخی مواقع نقشی کلیدی در استراتژی مقاوم سازی برای ساختمان های بتن آرمه را بازی می کند. به هر حال چند روش سنتی برای مقاوم سازی برشی تیر ها وجود دارد. اخیراً استفاده از نوارهای FRP بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در کنار سایر نتایج عالی FRP ها از جمله مقاومت در مقابل خوردگی و مقاومت بالا در مقابل وزن کم انعطاف پذیری FRP ها جهت فیت شدن با سایر شکل ها و گوشه ها همواره برای مقاوم سازی سودمند واقع شده اند مطالعات بر روی مقاوم سازی برشی از سال 1990 شروع شده است و همچنان ادامه دارد.

### 1-2. اگوهای مختلف تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP<sup>5</sup>

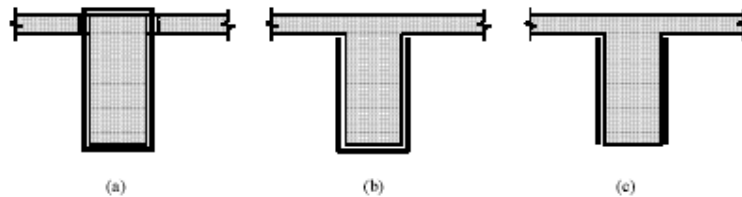
- 
- 1- Various schemes for wrapping transverse FRP reinforcement
  - 2-FRP wrapped entirely around the beam)
  - 3-FRP U Wrap                      4-FRP bonded to the two sides of the beam

به طور کلی 3 نوع الگوی پیوند در تقویت برشی در تیرها وجود دارد

1- ورقه FRP دور تا دور تیر را در برگرد 2 مطابق شکل 4- (a)

2- پوشش U ش FRP 3 مطابق شکل 4- (b)

3- ورقه FRP دو طرف تیر چسبانده شود 4 مطابق شکل 4- (c)



شکل 4- انواع الگو برای تقویت عرضی با FRP [2]

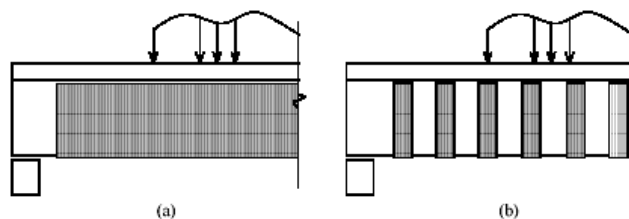
الگوی (c) که ورقه FRP دو بر تیر چسبانده می شود رایجترین الگو می باشد .

الگوی (b) یا FRP U Wrap روشی عملی برای افزایش مقاومت برشی مقاطع بتن آرمه می باشد ولی در نواحی لنگر مثبت عمدتاً موثر می باشد . چون در نواحی لنگر منفی ترکهای اولیه عمدتاً در نزدیکی دال بتن آرمه رخ داده و این الگوی تقویتی قادر به کنترل و جلوگیری از گسترش ترکهای اولیه نبوده ، بنابراین این ترکها باز شده و این الگوی تقویتی تأثیری در کنترل ترک در ناحیه لنگر منفی ندارد . الگوی (a) که پوشش دور تا دور می باشد موفق ترین الگوی تقویت برشی است ولی

به دلیل مسائل اجرایی و عدم دسترسی کامل به دور تا دور امکان اجرای این الگو به دلیل وجود دال بتن آرمه کم است .

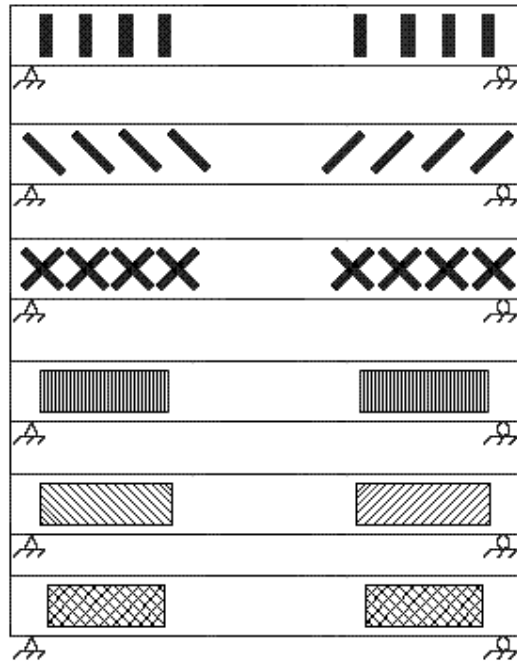
پوششها و توزیع ورقه را در تقویت برشی به 2 بخش

1- یکپارچه 2- منقطع تقسیم می کنیم ( مطابق شکل-5) . الگوی نوارهای منقطع یا Strips امکان تبخیر آب بتن ، عمل آوری و مصرف کمتر FRP را فراهم می سازد ولی از نظر اجرایی مشکلات خاص خود را داشته از طرفی امکان تشکیل مود گسیختگی خطرناک عدم پیوند یا چسبندگی De-bonding در این حالت بیشتر است.



**شکل 5- الگوی یکپارچه یا منقطع [2]**

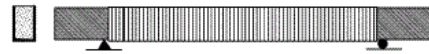
به طور کلی می تواند جهت نوارهای تقویت یا Strips و جهت فیبرهای اصلی در حالت یکپارچه متغیر بوده حتی از 2 نوار عمود برهم یا 2 لایه با فیبرهای عمود برهم ( حالت ضربدری ) خصوصاً تحت بارهای سیکلی استفاده می شود .



**شکل 6- الگوهای مختلف تقویت برشی تیر با ورقه FRP [4]**



یک لایه نوارهای منقطع CFRP و په صورت U شکل



یک لایه ورقه یکپارچه CFRP و په صورت U شکل و یا جهت اصلی فیبر 90 درجه



دو لایه ورقه یکپارچه CFRP روی هم و یا جهت اصلی فیبر 0 و 90 درجه

**شکل 7- نمایش برخی از الگوهای تقویت برشی با ورقه CFRP [5]**

در جداول زیر به مقایسه انواع الگوهای برشی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP پرداخته شده است .

جدول 1- جدول مزایا و معایب الگوهای مختلف پیوند FRP [ 4 ]

نوع پیوند	مزایا	معایب
پیوند کناره یا دو طرفه	کاربرد آسان ، نیاز به کمترین مقدار FRP برای افزایش اندک ظرفیت برشی	بسیار آسیب پذیر در مقابل گسیختگی عدم پیوند
ژاکت های U شکل	استفاده از مهار پایینی U شکل عالی است . آسیب پذیری کمتر در مقابل گسیختگی عدم پیوند و تأثیر متوسط مؤثر برای مهارمکانیکی در تقویت خمشی FRP	ممکن است به مهار مکانیکی U شکل در انتهای آزاد نیاز باشد
دورپیچ کامل	کمترین آسیب پذیری در مقابل گسیختگی عدم پیوند ، تأثیر عالی برای مهارمکانیکی در تقویت خمشی FRP	چنانچه دست کم دسترسی به یک طرف تیر ممکن نباشد اجرای آن امکانپذیر نیست یا مشکل است

#### جدول 2- معایب و مزایای توزیع مختلف ورقه ها [4]

توزیع ورقه ها	مزایا	معایب
نوارها STRIPS	انعطاف پذیری در کنترل مقدار FRP امکان صرفه جویی مواد و یکنواختی لایه جسب براحتی بدست می آید	بسیار پرزحمت
صفحه ها / ورق ها Plates/Sheets	آسانی کاربرد در محل محافظت از تیر درمقابل تهاجمات جوی اگر به طور کامل تیر رابپوشاند	کاهش انعطاف پذیری در کنترل مقدار FRP یکنواختی لایه جسب به سختی بدست می آید



جدول 3- مزایا و معایب جهت‌های مختلف فیبر [ 4 ]		
جهت فیبر	مزایا	معایب
عمودي ( $\beta=90$ ) ( )	راحتي کاربرد مؤثر براي تقويت برشي معكوس	اثر كم براي كنترل تركهاي برشي در مقايسه با نوارهاي مورب
مورب غالباً ( $\beta=45$ ) ( )	بسيار مؤثر براي كنترل تركهاي برشي	براي کاربرد به صورت ژاكت U شكل ودورپيچ كامل غير ممکن است
نوارها / صفحات 2 جهت ( $\beta=0$ / 90 يا ( $\beta=45$ / 135)	بسيار مؤثر براي كنترل تركهاي برشي مؤثر براي تقويت برشي معكوس	مقدار فيبر زيادي نياز دارد

### 3- مودهای گسیختگی و رفتار مرسوم Failure Modes and Typical Behavior

#### 3-1. گسیختگی خمشی : Flexural Failure

اگر انتهای ورقه FRP بصورت مناسب مهار شده باشد ، ظرفیت نهایی خمشی تیر همراه با گسیختگی خمشی ورقه یا بر اثر خرد شدن بتن فشاری رخ می دهد . این موضوع بسیار شبیه مد گسیختگی خمشی کلاسیک تیر بتن آرمه است و تنها به دلیل ترد بودن رفتار ورقه FRP کمی تفاوت وجود دارد . گسیختگی ورقه FRP همراه با جاری شدن میلگردهای فولادی است . به هر صورت چنانچه میلگردهای فولادی فاصله زیادی از وجه کششی داشته ، (به تار خنثی نزدیک باشند ) ممکن است جاری نشوند . تیری که بر اثر خرد شدن بتن فرو می ریزد می تواند علتش زیاد بودن مقدار FRP و ترد شکستن قطعه باشد ، ضمناً با مهار انتهایی مناسب می توان جلوی گسیختگی زود هنگام عدم چسبندگی مناسب یا debonding را گرفت .

#### 3-2. گسیختگی برشی : Shear Failure

تیرهای بتن آرمه معمولی برای گسیختگی در مد خمشی که مد نرمتری نسبت به مد گسیختگی برشی که مد تردتری است طراحی می شوند و توجه به این نکته ضروری است که گسیختگی برشی بر اثر تقویت مد خمشی ممکن است رخ دهد . در بعضی مواقع برای اطمینان از این که گسیختگی خمشی قبل از

گسیختگی برشی اتفاق افتد مقاوم سازی برشی و خمشی توأم انجام می شود .

#### 4. انواع مودهای گسیختگی خمشی

- 1- گسیختگی ناشی از پارگی ورقه FRP<sup>6</sup>
- 2- گسیختگی ناشی از خردشدگی بتن ناحیه فشاری<sup>2</sup>
- 3- گسیختگی برشی<sup>3</sup>

مود اول اگر اتفاق افتد تقویت خمشی ایده آل خواهیم داشت زیرا نه تنها مد گسیختگی نرم بوده بلکه از حداکثر ظرفیت خمشی تیر نیز استفاده شده است ولی مود دوم به دلیل خرد شدن بتن ناحیه فشاری ترد می باشد. توجه شود که بر اثر تقویت خمشی ممکن است تیر دچار گسیختگی ترد برشی شود که بایستی با تقویت برشی و خمشی توأم جلوی این مد ناگهانی را گرفت.

4- گسیختگی ناشی از عدم پیوند انتهایی ورقه<sup>4</sup> : این گسیختگی زود رس بوده و نمی گذارد تیر به ظرفیت خمشی مطلوب خود برسد. در این حالت ورقه از سطح بتن در انتهای تیر جدا می شود و این مود می تواند با گسیختگی ناشی از جدایش پوشش بتنی ترکیب شود

5- گسیختگی ناشی از جدایش پوشش بتنی<sup>5</sup> : این گسیختگی بر اثر بوجود آمدن ترک در محل یا نزدیکی انتهای ورقه، در اثر بالابودن تنش برشی و نرمال در اثر قطع ناگهانی ورقه در این محل رخ می دهد. وقتی ترک در نزدیکی یا محل انتهای ورقه بوجود می آید، این ترک در سطح کششی مسلح شده به صورت افقی منتشر شده و در راستای فولادهای کششی مسلح کننده، توسعه یافته و سبب جدا شدن پوشش بتنی می شود.

6- گسیختگی ناشی از عدم پیوند درون وجهی انتهای ورقه<sup>7</sup>: عدم پیوند بین چسب و تیر که از انتهای ورقه توسعه می یابد. دیاگرام بار-تغییر مکان این مود شبیه گسیختگی جدایش بتن است و تحقیقات نشان می دهد گسیختگی از این نوع به دلیل بالا بودن تنش نرمال و برشی در نزدیکی یا محل انتهای ورقه به گونه ای که از مقاومت تیر در ضعیف ترین بخش تیر بالاتر می باشد. به دنبال آن، یک لایه نازک بتن معمولاً به سطح ورقه بتن چسبیده و می

1-FRP Rupture Failure    2-Crushing of Compressive Concrete Failure    3-Shear Failure  
4-Plate-end Debonding Failure    5-Concrete Cover Separation

1-Plate-end Interfacial Debonding    2-Intermediate Crack-induced Interfacial Debonding Failure  
3-Intermediate Flexural Crack-induced Interfacial Debonding Failure  
4-Intermediate Flexural Shear Crack-induced Interfacial Debonding Failure

توان گفت گسیختگی در بتن مجاور بتن چسبیده به ورقه FRP رخ می دهد. خطر تشکیل این مودبر اثر نامرغوب بودن چسب و ناهمئاری سطح بتن تشدید می شود.

#### **7- گسیختگی ناشی از ترکهای وسط به انضمام عدم پیوند درون وجهی<sup>2</sup> :**

گسیختگی عدم پیوند ممکن است در اثر ترک خمشی یا ترکیب ترک خمشی- برشی در فاصله ای دورتر از انتهای ورقه شروع شود و به سمت انتهای ورق توسعه یابد. این نوع گسیختگی غالباً در بتن مجاور چسب رخ می دهد و می تواند به دوشکل گسیختگی ناشی از ترک خمشی میانی به انضمام عدم پیوند درون وجهی و گسیختگی ناشی از ترک خمشی- برشی میانی به انضمام عدم پیوند درون وجهی باشد و این نوع گسیختگی بیشتر در تیرهای سطحی و غیر عمیق بیشتر از گسیختگی عدم پیوند در انتهای ورقه رایج است.

#### **8- گسیختگی ناشی از ترک خمشی میانی به انضمام از بین رفتن چسبندگی درون وجهی<sup>3</sup>**

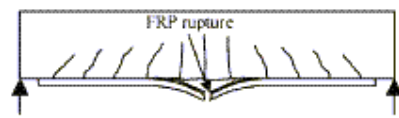
وقتی يك ترک خمشی اصلی در بتن ایجاد می شود تنش کششی تحمل شده توسط بتن بر اثر ایجاد ترک آزاد شده و به ورقه FRP انتقال می یابد ، به بیان دیگر تنش کششی درون وجهی بین ورقه FRP و بتن در نزدیکی محل ترک به صورت ناگهانی افزایش می یابد. وقتی این تنشها به مقدار بحرانی خود می رسند ، عدم پیوند و چسبندگی در محل ترک آغاز شده و به سمت یکی از انتها ها که معمولاً انتهای نزدیک است پیشرفت می کند.

#### **9- گسیختگی ناشی از ترک خمشی- برشی میانی به انضمام عدم پیوند درون وجهی<sup>4</sup>**

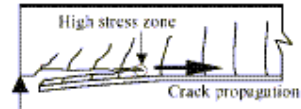
عریض شدن ترک يك نیروی محرک برای انتشار عدم پیوند و چسبندگی می باشد . به هر حال در این حالت در فاصله عمودی بین دو سطح ترک تولید تنش غشایی روی ورقه FRP شده که به سطح درونی بتن نیز گسترش می یابد. به نظر محققان عریض شدن ترک در این مد گسیختگی مهمتر از اثر جابجایی دو سطح ترک بر روی یکدیگر است.

#### **10- گسیختگی های عدم پیوند دیگر<sup>8</sup>**

این گونه مدها بر اثر ترکیب دو یا چند بوجود می آید ، به عنوان مثال ترکیب مد گسیختگی عدم پیوند درون وجهی انتهای ورقه با مد گسیختگی جدایی پوشش بتنی نمونه ای از این ترکیب است



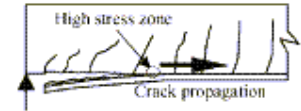
(a) FRP rupture



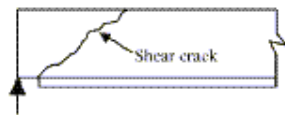
(d) Concrete cover separation



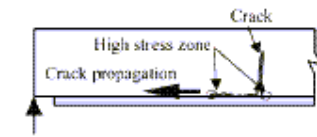
(b) Crushing of compressive concrete



(e) Plate end interfacial debonding



(c) Shear failure



(f) Intermediate crack induced interfacial debonding

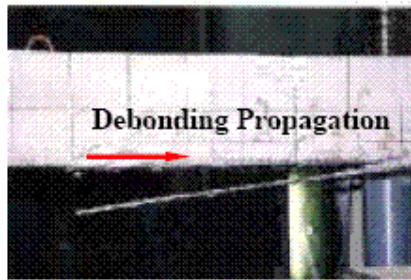
شکل 7- نمایش برخی از مود های گسیختگی خمشی (a) پارگی ورقه FRP (b) خرد شدگی بتن ناحیه فشاری (c) گسیختگی برشی (d) جدا شدن پوشش بتن (e) عدم پیوند درون وجهی انتهای ورق (f) ترکهای میانی ایجاد کننده عدم پیوند درون وجهی [1]



(a) Rupture of FRP

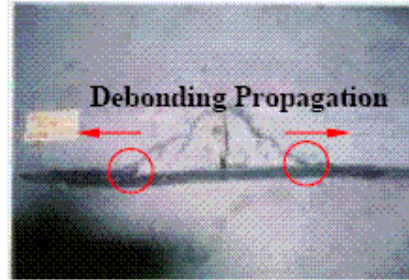


مودهای پارگی ورقه FRP



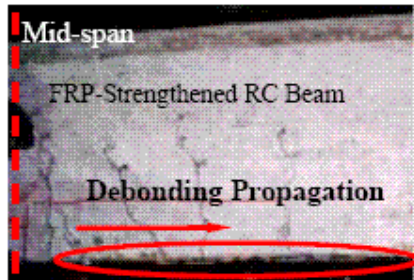
(b) Delamination of FRP at FRP ends

جدایش ورقه FRP در انتهای ورقه



(c) Peeling-off of FRP by Shear Cracks

کنده شدن ورقه FRP در میانه ورقه در اثر ترک برشی

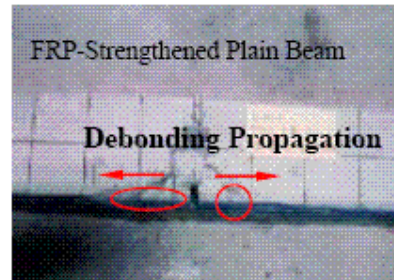


(d) Debonding of FRP Caused by Intermediate Flexural Cracks

گسیختگی عدم پیوند ایجاد شده در ورقه FRP در اثر ترکهای خمشی متوسط

Failure Modes Observed in FRP-Strengthened Concrete Beams

مودهای گسیختگی مشاهده شده در تیر بتن آرمه تقویت شده با ورقه FRP



شکل 8- نمایش شماتیکی برخی از مکانیزمهای گسیختگی در تقویت خمشی [6]

5- انواع گسیختگی برشی در تیر بتن آرمه معمولی در مورد یک تیر بتن آرمه تقویت نشده مدهای گسیختگی برشی عبارت است .

## 2- برش ناشی

## 1- کشش ناشی از برش Shear tension

### ازخمش Flexural shear

## 4- گسیختگی

## 3- فشار ناشی از برش Shear compression

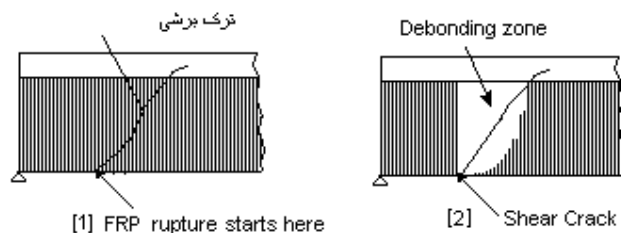
### تیر عمیق Deep beam failure

کشش ناشی از برش و برش ناشی ازخمش برای نسبت دهانه به عمق بزرگ اتفاق می افتد ( برای تیر بتن آرمه معمولی  $2.5 < B/d < 6$  ) و گسیختگی برشی به ندرت برای  $B/d > 6$  اتفاق می افتد. فشار ناشی از برش برای نسبت دهانه به عمق کوچکتر اتفاق می افتد (برای تیر بتن آرمه معمولی  $1 < B/d < 2.5$  اتفاق می افتد. ) و گسیختگی تیر عمیق برای نسبت دهانه به عمق  $B/d < 1$  اتفاق می افتد .

## 6- مودهای گسیختگی برشی در تیر تقویت شده

### 1- گسیختگی برشی با پارگی ورقه FRP<sup>9</sup> :

این نوع گسیختگی اغلب اوقات بوسیله یک ترک برشی کششی قطری اتفاق می افتد . ترکهای خمشی عمودی ابتدا در وجه کششی تیر بوجود می آیند، یک ترک نزدیک تکیه گاه ممکن است به سمت محل اعمال بار گسترش یابد و سبب بوجود آمدن یک ترک مورب گردد. در برخی موارد یک ترک مورب ممکن است به صورت ناگهانی رخ دهد همراه با عریض شدن ترک قطری حداکثر کرنش نهایی FRP سرانجام به کرنش نهایی رسیده ، که غالباً در انتهای پایین ترک رخ می دهد. پاره شدن FRP در طول ترک قطری روی سطح بتن رخ داده و سبب گسیختگی کامل تیر بصورت ترد می گردد . عدم پیوند نسبی FRP در دو سطح کناری تیر غالباً قبل از گسیختگی اتفاق می افتد ولی در نهایت گسیختگی در اثر پاره شدن FRP رخ می دهد . بنابراین عدم پیوند FRP ( FRP Debonding ) نمی تواند بر ظرفیت برشی این مد اثر بگذارد . داده های آزمایشی موجود ولی محدود نشان می دهد که همواره همه تیرهای دورپیچ شده یا برخی از ژاکت شده U شکل در این مد فرو می ریزند .



شکل 9- [1] کشش برشی همراه با پاره شدن FRP  
 [2] گسیختگی برشی ناشی از عدم پیوند FRP [4]

## 2- گسیختگی برشی بدون پارگی ورق FRP<sup>10</sup> :

روند گسیختگی در این مد لزوماً مشابه با گسیختگی برشی ناشی از پارگی FRP می باشد مگر اینکه FRP در گسیختگی ناشی از این مد پاره شود. FRP می تواند حتی مقدار قابل ملاحظه ای بار بعد از فرو ریختن تیر تحمل کند. مثالی از این مد گسیختگی شامل دو تیر تقویت شده با یک ورقه FRP آرامیدی است که کرنش نهایی آن 2.25 % را شامل می شود (Chajes et al. 1995)

AFRP اجازه می دهد که تیر فرو ریخته به تحمل بار قابل ملاحظه ای مبادرت ورزد.

## 3- گسیختگی برشی ناشی از عدم پیوند یا چسبندگی ورقه FRP<sup>2</sup> :

گسیختگی یک تیر بتنی تقویت شده ممکن است برای برش در اثر از بین رفتن پیوند بین بتن و FRP بوجود بیاید. زمانی که FRP جهت Delamination آماده میشود، تیر به سرعت فرو ریزد. شکل پذیری تیر در این مد غالباً محدود می باشد. نتایج آزمایشهای موجود نشان می دهد غالباً همه تیر های تقویت شده با پیوند های FRP کناری و اکثر ژاکت های U شکل در این مد فرو می ریزند.

## 4- گسیختگی نزدیک مهار مکانیکی<sup>3</sup> :

اگر برای مهار FRP در وجوه تیربتن آرمه از مهارهای مکانیکی استفاده شود، این امکان وجود دارد که در نزدیکی محل مهار شده گسیختگی رخ دهد. بطور مثال مهارهای مکانیکی استفاده شده برای مهار ژاکت های U شکل، زیر بال های تیر T شکل ممکن است سبب بوجود آمدن Delamination در مجاورت بال شود. معمولاً پیرامون مهارهای مکانیکی هم در ورقه و هم در بتن می تواند سبب گسیختگی های محلی شود. این مد های گسیختگی در مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده توسط (Sato et al. 1997) قابل دسترسی می باشد. جهت طراحی دقت بیشتری را باید مبذول

1- Shear Failure without FRP Rupture      2- Shear Failure due to FRP Debonding  
 3- Failure Near Mechanical Anchors

داشت. این موضوع تا زمان بدست آمدن درکی بهتر از این مد باید رعایت شود .

## 5- گسیختگی محلی Local Failure

### نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات :

1- انتخاب الگوی مناسب برای تقویت تیر با توجه به انواع مودهای گسیختگی خمشی و برشی صورت می گیرد لذا شناخت و درک صحیح این مودها و بررسی تحلیلی و ارائه روابط قابل قبول برای آنالیز و طراحی سیستم تقویت با توجه به مود گسیختگی ضروری است.

2- حتی المقدور تقویت برشی قبل از تقویت خمشی صورت گیرد یا بصورت توأم صورت گیرد تا احتمال تشکیل مود شکست تردبرشی کاهش یابد

3- در تیر تقویت خمشی شده برای کاهش اثرات مودهای گسیختگی موضعی از مهار انتهایی استفاده شود که تحقیقات در این زمینه محدود بوده و لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه بجا است

4- به طور کلی تحقیقات کمتری در مورد مودهای گسیختگی نسبت به مودهای خمشی انجام شده خصوصاً درک درست مود Delamination و Debonding برای قضاوت درست از مکانیزم سیستم تقویت ضروری است

### منابع :

- [1] – J.G.Teng – J.F. Chen – S.T.Smith – L. lam "FRP Strengthened RC Structures" .Published by Wiley - 2002  
[2] –"Chapter 7 Shear Strengthening "- Wabo MBrace Composite Strengthening System Design Guide July 2002  
[3] - S.T.Smith, J.G.Teng -" FRP-strengthened RC beams. I: review debonding strength models "-Engineering Structures Elsevier Sep 2001

[4] ایمان الیاسیان - پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشگاه یزد بهار 1384 - " بررسی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به روش اجزای محدود و به صورت پارامتریک "

- [5]-Ahmed Khalifa; Antonio Nanni -" Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites " – Construction and Building Materials Elsevier - January 2002  
[6]-.Hedong Niu; Zhishen Wu, Ibaraki University, Hitachi, Japan "Analytical modeling failure of FRP-strengthened Flexural structures

روشهای ارائه شده برای بررسی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP

ایمان الیاسیان - کارشناس ارشد سازه  
[iman.elvasian@gmail.com](mailto:iman.elvasian@gmail.com)



## چکیده :

به طور کلی چندین مدل برای بررسی مسأله تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP وجود دارد که در ادامه به بررسی برخی از مدل‌های ارائه شده، ضوابط و فلسفه کاربرد آنها می‌پردازیم

## کلید واژه :

تقویت برشی - تیر بتن آرمه - ورقه FRP - مدل چسبندگی - تشابه خرپایی - تئوری میدان فشاری - اصطکاک برشی

## 1- مقدمه :

همانطوری که گفته شد در این مقاله به دنبال بررسی مسأله تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به کمک روش‌های موجود چون روش مدل‌های چسبندگی، روش تشابه خرپایی یا Strut & Tie، روش تئوری میدان فشاری و اصطکاک برشی هستیم.

## 2- پارامترهای مرثر و فرضیات بکار رفته در روش طراحی برش در آیین نامه کانادا :

به طور کلی پارامترهای مؤثر را می‌توان به موارد زیر تقسیم کرد

1- مقاومت برشی بتن<sup>11</sup>

2- مقدار و توزیع آرماتور طولی و عرضی<sup>2</sup>

3- پیش‌تنیدگی<sup>3</sup>

4- نسبت دهانه

برشی به عمق<sup>4</sup>

5- ابعاد تیر<sup>5</sup>

فرضیات بکار رفته در آیین نامه کانادا در روش طراحی

برش 1- تغییر شکلها کوچک بوده 2- از تغییر

شکل‌های برشی صرف نظر شده 3- از مقاومت کششی بتن

صرف نظر شده 4- توزیع کرنش در ارتفاع تیر خطی در

نظر گرفته شده 5- همسازی کامل کرنش بین بتن و

ورقه FRP برقرار است. از فرض آخر استنباط می‌شود که

تأثیر لایه اپو کسی صرف نظر شده و پیوند بین بتن و

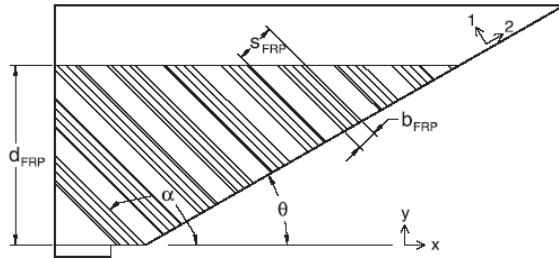
ورقه FRP با تقریب بصورت کامل در نظر گرفته شده است

3- بررسی مدل‌های مختلف ارائه شده در تقویت برشی :

1-Concrete Compressive Strength  
3-Prestressing

2-Amount and distribution of transverse and longitudinal reinforcement  
4-Span to depth ratio

5-Beam size



شکل 1 کاربرد نوارهای FRP به صورت مورب [2]

$$V_r = V_c + V_s + V_{FRP} \quad (1)$$

$$V_c = \beta \sqrt{f'_c} \frac{b_w d_v}{\tan \theta_c} \quad (2) \quad , \quad V_s = A_s f_{vy} \frac{d}{s \tan \theta_c} \quad (3)$$

$$\text{If } \theta_c = 45^\circ \Rightarrow V_s = A_s f_{vy} \frac{d}{s} \quad , \quad \beta = \frac{260}{1000 + d} \geq 0.1 \quad (4)$$

$\theta_c$  زاویه ترک خوردگی بتن و  $\beta$  ضریب انتقال برش در حالت ترک باز می باشد

$$V_{FRP} = A_{FRP} f_{FRP} \frac{d_{FRP} \sin \alpha}{S_{FRP} \tan \theta_c} (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \theta_c)$$

$$V_{FRP} = A_{FRP} f_{FRP} \frac{d_{FRP}}{S_{FRP}} (\sin^2 \alpha + \cos \alpha \cdot \sin \alpha) \quad (5)$$

و میلیمتر mm می باشد

واحدها بر حسب نیوتن N

### 3-1 مدل شبیه سازی خرپایی یا Strut & Tie

این روش که مبنای اکثر آیین نامه ها است برای نخستین بار توسط یک مهندس سوئیسی به نام Ritter در سال 1989 بکاربرده شد. در این مدل به دلیل مقاومت مناسب بتن در فشار و ضعف آن در کشش به دلیل ترک خوردگی، از بتن به عنوان عضو فشاری خرپای پیشنهادی و به صورت یک عضو مورب 45 درجه و وتر فشاری یا فوقانی و از آرماتور طولی تیر به عنوان وتر یا تحتانی و خاموتها یا آرماتور عرضی به عنوان اعضای مورب و قائم کششی خرپا در نظر گرفته شده است و به طور کلی اعضای تحت فشار را Strut و اعضای تحت کشش را Tie در نظر می گیریم البته برخی از محققان چون Al-Nahlawi and Wight در سال 1992 مدل خرپایی ارائه کردند که در آن بتن تحت کشش به عنوان Tie ارائه دادند. تحت بار نهایی معمولاً آرماتورهای قائم تسلیم شده و بتن تحت کشش نیز مقاومتش از مقاومت ترک خوردگی فراتر می رود. حال اگر ورقه کامپوزیتی FRP را اضافه کنیم بار نهایی زمان تسلیم آرماتورهای قائم و بار ترک خوردگی بتن تحت کشش افزایش می یابد.

### 3-2. مدل چسبندگی ( Bond model )

بر اساس روابط ارائه شده توسط Chaallal در سال 1998 استوار است. مبنای روابط بر این اساس می باشد که مقدار تنش مؤثر ورقه FRP در حدی بماند که همواره چسبندگی با سطح بتن حفظ شود

$$f_{FRP} = \tau_{ult} \frac{b_{FRP} d}{A_{FRP}} \leq f_{ultFRP} \quad (6)$$

$$\tau_{ult} = \frac{5.4}{1 + k_1 \tan 33^\circ} \quad (7) \quad , \quad k_1 = t_{FRP} \left( \frac{3E_a}{E_{FRP} t_{FRP}^3} \right)^{0.25} \quad (8)$$

بر اساس روابط فوق می بینیم تنش درون ورقه FRP به تنش چسبندگی، عرض و سطح مقطع ورقه FRP، عمق مؤثر تیر بستگی داشته و تنش چسبندگی به ضریب  $k_1$  بستگی دارد که این ضریب نیز با مدول الاستیسیته چسب، ورقه FRP، ضخامت لایه چسب و ضخامت ورقه FRP ارتباط دارد. رابطه پیشنهادی Khalifa در سال 1998 براساس مدل چسبندگی و کاهش تنش نهایی و تبدیل آن به تنش مؤثر استوار است

$f_{FRP} = R f_{ultFRP}$  (ضریب کاهش تنش یا کرنش) محققان روابط مختلفی برای R ارائه داده اند

$$R = 0.778 - 1.2188(\rho_{FRP} E_{FRP}) + 0.5622(\rho_{FRP} E_{FRP})^2 \leq 0.5 \quad (9)$$

رابطه (9) رابطه ارائه شده توسط Triantafillou در سال 1998 می باشد. مبنای این رابطه بر اساس گسیختگی کششی ورقه FRP استوار است و 0.5 به عنوان حد یا کران بالایی است

$$R = \frac{0.0042(f'_c)^{2/3} w_{eff}}{(E_{FRP} t_{FRP})^{0.58} \varepsilon_{ultFRP} d_{FRP}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{FRP} = \frac{f_{ultFRP}}{E_{FRP}} \quad (11) \quad , \quad w_{eff} = d_{FRP} - \exp(6.134 - 0.58 \ln(t_{FRP} E_{FRP})) \quad (12)$$

R در رابطه (10) براساس مکانیزم چسبندگی استوار است. به طور کلی R مینیمم 3 مقدار فوق (رابطه Triantafillou براساس گسیختگی کششی ورقه FRP، مکانیزم چسبندگی و کران بالایی 0.5) می باشد.

### 3-3. تئوری میدان فشاری اصلاح شده<sup>12</sup> (MCFT):

مبنای تحقیقات بسیاری از محققان چون سعادتمنش و ملک در سال 1998 و کالینز و میشل در سال 1987 براساس این روش می باشد در این تئوری فرض بر این بوده که زاویه ترک خوردگی بتن متغیر بوده و چسبندگی کامل بین

<sup>1</sup>-Modified Compression Field Theory

<sup>2</sup>-Laminate Theory

<sup>3</sup>-Modified Shear Friction Theory

ورقه FRP و بتن بر قرار بوده و تئوری لایه 2 برای انتقال سختی ورقه از محورهای محلی FRP به محورهای اصلی در راستای زاویه ترک خوردگی بتن بکار برده شده است و فرض بر این بوده است که ماکزیمم برش در طول زاویه ترک خوردگی بوده و نقش آنها در ضرایب انتقال برش و در گیر بودن دانه بندی بتن در برش لجاظ شده است .

#### 3-4. تئوری اصطکاک برشی اصلاح شده 3 (MSFT)

به عنوان یک روش ساده شده برای طراحی در سال 1998 برای نخستین بار توسط Loov در آیین نامه طراحی بتن کانادا بکار برده شد . روابط بر مبنای این تئوری به شرح زیر هستند

$$V_c = 0.25k^2 f'_c b_w h \tan \theta_c \quad (13)$$

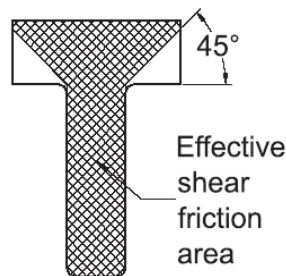
عرض تیر  $b_w$  ارتفاع مقطع و  $h$

$K$  یک ضریب تجربی است و بر مبنای تحقیق Loov and Peng در سال 1998 از رابطه زیر بدست می آید

$$k = 2.1(f'_c)^{-0.4} \quad (14)$$

مقاومت بتن بین 20 MPa to 100 MPa می باشد . بر اساس تحقیق Tozer and Loov در سال 1999 مشاهده شده است که سطح مقطع  $b_w h$  برای تیرهای T و I شکل محافظه کارانه است. بنابراین آنها رابطه زیر را با سطح مقطع مرثر نشان داده در شکل (2) ارائه دادند .

$$V_c = 0.25k^2 f'_c (A_{ef} \tan \theta_{cf} + A_{cw} \tan \theta_{cw}) \quad (15)$$



شکل 2 ناحیه مؤثر انتقال برش به صورت اصطکاک [2]

$$V_s = A_v f_{vy} n_s \quad (16)$$

بر اساس تئوری اصطکاک برشی ، برقراری همسازی کرنشها الزامی نیست

$$f_{FRP} = E_{FRP} \varepsilon_{\max} R_L \quad (17)$$

Alexander  $\varepsilon_{\max}$  و  $R_L$  به وسیله مدل نواری<sup>13</sup> ارائه شده توسط Alexander and Cheng در سال 1997 بدست می آیند .  $\varepsilon_{\max}$  در اصل ماکزیمم کرنش موجود در یک باریکه FRP و نسبت  $R_L$  همان نسبت عرض باقیمانده چسبندگی نوار به عرض جان بتن ترک خورده است . در این روش فرض بر این است که نیرو بصورت خطی بین نوارهای FRP تقسیم می شود و از بین تمامی مسیرهای ترک خوردگی با لقوه و ممکن ، مسیری انتخاب می گردد که کمترین ظرفیت برشی تیر حاصل شود .

**4- نتیجه گیری :**

1- به طور کلی مقادیر بدست آمده از روشهای مختلف برای تعیین ظرفیت برشی مقطع تقویت شده با ورقه FRP چون شبیه سازی خرپایی ، مدل چسبندگی ، تئوری میدان فشاری اصلاح شده (به غیر از تئوری اصطکاک برشی ) محافظه کارانه بوده و نسبت مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی به روابط تئوری بیشتر از 1 بوده و با نتایج آزمایشگاهی 20% اختلاف داشته و از کران پایینی تبعیت می کند

2- روش اصطکاک برشی اصلاح شده که از کران بالایی تبعیت می کند چون تشخیص دقیق مسیر ترک خوردگی که ظرفیت برشی مینیمم به کمک آن حاصل شود ، مشکل بوده و احتمال 10% اختلاف با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد ولی از آنجایی که نتایج این روش به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بوده مبنای بسیاری از آیین نامه های جدید بتن و از جمله آیین نامه کانا دا در تعیین ظرفیت برشی است .

**5- مراجع :**

- [1] - Khaldoun N. Rahal- "Background to the general method of shear design in the 1994 CSA-A23.2 standard" - Kuwait University and Micheal P.Collins University Canada Journal of Civil Engineering (NRC Research) July 1999
- [2] – Christophe Deniaud and J.J.Roger Cheng -" Review of shear design methods for reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer sheets " - University of Alberta, Edmonton - Canada Journal of Civil Engineering August 2001 (NRC) National Research Council Canada

[3] ایمان الیاسیان - پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشگاه یزد بهار 1384 - " بررسی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به روش اجزای محدود وبه صورت پارامتریک "

<sup>1</sup>- Strip model

## بررسی راهکارهای بهسازی سازه ای پلها با الیاف FRP

حسین میسمی، دکترای عمران، [H-mesam@yahoo.com](mailto:H-mesam@yahoo.com)  
ایمان الیاسیان، دانشجوی دکترای عمران سازه  
[i.elyasian@gmail.com](mailto:i.elyasian@gmail.com)

### چکیده :

سازه های بتن مسلح مدت هاست که در صنعت ساخت و ساز پلها و روگذرها مورد استفاده بوده است و عنصر محوری در مسلح سازی این سازه ها، فولاد می باشد. اگرچه فولاد مزایا و قابلیت های زیادی در مهندسی پل دارد و نقش بسیار قابل توجهی دارد، اما دارای اشکالاتی از جمله وزن سنگین و مقاومت کم در برابر شرایط نامساعد محیطی، دما، رطوبت و خوردگی می باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی مواد جایگزینی به نام FRP ساخته شده است که ضمن دارا بودن مشخصات مقاومتی بسیار خوب و آسانی کاربرد در اجرای سازه های روگذر، در مقابل خوردگی و آسیب های محیطی در مجاورت اسکله ها و پلهای آبی و تونلهای عبور آب و مدفون نیز بسیار مقاوم می باشد.

در حال حاضر، استفاده از FRP در بسیاری از کشورهای جهان مرسوم گشته است و همچنان این فناوری در حال توسعه و پیشرفت می باشد. در کشور ما نیز، استفاده از این مصالح جایگزین خصوصا در سازه های آبی از جمله پل ها و روگذرها و نیز در ترمیم و بهسازی سازه پلها و پایه ها و حتی عرشه پل بسیار ضروری به نظر می رسد که در اینجا بررسی و تحقیق مفید و جامعی در باره استفاده از FRP به عنوان مکمل و حتی جایگزین فولاد در سازه های بتنی پلها صورت گرفته و مزایا و معایب آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** FRP ، بهسازی، مقاوم سازی، پایه پل، راهکار بهسازی، تعمیرات پیشگیرانه

### 1- مقدمه :

پل ها به واسطه آن که یکی از عناصر مهم در شریان های حیاتی هستند، باید به گونه ای طراحی شوند که در مدت زلزله و بعد از آن هم بتواند عملکرد خود را داشته باشد. بنابراین دست یابی به روش یا روش هایی جهت بهسازی لرزه ای پل هایی که در برابر زلزله به اندازه کافی مقاوم نیستند می تواند بسیار مهم باشد. ستون های بتنی پل ها و سازه های روگذر و زیر گذر، در محل اتصال خود به فونداسیون در برابر زلزله بسیار آسیب پذیر هستند. با وجود بهسازی بدنه ستونهای پل همواره این قسمت از پلها، محلی برای تمرکز آسیب دیدگی می باشد. لذا باید ضمن دست یابی به روشی کاربردی جهت مقاوم سازی ستون ها، کاهش و یا رفع آسیب دیدگی در پای ستون های بتنی پلها در برابر زلزله مد نظر قرار گیرد. در این مقاله ضمن بررسی انواع روش های مقاوم سازی موجود در جهان به مقایسه چند نمونه از این روش ها پرداخته می شود. که علاوه بر تعیین مناسبترین روش بهسازی لرزه ای به تشریح نقش FRP و کارکردهای بسیار گسترده آن و همچنین عملکرد کفشک

بتنی جهت بهبود رفتار لرزه ای ستون های بتنی پلها و زیرگذرها و روگذرها پرداخته می شود.

## 2- علل خرابی پل ها :

علل اصلی خرابی بسیاری از پلها قبل از پایان عمرشان، عدم توجه به معیارهای طراحی، و اجرا و نگهداری از آنهاست. تعمیرات پیشگیرانه می تواند تا حد بسیار زیادی به ادامه باربری و خدمات رسانی پلها کمک نماید که FRP می تواند نقش بسیار مهمی در ترمیم نقاط مشکل دار پیدا شده در حین بازرسی داشته باشد.

## 3- بکارگیری FRP در مقاوم سازی سازه ای پل:

سازه های بتن مسلح مدت هاست که در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده بوده است و عنصر محوری در مسلح سازی این سازه ها، فولاد می باشد. اگرچه فولاد مزایا و قابلیت های مهندسی بسیار قابل توجهی دارد، اما دارای اشکالاتی از جمله وزن سنگین و مقاومت کم در برابر شرایط نامساعد محیطی، دما، رطوبت و خوردگی می باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی مواد جایگزینی به نام FRP ساخته شده است که ضمن دارا بودن مشخصات مقاومتی بسیار خوب و آسانی کاربرد، در مقابل خوردگی و آسیب های محیطی نیز بسیار مقاوم می باشد.

در حال حاضر، استفاده از FRP در بسیاری از کشورهای جهان مرسوم گشته است و همچنان این فناوری در حال توسعه و پیشرفت می باشد. در کشور ما نیز، استفاده از این مصالح جایگزین خصوصاً در سازه های آبی و نیز در ترمیم و بهسازی سازه ها بسیار ضروری به نظر می رسد. استفاده از FRP به عنوان جایگزین فولاد در سازه های بتنی مزایا و معایب بسیاری دارد که باید بیشتر از آنچه تاکنون پرداخته شده است مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به قابلیت ها و ویژگی های محصولات FRP و نتایجی که طی چند سال آزمایشات و تلاش های بسیار محققین حاصل گشته است، می توان دریافت که این محصولات می توانند جایگزین بسیار مناسبی برای فولاد باشند. این مطلب از دو منظر قابل توجه و حائز اهمیت می باشد که یکی بکارگیری این محصولات در ساخت سازه ها و دیگری استفاده از آنها جهت بهسازی و مقاوم سازی و ترمیم سازه ها و ابنیه موجود می باشد.

از آنجا که یکی از ویژگی های مهم و مفید محصولات FRP مقاومت آنها در برابر خوردگی می باشد، استفاده از این محصولات در سازه های دریایی در نواحی آبی جنوب کشور که خوردگی یکی از معضلات عمده آنها می باشد، همچنین بکارگیری این محصولات در سازه ها در شهرهای بزرگ و صنعتی که آلودگی بالای آنها در هنگام بارندگی می تواند منجر به تولید باران اسیدی گردد، می تواند تا حد زیادی مشکلات موجود را برطرف نماید.

## 4- خصوصیات FRP :

- وزن مخصوص ( *specific gravity* ) : آرماتورها و تاندون های FRP دارای چگالی بین  $1/5$  تا  $2$   $g/cm^3$  می باشند که تقریباً 4 برابر سبک تر از فولاد هستند. وزن کم آنها موجب کاهش هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی و کاهش زمان جابجایی و نصب، در محل در مقایسه با آرماتورهای فولادی می گردد.

این مزیتی است که باید در هر تحلیل برای انتخاب محصول بدان توجه شود.

- انبساط حرارتی: خود بتن مسلح خود یک ماده مرکب است که در آن آرماتورها نقش ابزار تقویتی را داشته و بتن به عنوان خمیر عمل می‌کند. بنابراین ضروری است که رفتار دو ماده تحت تنش‌های حرارتی مشابه باشد تا تغییر شکل‌های ناهمگون بتن و آرماتورها به تا حداقل برسد. بسته به خواص مخلوط ضریب خطی انبساط حرارتی برای بتن از  $6 \times 10^{-6}$  تا  $11 \times 10^{-6}$  بر  $^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند. در جدول 1 ضرایب انبساط حرارتی برای محصولات معمولی FRP فهرست شده است.

جدول 1- مقایسه خواص مکانیکی (در راستای طولی)

	Steel reinforcing bar	Steel tendon	GFRP bar	GFRP tendon	CFRP tendon	AFRP tendon
Strength, MPa	483-690 70-100	1379-1862 200-270	517-1207 75-175	1379-1724 200-250	165-2410 240-350	1200-2068 170-300
Strength, MPa	276-414 40-60	1034-1396 150-203	Not applicable			
Elastic modulus, (ksi)	200 29,000	186-200 27,000-29,000	41-55 6000-8000	48-62 7000-9000	152-165 22,000-24,000	50-74 70,000-11,000
Elongation,	> 0.10	> 0.04	0.035-0.05	0.03-0.045	0.01-0.015	0.02-0.026
Stressive, MPa (ksi)	276-414 40-60	N/A	310-482 45-70	N/A	N/A	N/A
Percent of expansion ( $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ )	11.7 6.5	11.7 6.5	9.9 5.5	9.9 5.5	0.0 0.0	-1.0 -0.5
Specific gravity	7.9	7.9	1.5-2.0	2.4	1.5-1.6	1.25

- مقاومت کششی: میله‌ها و تاندون‌های FRP بدون نمایش نقطه تسلیم، به مقاومت کششی نهایی خود می‌رسند. مقایسه‌ای از خواص میله‌های FRP و فولادی و تاندون‌ها در جدول 1-3 نشان داده شده است. خواص مکانیکی FRP که در اینجا آورده شده در راستای طولی (یعنی راستای مقاوم آن) اندازه‌گیری شده است. مقادیر ارائه شده، برخی محصولات رایج موجود را پوشش می‌دهند. برخلاف فولاد، مقاومت کششی میله‌های FRP تابعی از قطر میله است. این بدین معنی است که به علت جهش در برش، الیاف واقع در مرکز مقطع میله تنشی به اندازه الیاف واقع در نزدیکی سطح خارجی میله را تحمل نمی‌کنند. این پدیده منجر به کاهش مقاومت و بازده در میله‌های با قطر بیشتر می‌گردد.

برای مثال برای GFRP تولید شده در ایالات متحده، مقاومت کششی از حدود 480Mpa برای میله با قطر  $28/7\text{mm}$  تا 890Mpa برای میله با قطر  $9/5\text{mm}$  متغیر می‌باشد.

برخی تاندون‌های FRP از طریق تابیدن 7 میله (S-2 GFRP Glass) یا CFRP با قطر  $3\text{mm}$  تا  $4\text{mm}$  ساخته می‌شوند. مقاومت نهایی این تاندون‌ها قابل مقایسه با رشته‌های پیش‌تنیده فولادی می‌باشد. برای تاندون‌های GFRP مقاومت نهایی از 1380 MPa تا 1724MPa متغیر می‌باشد، در حالیکه برای تاندون‌های CFRP این مقدار بین 1862 MPa تا 2070MPa متغیر می‌باشد.

- ضریب ارتجاعی کششی: چنانکه در جدول 1 ذکر شده است ضریب ارتجاعی طولی میله‌های GFRP تقریباً 25 درصد فولاد است. این ضریب برای تاندون‌های CFRP که اغلب دارای الیاف محکم تری هستند از میله‌های GFRP بیشتر می‌باشد.

- مقاومت فشاری: میله‌های FRP در فشار، ضعیف‌تر از کشش هستند و این به دلیل مشکلات آزمایش دقیق کمپوزیت‌های یک‌جهته در فشار می‌باشد و نیز مربوط به روش‌های نگه داشتن و تنظیم قطعه و نیز



اثرات پایداری الیاف می باشد. با وجود این، مقاومت فشاری کمپوزیت های FRP برای اغلب کارها، نگرانی اول به شمار نمی رود. مقاومت فشاری به صاف یا دندانه دار (آجدار) بودن میله نیز بستگی دارد. مقاومت فشاری در محدوده 317 MPa تا 470 MPa برای میله های GFRP که دارای مقاومت کششی حدود 552 MPa تا 896 MPa بوده اند، گزارش شده است. مقاومت های فشاری بالاتر برای میله های با مقاومت کششی بالاتر مورد انتظار می باشد.

- ضریب ارتجاعی فشاری: برخلاف سختی کششی، سختی فشاری میله های FRP با اندازه، نوع، کنترل کیفیت ساخت و نسبت طول به قطر نمونه ها تغییر می کند. ضریب ارتجاعی فشاری میله های FRP کوچکتر از ضریب ارتجاعی کششی آنها می باشد. براساس آزمایشات نمونه های شامل 55 تا 60 درصد حجمی الیاف پیوسته E-Glass با خمیر وینیل استر شامل رزین ایزوفتالیک، ضریبی به اندازه 34 GPa تا 48GPa بدست آمده است.

- مقاومت برشی: به طور کلی مقاومت برشی کمپوزیت ها بسیار کم است. برای مثال میله های FRP براحتی در راستای عمود بر راستای طولی با آره های معمولی بریده می شوند. این نقص در اغلب موارد می تواند از طریق جهت گیری میله های FRP به گونه ای که بارهای اعمالی به صورت کششی محوری ظاهر شوند، برطرف گردد. آزمایشات برش با استفاده از یک روش آزمایش Isoipescu با مقیاس کامل صورت گرفته است (Porter et al.1993). این روش آزمایش برش با موفقیت برای بدست آوردن خواص برشی میله های FRP بر روی بیش از 200 نمونه انجام شده است. - خزش و شکست خزشی: الیافی مانند کربن و شیشه مقاومت بسیار خوبی نسبت به خزش دارند در حالیکه این مطلب برای رزین ها صدق نمی کند. بنابراین جهت گیری و حجم الیاف تاثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد خزشی میله ها و تاندون های مسلح سازی خواهند داشت. گزارشات یک مطالعه بر روی میله های GFRP با کیفیت بالا نشان می دهد که کرنش اضافی ایجاد شده توسط خزش، در حدود 3 درصد کرنش الاستیک اولیه می باشد.

در بارگذاری تحت شرایط نامطلوب محیطی، میله ها و تاندون های FRP که در معرض بار ثابت قرار دارند، ممکن است پس از مدت زمانی که «زمان تحمل» نامیده می شود ناگهان گسیخته شوند. این پدیده که شکست خزشی نام دارد، برای کلیه مصالح ساختمانی از جمله فولاد نیز صادق می باشد. اما برای میله های پیش تنیده فولادی این پدیده چندان مهم نمی باشد. فولاد می تواند بارهای کششی معمول را که در حدود 75 درصد مقاومت نهایی هستند تحمل نماید که البته نمی توان از عدم گسیختگی و کاهش مقاومت آن مطمئن بود. هنگامیکه نسبت تنش کششی تحملی به مقاومت کوتاه مدت FRP افزایش یابد زمان تحمل کاهش می یابد. آزمایشاتی در ارتباط با خزش در آلمان بر روی کمپوزیت های GFRP با سطح مقطع های مختلف انجام گرفت. این مطالعات نشان می دهد که اگر تنش تحملی، محدود به 60 درصد مقاومت کوتاه مدت باشد، شکست خزشی روی نمی دهد.

محدودیت فوق برای تنش ممکن است برای اکثر سازه های بتن مسلح اهمیت کمی داشته باشد چرا که تنش تحملی در آرماتورها، اغلب زیر 60 درصد می باشد. با این وجود در کاربردهای کمپوزیت های FRP به عنوان تاندون های پیش تنیده، این امر مستلزم توجه ویژه ای است. باید توجه داشت که فاکتورهای دیگری مانند رطوبت نیز

تأثیر نامطلوبی بر رفتار خزشی داشته و ممکن است منجر به زمان تحمل کمتر شوند.

بار تحملي کوتاه مدت (48 ساعت) و بلند مدت (1سال) متناظر با 50 درصد مقاومت نهایی به تاندون های CFRP و GFRP در دمای اتاق اعمال گردید. نمونه ها، خزش بسیار کمی از خود نشان دادند و مدول کششی و مقاومت نهایی پس از آزمایش تغییر قابل ملاحظه نکردند (Anigo1991 و Khubchandani).

- **خستگی:** میله های FRP مقاومت خستگی خوبی را نشان می دهند. اغلب تحقیقات در این زمینه بر روی الیاف با مدول بالا بوده است، (مثلاً آرامید و کربن) که در معرفی سیکل های بزرگ بارگذاری کششی - کششی در کاربردهای هوافضا، قرار گرفتند. در آزمایشاتی که بارگذاری در 10 میلیون سیکل، تکرار گردید، این نتیجه بدست آمد که کمپوزیت های کربن - اپوکسی دارای مقاومت خستگی بهتری نسبت به فولاد هستند. در حالیکه مقاومت خستگی کمپوزیت های الیاف شیشه در نسبت های تنش پایین، کمتر از فولاد می باشد (Schwarz1992). در تحقیق دیگری (Porter et al. 1993) نشان داده شد که میله های GFRP دارای مقاومت خستگی خوبی در برش در 10 میلیون سیکل تکرار می باشند. همچنین در یک بررسی دیگر، میله های GFRP که برای کارهای پیش تنیدگی ساخته شده بودند در معرض بارهای تکرار شونده دوره ای با تنش حداکثر 496MPa و محدوده تنش 345MPa قرار گرفتند. این میله ها توانستند 4 میلیون سیکل بارگذاری را پیش از گسیختگی در ناحیه ننگه داشته شده تحمل کنند. تاندون های CFRP مقاومت خستگی خوبی را از خود نشان دادند، و در مورد آزمایش خستگی کششی برای 2 میلیون سیکل تکرار نیز نتایج همین گونه بود. تنش متوسط در حدود 60 درصد مقاومت نهایی، با مقدار حداقل و حداکثر سطوح تنش برابر 55 و 64 درصد مقاومت نهایی بود. ضریب ارتجاعی تاندون ها پس از آزمایش خستگی تغییر نکرده بود.

- **فاکتورهای موثر بر خواص مکانیکی:** خواص مکانیکی کمپوزیت ها به عوامل بسیاری چون تاریخچه و مدت زمان بارگذاری، دما و رطوبت بستگی دارد. این عوامل به یکدیگر وابسته بوده و بنابراین تعیین تأثیر هر یک با ثابت نگه داشتن بقیه عوامل دشوار می باشد.

1- **رطوبت:** جذب بیش از حد آب در کمپوزیت ها می تواند موجب افت قابل ملاحظه مقاومت و سختی شود. جذب آب تغییراتی در خواص رزین ها ایجاد کرده و می تواند موجب تورم و تاب برداشتن کمپوزیت ها شود. بنابراین ضروری است که خواص مکانیکی مورد نیاز کمپوزیت ها تحت شرایط محیطی یکسان تعیین گردد. با این حال رزین هایی هستند که ترکیبات آنها طوری است که ضد رطوبت بوده و ممکن است در سازه ای که انتظار می رود در تمام زمان ها مرطوب باشد، استفاده شوند. در مناطق سردسیر، اثر سیکل های یخ زدن و ذوب شدن نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

2- **آتش و دما:** بسیاری از کمپوزیت ها دارای خواص خوب و گاهی عالی در دماهای بالا هستند. اغلب کمپوزیت ها براحتی آتش نمی گیرند. اثر دمایی بالا بر روی رزین ها بیشتر از الیاف است. رزین ها دارای مقادیر زیادی کربن و هیدروژن هستند که قابل اشتعال اند و تحقیقات بر روی توسعه رزین های مقاوم به آتش در حال انجام می باشد. آزمایشاتی که در آلمان صورت گرفته نشان داده

است که میله های FRP از نوع E-Glass می توانند 85 درصد مقاومت خود در دمای اتاق را پس از نیم ساعت قرارگرفتن در معرض دمای 300 درجه سانتی گراد و تحت تنش 50 درصد حداکثر مقاومت کششی خود، تحمل نمایند. در عین حال که این رفتار، از عملکرد فولاد از پیش تنیده بهتر می باشد اما در دماهای بالاتر، کاهش مقاومت افزایش یافته و مقاومتی در حد فولاد حاصل می شود.

مسئله آتش برای اعضای بتنی مسلح با کمپوزیت های FRP با مسئله قرارگیری مستقیم مصالح در معرض آتش متفاوت می باشد. در این حالت بتن به عنوان حائلی برای حفاظت FRP از تماس مستقیم با شعله ها عمل می کند. اما چنانکه دما در داخل عضو افزایش یابد، خواص مکانیکی FRP ممکن است به میزان قابل ملاحظه ای تغییر نماید. بنابراین توصیه می شود که استفاده کنندگان، اطلاعاتی راجع به عملکرد نوع خاص FRP و رزین آن در دماهای بالاتر، درجایی که احتمال آتش سوزی بالاست، در اختیار داشته باشد.

3- *اشعه ماوراء بنفش*: کمپوزیت ها ممکن است از اشعه های ماوراء بنفش موجود در نور خورشید صدمه ببینند. این اشعه ها موجب واکنش های شیمیایی در یک خمیر پلیمری می شوند که می تواند منجر به تنزل خواص ماده گردد. اگرچه این مشکل می تواند از طریق اضافه کردن مواد افزودنی مناسب به رزین حل شود، اما این نوع آسیب، هنگامیکه اعضای FRP در مسلح سازی داخلی سازه های بتنی بکار می روند و در معرض اشعه مستقیم خورشید نیستند، چندان مهم نمی باشد.

4- *خوردگی*: آرماتورهای فولادی دچار خوردگی می شوند و افزایش حجم مواد آنها موجب ترک خوردگی و پوسته شدن بتن می شود که این امر موجب تسریع خرابی آن می گردد. یکی از مزایای مهم کمپوزیت ها این است که دچار خوردگی نمی شوند. اما باید توجه داشت که کمپوزیت ها در اثر قرارگیری در معرض محیط های خورنده ممکن است صدمه ببینند. در عین حال که میله های GFRP مقاومت بالایی در برابر اسیدها دارند، اما ممکن است در یک محیط قلیایی دچار آسیب شوند. در مطالعه ای که اخیراً بر روی کاربردهای بتن پیش تنیده صورت گرفته است، یک نوع خاص از رشته های FRP شیشه و اپوکسی موجود در داخل بتن، در معرض یک شبیه سازی آب شور جزر و مدی قرار گرفتند که منجر به جذب آب و کاهش مقاومت گردید. اگر چه این نتایج را نمی توان عمومیت داد، اما اهمیت انتخاب سیستم صحیح رزین - الیاف برای یک کاربرد خاص از روی این نتایج مشخص می شود. تاندون های FRP که از الیاف کربن ساخته شده اند به اغلب مواد شیمیایی مقاوم هستند. 5- *سالم خوردگی زودرس*: نیاز به حصول داده های هوازدگی بلند مدت در یک مدت محدود موجب پیدایش روشهای تحلیلی چون سالم خوردگی زودرس به منظور پیش بینی دوام سازه های کمپوزیتی در معرض محیطهای خشن با گذشت زمان، گردیده است. تحقیق انجام شده در Pilkington Bros (Porte et al.1982) نشان می دهد که پیش بینی های سالم خوردگی بلند مدت که در مدت زمانی کوتاه و در دماهای بالاتر صورت گرفته است، همبستگی خوبی را با سالم خوردگی ناشی از هوازدگی در طبیعت نشان می دهد. براساس این یافته ها، محققین دو رابطه برای سالم خوردگی زودرس کمپوزیت های FRP ارائه نموده اند. رابطه اول یک فاکتور تسریع براساس میانگین سالانه دمای یک اقلیم خاص را بدست می دهد. رابطه دوم رابطه ای بین دمای حمام آب و تعداد روزهای اضافه شده برای

سالخوردگی زودرس به ازای یک روز در حمام آب را نشان می‌دهد (Porter et al. 1992, Lorenz 1993). با استفاده از این دو رابطه، میخ‌پرچ‌های (dowel) مرکب از الیاف E-Glass قرارگرفته در رزین وینیل استر، در دمای بالای 60 C برای مدت 4 هفته، دچار سالخوردگی شدند. نمونه‌ها در حمام محلول آب‌آهک و نمک به منظور ایجاد سالخوردگی آزمایش شدند. یک دوره سالخوردگی زودرس به مدت 633 روز در دمای بالای 60 درجه سانتی‌گراد در این محلول‌ها، بدون خرابی قابل ملاحظه برای یک حمام آهک بکارگرفته شد. این سالخوردگی زودرس معادل تقریباً 50 سال بود.

### 5- انتخاب الیاف در مقاوم سازی پل:

- انتخاب نوع الیاف سیستم FRP براساس نیازمندی سازه می‌باشد:
- کیفیت سطح مورد پوشش
- درجه ایجاد مقاومت
- افزایش شکل‌پذیری

### 6- تقویت سازه در مقابل زلزله با استفاده از صفحات FRP :

FRP تار الیافی است که در حدود 90% پود نوار می‌باشد و برای تقویت دورپیچی سازه‌ها در مقابل زلزله تولید گردیده است. در چند مورد توسط تست‌های مختلف در پروژه‌های اجرایی شده توسط تست‌های push pull مشخص شده است که شکل‌پذیری سازه پل از جمله عرشه و پایه افزایش پیدا کرده است.



### تقویت المانهای باربر با استفاده از صفحات FRP :

صفحات FRP بمنظور بهبود مقاومت فشاری ستونها مورد استفاده قرار می‌گیرد. لمینیت‌های CFK قابلیت تحمل لنگر خمشی ناشی از بارهای وارده به ستونها را دارا می‌باشند. در صورت استفاده از سیستم FRP مشکلی از نظر نفوذ پذیری بخار آب بوجود نمی‌آورد.



### تقویت مقاومت خمشی با استفاده از سیستم FRP

تقویت مقاومت کششی و خمشی بوسیله استفاده از لمینیت‌های پیش ساخته CFK انجام می‌گردد.



#### 7- تقویت مقاومت برشی خارجی با استفاده از FRP :

تقویت مقاومت برشی خارجی بوسیله استفاده از لمینیت های پیش ساخته CFK انجام میگردد. بوسیله برنامه تولید شده بصورت اتوماتیک مقاومت های برشی خارجی و مهاری محاسبه گردیده است.

#### 8- صفحات FRP در مقاوم سازی پلها :

با توجه به قابلیت ها و ویژگی های محصولات FRP و نتایج که طی چند سال آزمایشات و تلاش های بسیار محققین حاصل گشته است، می توان دریافت که این محصول می تواند مکمل و حتی جایگزین بسیار مناسبی برای فولاد باشند. این مطلب از دو منظر قابل توجه و حائز اهمیت می باشد که یکی بکارگیری این محصولات در ساخت سازه ها و دیگری استفاده از آنها جهت بهسازی و مقاوم سازی و ترمیم سازه ها و ابنیه موجود می باشد.

رویکرد اخیر بحثی جدید و مطرح در مجامع علمی در دنیا بوده و ضرورت و اهمیت آن در بسیاری زمینه ها به وضوح احساس می گردد و پروژه های تحقیقاتی بسیاری نیز در این زمینه در حال انجام می باشد. در کشور ما نیز بحث مقاوم سازی و بهسازی اخیراً مورد توجه اساتید و پژوهشگران قرار گرفته و فعالیتها و اقداماتی در این زمینه آغاز گشته است. از جمله موضوعات مهم در این زمینه می توان به مقاوم سازی لرزه ای خطوط گاز و نفت، بهسازی سازه های آبی، مقاوم سازی سازه ها و ابنیه روستایی، بهسازی آثار تاریخی و غیره اشاره نمود.

نکته قابل توجه دیگر آن است که از آنجا که یکی از ویژگی های مهم و مفید محصولات FRP مقاومت آنها در برابر خوردگی می باشد، استفاده از این محصولات در سازه های دریایی در نواحی آبی جنوب کشور که خوردگی یکی از معضلات عمده آنها می باشد، همچنین بکارگیری این محصولات در سازه ها در شهرهای بزرگ و صنعتی که آلودگی بالای آنها در هنگام بارندگی می تواند منجر به تولید باران اسیدی گردد، می تواند تا حد زیادی مشکلات موجود را برطرف نماید. امید است با فعالیت هر چه بیشتر پژوهشگران و توجه و عنایت کارشناسان و مسئولین به این موضوع جدید و خطیر، شاهد پیشرفت هر چه بیشتر کشور عزیزمان در این زمینه باشیم.

#### 9- اثر کفشک های بتنی غیر مسلح در پای ستون های پل:

در طی انجام این سری از آزمایشات به اثر بسیار مناسب کفشک بتنی مسلح و غیر مسلح بر روی رفتار لرزه ای ستون ها پی برده شده است و یکی از معضلات بسیار اساسی که غالباً برای ستون های بتنی پلهای متکی به پی پل ها، به واسطه وجود نیروی برشی کم، به همراه خمش سیکلی و نیروی محوری رخ میدهد را، این کفشکها می تواند برطرف نماید. این کفشکها مانند یک فیوز علاوه بر

ایجاد محدودیت چرخش مفاصل با خورد شدن خود به جذب انرژی زلزله و س‌یلاب یا هر بار دینامیکی دیگر می‌پردازند. لذا چنانچه مقاوم سازی در داخل کفشک بتنی ادامه داشته باشد و یا، پس از مقاوم سازی ستون، با استفاده از کفشک بتنی محل اتصال ستون به پی پلها تقویت گردد، می‌توان انهدام پای ستون را محدود کرد. با این کار ضمن کاهش چرخش مفاصل می‌توان از تغییر مکانهای جانبی بزرگ عرشه پل ممانعت بعمل آورد و حتی در مواردی آسیب دیدگی پای ستون را به کلی از بین برد. لازم به توضیح می‌باشد که کفشک بتنی به عنوان مقاوم سازی پی به کار نرفته است و گاهی غیر مسلح می‌باشد و صرفاً به عنوان فیوزی جهت کنترل آسیب دیدگی پای ستونها کاربرد دارد.

#### 10- نتایج:

- 1- پایه پلهای مقاوم سازی شده با زره پوش فولادی، دارای سطح زیر منحنی باربري بیشتری نسبت به سایر حالات می‌باشد، این افزایش به منزله رشد قابلیت جذب انرژی می‌باشد، در نتیجه، شکل پذیری پایه های پل افزایش پیدا می‌کند.
- 2- استفاده از FRP با وجود آنکه در کاهش میزان جابجایی و شتاب فوقانی پایه های پلها موثر است، اما به اندازه حالت استفاده از زره پوش فولادی نمی‌تواند در اتلاف انرژی موثر باشد.
- 3- استفاده از پدستال در مواردی که سازه در شرایط اولیه به کلی آسیب دیده باشد و پای ستون به مفصل تبدیل شده باشد بسیار موثر است.
- 4- در طراحی پلها عوامل هیدرولیکی بسیار زیاد و پیچیده ای در رابطه با اندرکنش سازه پل و رودخانه نظیر ظرفیت آبگذری، آبستگي و فرسایش پایداری بازه رودخانه و نیروهای موثر جریان بر پایه ها و تکیه گاهها وجود دارند.
- 5- طراحی پلها با در نظر گرفتن اصول هیدرولیکی که یکی از عوامل تعیین کننده می‌باشد، در بسیاری از موارد طراحی سازه ای پل را تحت الشعاع قرار داده و باعث تغییر سیستم باربري سازه پل می‌گردد.
- 6- در طراحی و ساخت پلها انتخاب جانمایی طول، ارتفاع، شکل تکیه گاهها و پایه ها و عمق شالوده بر اساس مطالعات هیدرولیک جریان و ریخت شناسی در بازه مورد نظر انجام می‌گردد.

#### 11- مراجع:

- 1- 1386، جلال، م.، نقش FRP در مقاوم سازی ابنیه آبی نظیر پلها، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی شهید عباسپور
- 2- 1385، وتر، م.ق.، گرمه ای، و.، بهسازی لرزه‌های ستونهای بتنی پلهای بزرگراه هابراساس مطالعات میز لرزان، بخش دوم -نتایج آزمایشها، مدلسازی عددی، مقایسه و نتیجه گیری، کنفرانس بین المللی مقاوم سازی لرزه ای
- 3- 1382، وتر، م.ق.، شیخی، ع.، بررسی رفتار لرزه ای ستونهای مقاوم سازی شده بتنی، پایان نامه کارشناسی ارشد
- 4- 1383، رهایی، ع.، ارزیابی عملکرد و روشهای مقاوم سازی سازه های بتنی، انتشارات فدک ایستاتیس

5- *Liquefaction Mitigation in Silty Soils Using Composite Stone Columns and Dynamic Compaction*, by Thevachandran Shenthnan, Rafeek G. Nashed, Sabanayagam Thevanayagam and Geoffrey R. Martin

- 6- *Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test*, J. DAVID ROGERS Department of Geological Sciences & Engineering, 125 McNutt Hall, University of Missouri–Rolla, Rolla, MO 65409-0230
- 7- *Vibro Replacement Soil Improvement Works for two LNG-Tanks at the Hazira Terminal, India*, keller company
- 8- *United Nations, 1997, Sustainable development of Water Resources in Asia and the Pacific: An overview.*
- 9- *Yevjevich, V., 1995, Effect of area time horizons in comprehensive and integrated water resources management, Water Science and Technology, Vol. 31(8), pp 19-25.*
- 10- *Herbertson, P.W. and E.L. Tate, 2001, Tools for water use and demand management in South Africa, World Meteorological Organization, Technical Reports in Hydrology and Water Resources, No. 73.*
- 11- *Sadegh Vaziri, M., Fouth, D.A, Dynamic behaviour of RC highway bridges under the combined effect of vertical and horizontal earthquake motions, J. Earthquake Eng. and Struc. Dyn Vol 29, 535-549, (1991)*
- 12- *George G. Penelis & Andreas J. Kappos., St Edmunds bury Press Limited. (1997)*
- 13- *Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.2, December (2001)*
- 14- *Adnan C. Masri and Subhash C. Goel. Seismic Design and Testing of RC Slab-Column Frame Strengthened by Steel Bracing. Earthquake Spectra. Vol 12. No4. November (1996)*
- 15- *Rayad S. Aboutaha, Michael D. Engelhardt, James O. Jirsa and Michael E. Kreger. Retrofit of Concrete Columns with Inadequate Lap Splices by the Use of Rectangular Steel Jackets, Earthquake Spectra. Vol 12. No4. November (1996)*
- 16- *Harries, K & Ricles, R & Pessiki, S & Sause, R & Walkup, Seismic Retrofit of Non –Ductile Reinforced Concrete Building Columns Using FRPC Jackets, 6NCEE, Seattle (1998)*
- 17- *George G. Penelis & Andreas J. Kappos., St Edmundsbury Press Limited (1997)*
- 18- *Priestley M & Calvi. G.M, Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons. Inc. (1996)*
- 19- *Kawashima Kazuhiko, Engineering Characterization of Ground Motion, Tokyo Institute of Technology, (2005)*

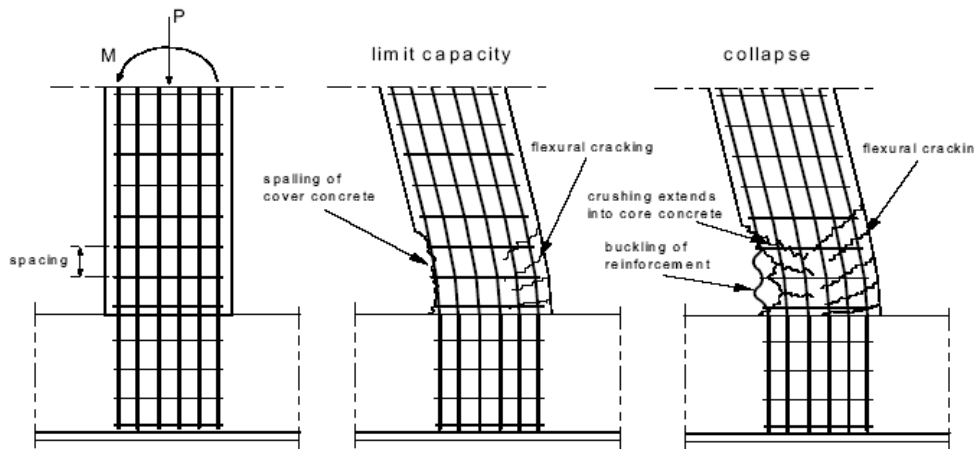
## زلزله و تقویت ستون بتن آرمه با FRP

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد سازه [iman.elyasian@gmail.com](mailto:iman.elyasian@gmail.com)

### 1 مقدمه

تقویت عناصر عمودی در بتن تقویت شده، هر ستون و یا بعضاً پل است، پیامدهای مختلف بسته به اینکه آیا اندازه گیری تقویت شده است را در یک ساختار مرسوم و یا در ساختار لرزه ای در منطقه انجام شده است. برای سازه های معمولی، هدف این است که معمولاً برای افزایش ظرفیت تحمل، و به همین دلیل اقدامات با هدف تقویت یا در گسترش منطقه مقطعی و یا در بالا بردن مقاومت فشاری بتن با استفاده از یک عمل محدود. این اقدامات معمولاً در ساختمان های که در آن بارهای زندگی می کنند که نتیجه به تغییر در افزایش استفاده کاربردی. در مورد بعضاً پل، که معمولاً می تواند بر روی سطح ایمنی مناسب با توجه به بارهای عمودی تکیه می کنند، محدود اقدامات در موارد اعمال زمانی که بتن به شدت آسیب دیده و یا در صورتی که توسط افزایش بار زندگی می کنند (به عنوان مثال، احداث خط سوم، و غیره مورد نیاز).

در سازه های ساخته شده در مناطق لرزه با توجه به کدهای منسوخ ، ظرفیت خمشی به طور کلی مناسب ، به عنوان نتیجه فرضیات طراحی محافظه کار ذاتی در روش طراحی الاستیک. مشخص شده است که کدهای منسوخ بر روی جنبه های قدرت متمرکز در حالی که تنها مرجع ساخت ضمنی به مفهوم از تورق و ظرفیت اتلاف ، و ، که مهم تر است ، داده نشد مقررات برای اطمینان از ثبات از پاسخ در محدوده پس از الاستیک. تورق ملک برای قادر بودن به از طریق چرخه های چند تا از جابه جایی بسیار بزرگتر از جابه جایی عملکرد کج و معوج ، بدون تخریب قدرت مهم است. تورق جابجایی را تا ارتفاع 6-8 م گاهی اوقات نیاز است. سازه های موجود ساخته شده است با توجه به منسوخ کد به عنوان پروژه یا از نقاشی های اصلی و یا از طریق بازرسی های درجا پس از حوادث مخرب ارزیابی لرزه ای -- سیستماتیک نشان تشویقها ناکافی عرضی و در نتیجه عدم وجود سلول های لازم برای حصول اطمینان از پاسخ انعطاف پذیر. در شکل 1 مکانیسم فروپاشی لترال از ستون با تقویت ناکافی مقاطع نشان داده شده است.



شکل 1. جانی مکانیسم فروپاشی ستون زیر طراحی شده است.

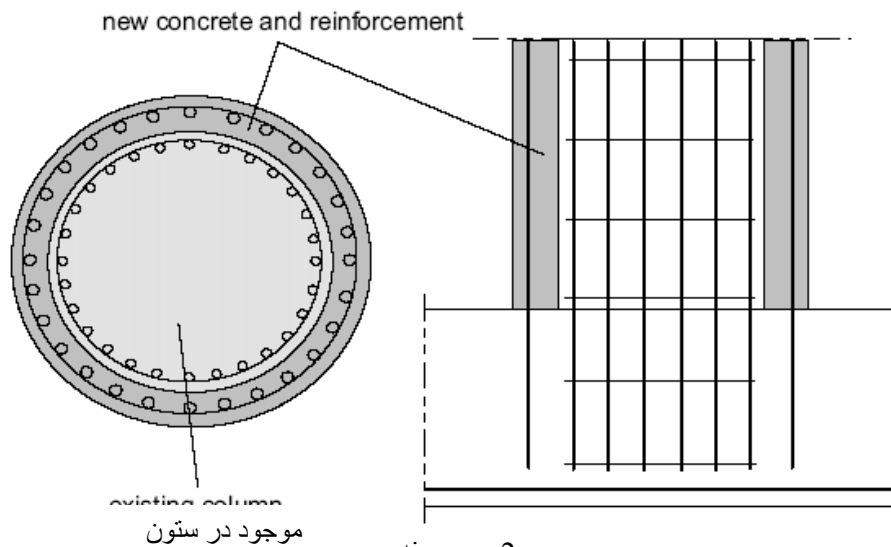
در تورق جابه جایی 2 - 3 ، **spalling** بتن پوشش رخ می دهد در مناطق پلاستیکی لولا ، که در آن تغییر شکل غیر قابل انعطاف تمرکز کنید. مگر در مواردی که بتن هسته به خوبی توسط **hoops** نزدیک فاصله عرضی یا مارپیچ به حرکت در محدود ، خرد کردن به گسترش هسته ای ، تقویت **buckles** طولی ، و قدرت تخریب سریع شرح زیر است. این رفتار حتی می توانید سرعت خواهد بود که تقویت عرضی است که در بتن پوشش **lapped** ، عنوان شده است که اغلب در مورد ساختارهای قدیمی است. **hoops** سپس اثر شل در نقاط شلپ شلپ کردن ، زمانی که **spalls** بتن می باشد. تکنیک مقاوم سازی ستون ها به طور معمول متداول در افزایش انعطاف در دسترس است با افزایش فعالیت در سلول های پلاستیکی لولا بالقوه منطقه هدف. با این حال ، افزایش استحکام خمشی را می توان در مناطق دامان - **spliced** و یا وقتی که به دنبال تقویت طولی است ختم زودرس. این در حال حاضر شناخته شده است که از سلول های بتنی افزایش قدرت و انعطاف آن است. بنابراین ، سلول بهبود خواهد توانایی از یک ستون به مقاومت در برابر چرخه مکرر بارگذاری فراتر از حد الاستیک و افزایش تمایل به جلوگیری از شکست ستون به علت تخریب ظرفیت خمشی. **Debonding** از طولی تقویت دامان - **splices** و تشکیل لولا پلاستیکی در مناطق ختم تقویت طولی همچنین می تواند سلول های مناسب قابل پیشگیری است. در صورت لزوم ، روش های مقاوم سازی گاهی اوقات در افزایش استحکام خمشی کارگردانی. این روش مقاوم سازی باید با دقت مورد استفاده قرار گیرد : افزایش ظرفیت خمشی خواهد نیروهای منتقل پایه و رونا / اتصالات ستون ، افزایش و نیز در نیروی برشی ستون نتیجه افزایش. از آنجا که از شکست و یا بنیاد شکننده شکست برشی ستون معمولاً انتقادی بیشتر از خمشی بیش از حد ارزشهای پربازده ، این روش تنها باید از دست دادن زمانی که از نتایج استحکام خمشی در مکانیسم فروپاشی استفاده می شود ، و نه



بدون احتیاط گرفته شده است. بتن و فولاد jacketing داشته اند استفاده گسترده و در عمل به اثبات رسانده اند به اقدامات مؤثر برای مقاوم سازی ستون های موجود است. با این حال ، جامعه مهندسين به تازگی برای جایگزین ، نگاه با هدف سهولت بهبود حمل و نقل و ساخت و ساز و به منظور کاهش هزینه نگهداری به علت خوردگی فولاد است. مواد پیشرفته کامپوزیت FRP در حال حاضر به رسمیت شناخته شده برای نشان دادن یک جایگزین مؤثر روش مقاوم سازی برای ستون. در سال گذشته ، در کالیفرنیا ، ایالات متحده آمریکا ، بیش از 500 پل شده اند بعضاً با مواد پیشرفته کامپوزیت پیچیده (Seible و همکاران 1995 ، شیائو و همکاران 1995). برنامه های مشابه در حال حاضر در راه است در ژاپن (Hoshikuma و Unjoh 1997 ، JSCE 1995). در اروپا ، که در آن منافع قابل توجه وجود دارد (ضرب 2001) ، موضوع هنوز در مرحله interlocutory ، عمدتاً به دلیل از عدم وجود قوانین تثبیت شده و قابل قبول طراحی ، که کم کردن سرعت فرآیند ترویج FRP به عنوان مصالح ساختمانی 'رسمی'. در بخش های زیر را ، بررسی مختصری از فناوری های موجود برای تقویت ستون ارائه شده است.

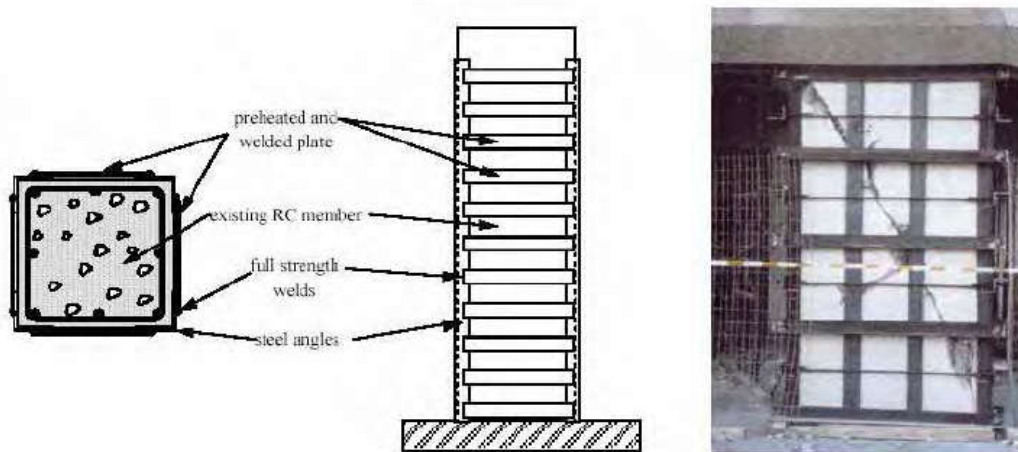
### 1.1 بتن JACKETING

ژاکت بتن متشکل از یک لایه نسبتاً ضخیم از بازیگران بتن مسلح در اطراف ستون. گسترده طولی و عرضی تقویت در لایه جدید اضافه شده از بتن ، بهبود استحکام خمشی و تورق. در مرحله اول ، بتن پوشش برداشته به افشای اصلی تقویت میله های زندان. علاوه بر این ، chipping دور پوشش بتنی عضو اصلی و roughening سطح آن می تواند پیوند بین بتن قدیم و جدید را بهبود بخشد. لینک های فولاد به شکل زیر هستند و سپس به میله های زندان در معرض جوش داده شده ؛ فولاد weldable ترجیح داده شده است برای جلوگیری از تردی. میله اضافی هستند و سپس به لینک زیر شکل جوش داده شده به شکل تقویت طولی. Stirrups ها اضافه می شوند در صورت لزوم و بتن است بعد از نصب قالب الوار ریخت. این یکی از شایع ترین روش استفاده از تعمیر و تقویت اعضای بتن است. به غیر از جوش ، آن را نشانی از دانش تخصصی نیاز ندارد. ما: بتن های جدید و تقویت constructabili است. این اصل ساده شده است در آزمون ها در نیوز ضعیف است و مشکلات آن را ناشی aesthetic jacketing بتن شده است که معمولاً در ژاپن ، مورد استفاده بیشتر برای بالا بردن استحکام.



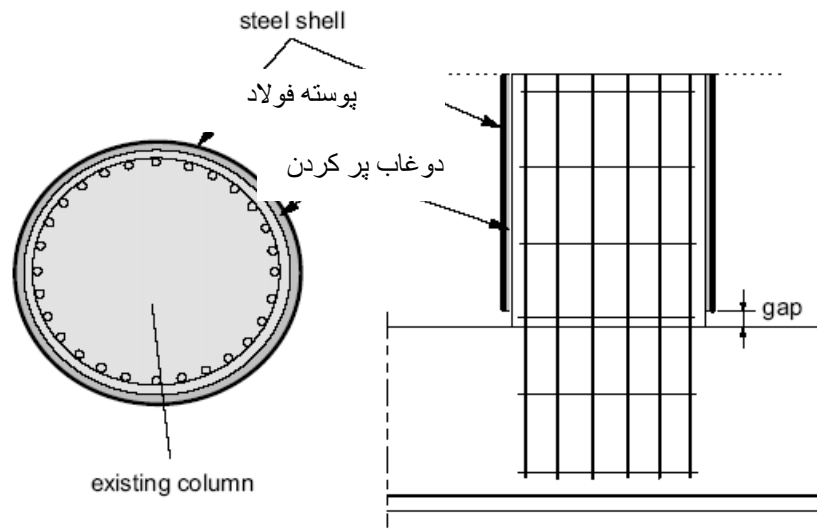
شکل 2. بتن jacketing  
1.2 فولاد (ENCASING و CAGING) JACKETING

به طور کلی ، روش های که در آن یا فولاد چسبندگی صفحه یا جوشکاری فولاد در بتن آرمه است درگیر هستند سریع و موثر است. به طور خاص ، با توجه به انتخاب عناصر قفس فولاد مقطع ، همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است ، از نقطه نظر عملی از این دیدگاه ، آن است که یک نرم افزار مقرون به صرفه از نور مقطع بدون کاهش اثر بخشی این روش ، تا آنجا به عنوان درجه *pre tensioning* رضایت بخش از عناصر عرضی اعمال می شود. سادگی و سرعت از روش نرم افزار را ارائه راه حل برای زمان مداخله بحرانی بلافاصله پس از زلزله قوی ، به ویژه برای ساختمان های خاص مانند بیمارستان ها و مدارس. قفس های فولادی خارجی به چه صورت از مقاطع طولی و زاویه نوار فولاد عرضی ساخته شده است. در عمل ، اغلب نوار جانبی یا با آچار مخصوص و یا پیش گرمایش درجه حرارت به حدود 200-400 درجه سانتی گراد تاکید کرد ، قبل از جوشکاری. هر فاصله ای که بین قفس های فولادی و بتنی موجود معمولا با عدم کاهش خمپاره پر شده است. هنگامی که لازم است برای حفاظت در برابر خوردگی و یا آتش سوزی به قفس ، پوشش با بتن یا *shotcrete* می تواند ارائه شود.



شکل 3. jacketing فلزی (caging) از بخش ستون مربع است.

وقتی تقویت ستون مدور ، روش های جایگزین شامل محفظه مجموع ستون با فولاد نازک صفحات در فاصله ی اندکی از سطح ستون ، قرار داده شده با فاصله متعاقب آن که با کوچک شدن غیر *grouts* (شکل 4) پر شده است. ژاکت فولادی معمولا از دو نیم پوسته از جنس فولاد قرار داده شده در اطراف ستون تشکیل شده ، با اجازه از حدود 10-25 میلی متر ، پس از قرار دادن و با هم جوش داده شده. شکاف میان ژاکت و ستون با دوغاب سیمان خالص پر شده است. فضا در حدود 50 میلیمتر بین ژاکت و عضو پیوستن ، یا جای پای چپ برای جلوگیری از احتمال اقدام مستقیم حمل بار از کت در زاویه رانش بزرگ ، که می تواند باعث کمانش محلی در ژاکت. ژاکت فراهم می کند عمل سلول غیر فعال است. جانبی محصور فشار در بتن ناشی از آن را به عنوان گشاد جانبی تحت سطوح بالا فشار محوری در منطقه فشرده سازی از ستون ، به علت به قدرت حلقه و خشکی ژاکت. همچنین در منطقه تنش ژاکت موثر است ، به علت گشاد اسپلایس ناشی از ترک های عمودی ، و باقی مانده اتساع جانبی از چرخه بار قبلی. ژاکت می توان به عنوان معادل مداوم هوپ - تقویت نظر گرفته شود.



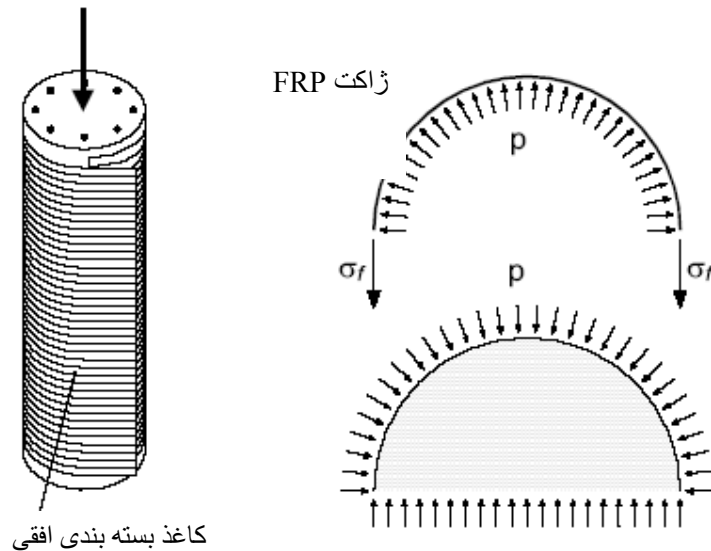
شکل 4. jacketing فلزی (encasing) موجود در ستون

عملکرد ستون تعمیرات اساسی با کت فولاد شده است به خوبی تست شده ، و به اثبات رسیده است یک روش بسیار موثر است. اجرای ستون های شکست در خم ، به عنوان یک نتیجه از کاستی های که قبلا ذکر شد ، می تواند تبدیل به پاسخ انعطاف خمشی حداقل به خوبی به عنوان ستون های جدید طراحی شده برای طراحی روش های جاری است. هر دو روش تنها نیاز به افزایش کمی از عضو مقطع و کمتر مخرب از روش jacketing بتن می باشد. کت فولاد گسترده اجرا شده اند. در کالیفرنیا ، ایالات متحده آمریکا ، ژاکت فولادی مقاوم سازی به طور معمول در عمل افزایش سلول های پلاستیکی در مناطق بالقوه لولا ، بنابراین به منظور بهبود انعطاف ستون کارگردانی. در ژاپن ، آن را بیشتر به عنوان تقویت اضافی در طولی ستون ، برای بالا بردن استحکام خمشی آن بوده است. چند سال پس از اولین برنامه های کاربردی ، مشخص شده است که کت فولاد بوجود می آیند گاهی اوقات مشکلات نسبت به مشکلات ساخت و ساز هر دو و مهمتر از همه خوردگی. ساخت و ساز است مشکل است زیرا از قرار دادن و جوش ، و هزینه های ساخت و ساز بالا هستند به دلیل سنگین وزن حمل و نقل و قرار دادن. خوردگی می تواند یک مشکل در هر دو انتهای ژاکت ، بنابراین تعمیر و نگهداری بسیار مهم است.

### 1.3 پیچیدن FRP

تا همین چند سال پیش ، تنها روش موجود برای ارتقاء عمودی عناصر ساختاری آن ارائه شده در بخش های قبلی شد. فقط به تازگی ، از پلیمرهای تقویت شده با فیبر (FRP) به عنوان روش موثر برای تقویت تخریب یا ناکافی اعضای بتن مسلح شناخته شده است. خواص قابل توجهی از FRP ، مانند استحکام بالا خاص ، و عمدتا نیز بالا سفتی خاص ، ضخامت کم و وزن و مقاومت در برابر خوردگی ، به آنها اجازه ساخت و ساز در سایت بدون هیچ مشکل جدی استفاده شود. ژاکت FRP می تواند از لایه فعال یا غیر فعال باشند ، و یا ترکیبی ، از متفاوت مواد FRP. به طور معمول carbonfiber و / یا پشم شیشه استفاده می شود ، گاهی هم aramid - الیاف مانند Kevlar™ یا Twaron™ ، در ترکیب با یک ماتریس رزین ، اپوکسی معمولا. متعدد ترکیبی می تواند به صورت ، که یکی از مزیت های اصلی کت FRP. مطالعات تجربی و برنامه های کاربردی خلبان نشان داده اند که با پوشش عناصر عمودی با کت FRP قرار داده شده در یک یا چند لایه ، عمل محصور در بتن به دست آمده است که هر دو افزایش قدرت و انعطاف این عنصر کل. در مورد ستون ها ، FRP کامپوزیت jacketing تکنیک های نشان داده شده است دارای قابلیت های قابل مقایسه با عملکرد و در برخی موارد بهتر از ستون های تعمیرات اساسی از طریق استفاده از روش ارائه شده در بالا متداول.

عمل سلول به دست آمده است تا از "منفعل" نوع ، است که ، آن را توسعه تنها به نتیجه اتساع عرضی از هسته بتن فشرده است که امتداد دستگاه محدود ، که در نتیجه اعمال فشار محدود درون (شکل 5). "فعال" سلول عمل را می توان با پیش **tensioning** ورق قبل از درخواست به دست آمده. به طور کلی ، الیاف کربن (CFRP) در مواردی که هدف افزایش ظرفیت تحمل از ستون مورد نظر ، در حالی که الیاف شیشه (GFRP) مناسب تر هستند ، به لطف خود **deformability** بالاتر است ، به مواردی که در پی افزایش انعطاف است به جای آن شرح مفصلی از تمام روش های موجود برای پیچیدن FRP در 4 ارائه شده است.



شکل 5. حبس ستون با FRP ، بهره گیری از اتساع عرضی از هسته بتنی فشرده شده تحت بار محوری.

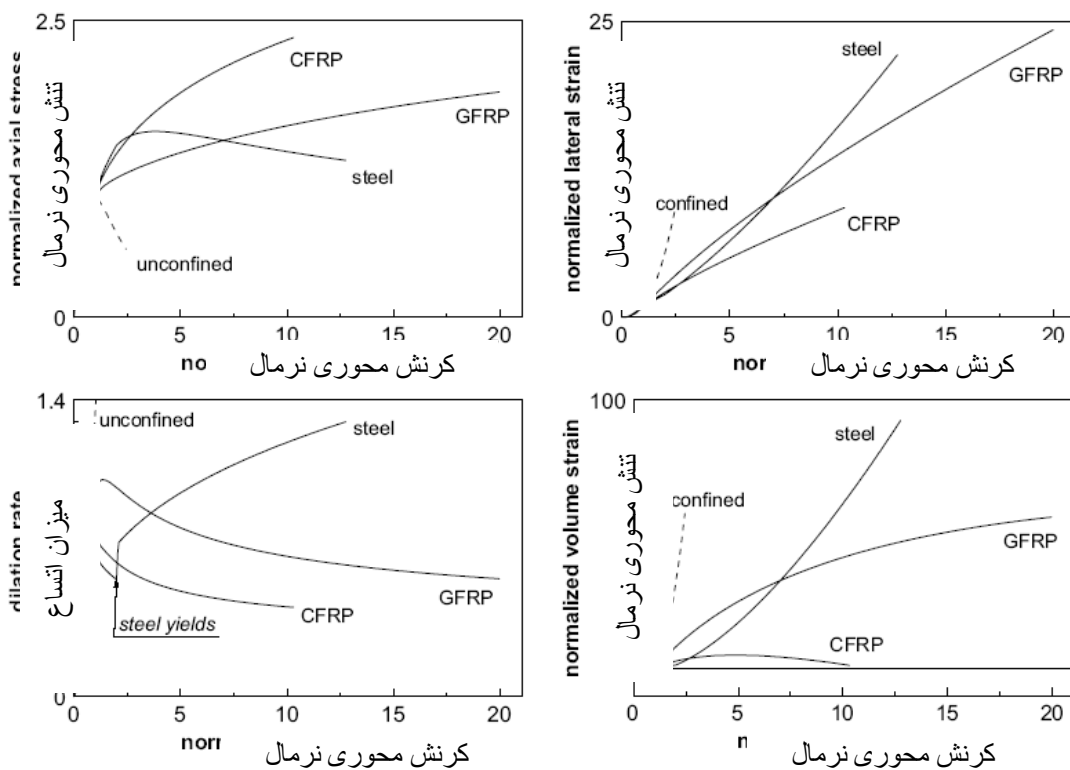
#### 1.4 PRESTRESSING سیم یا HOOPS اکسترنال

اصل چهارم است با قرار دادن کابل های مقاوم سازی عمودی فولاد **prestressing** اطراف ستون. این اصل شده است در درجه اول برای پل بعضا مطرح شده است. به دانش نویسنده ، اجرا نشده است انجام در هر نقطه از جهان است.

#### 2 استحکام بتن و تورق

در سه دهه گذشته رفتار بتن محصور شده است ریشه ای عمیق در تعداد بیشماری از تحقیقات ، که نتایج به دست آمده هم اکنون به خوبی شناخته و تاسیس مطالعه قرار گرفت. همه از این مطالعات اشاره بتن محصور شده توسط فولاد ، که ، پس از بازده ، محدود اعمال می فشار ثابت است. این اجازه همه محققان به ارتباط محدود خواص بتن تا اگر تحت فشار هیدرواستاتیک ، بیان شده از نظر استحکام فولاد عملکرد ، بنابراین برای مقابله با اجتناب از مشکل پیچیده از اتساع بتن و از تداخل آن با دستگاه محدود خود. این نقطه نظر بود تا با معرفی نوآورانه از FRP محدود دستگاه تغییر : FRP است مواد الاستیک ، و به همین دلیل آن را نشانی از عملکرد نیست ؛ به عنوان یک نتیجه ، آن را اعمال می به طور مداوم افزایش عمل سلول در بتن می باشد. پاسخ از FRP - بتن محدود معلوم می شود کاملا متفاوت از یک فولاد محدود ، و باز این راه را برای فعالیت های تحقیقاتی قابل توجه است که در چند سال گذشته تا به تولید تعدادی از مطالعات با ارزش ، هر دو تجربی و تحلیلی ، با هدف مشترک به روشن شدن همه جنبه های جدید در این پدیده. افزایش قدرت در بتن محدود سرچشمه از یک واقعیت شناخته شده : بتن **unconfined** فشرده سازی تحت **uniaxial** تا 90٪ کاهش می دهد از قدرت خود را در حجم ، فراتر از این مقدار ، آن را گشاد. فشار محدود از

جمله مخالفت با اتساع قابل ملاحظه ای باعث بهبود عملکرد آن است. یافته های مربوطه را از تمام مطالعات تجربی بر روی محدود FRP - بتن منقبض شده و در شکل 6 شکل 7. در شکل 6 رفتار (نرمال) از (هر دو شیشه و کربن) FRP - بتن محدود به بیشتر آشنا فولاد بتن محدود مقایسه شده است. در استرس فشار رابطه ، شکل 6 بالا و چپ ، آن است که دیده می شود (FRP - GC) بتن محدود نشان شاخه روزافزون ، به عنوان یک فولاد محدود مخالف ، که پس از رسیدن به اوج قدرت ، متلاشی میشود در شاخه نرم شدن. تخریب بتن متناسب با فشار جانبی : افزایش فعالیت سلول از FRP محدود الاستیک فشار جانبی در نتیجه به تأخیر انداختن تخریب ، از سوی دیگر ، هنگامی که بازده فولاد ، رخ می دهد که در 2.5 کرنش نرمال محوری ، تخریب بتن می گیرد ، چرا که فولاد ارائه می دهد سختی صفر تا اتساع جانبی بتن می باشد. افزایش عمل سلول از FRP محدود الاستیک فشار جانبی در نتیجه تاخیر در تخریب. با توجه کرنش نهایی ، به طور ضمنی و تورق ، لازم به ذکر است که ، صرف نظر از کرنش نهایی کم از FRP - کت ، کرنش نهایی بتن قابل مقایسه است (CFRP) و یا حتی بیشتر (GFRP) از آن به دست آمده با فولاد است.



شکل 6. تنش محوری در مقابل کرنش محوری (بالا ، سمت چپ) ، در مقابل فشار جانبی کرنش محوری (بالا ، سمت راست) ، حجم فشار در مقابل فشار محوری (پایین ، سمت چپ) ، اتساع ، انتظار : کاهش نرخ : شماتیک رفتار بتن با فولاد ، CFRP و GFRP محدود . کرنش محوری (پایین ، سمت راست).

با توجه به اینکه بتن کرنش نهایی ، که بر انعطاف به دست آمده از طریق سلول ، آن را باید متذکر شد که ، صرف نظر از ارزش های کم ارتفاع از  $\epsilon_{ju}$  از FRP - ژاکت ، در این موارد کرنش نهایی بتن قابل مقایسه است و یا حتی

بیشتر از آن به دست آمده از طریق استفاده از دستگاه محدود انعطاف پذیر ، یعنی فولاد.

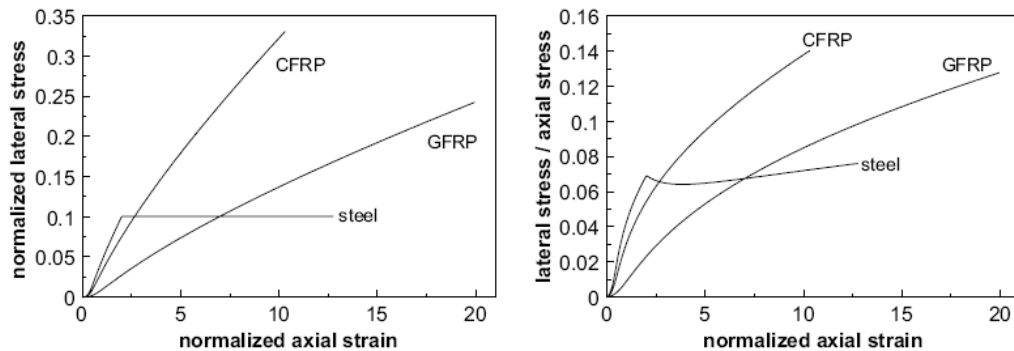
این رفتار متفاوت نشان می دهد (Spoelstra و مونتی 1999) که ، زمانی که کت FRP استفاده می شود ، فشار محوری نهایی بتن ضعیف است تنها توسط اداره نهایی سلول فشار (متناسب با  $\rho_j f_{ju}$ ) ، در حالی که آن عمدتاً

وابسته به نهایی تغییر شکل. این از این حقیقت ثابت شده است که فایبرگلاس - محدود نمونه نشان می دهد تقریباً دو برابر بزرگ تر از carbonfiber deformability - محدود یکی ، هر چند فشار سلول نهایی از دومی است که تقریباً 50 درصد بزرگتر. در شکل 6 (بالا ، سمت راست) ، در مقابل فشار جانبی رابطه کرنش محوری نشان داده شده است. این را می توان مشاهده کرد که شیب بستگی شاخه خشکی محدود دستگاه (که همچنین می تواند در نمودار قبلی مشاهده) : فولاد و شروع به CFRP با تقریباً همان شیب ، اما بعد از عملکرد فولاد در 2.5 کرنش نرمال محوری ، آن را نسبت به سویه های بالاتر جانبی GFRP .departs نشان می دهد که رفتار با ثبات تر ، به این معنی که آن را با شیب بالاتر شروع می شود (به این معنی که تا به بتن اتساع بالاتر اولیه لترال) ، که با این حال ثابت می ماند تا ژاکت نتواند. CFRP کاهش فشار اولیه لترال ، اما اثر آن تا به کوتاه مدت ، به دلیل پایین تر extensional آن فشار نهایی

$\cdot \epsilon_{ju}$

این می تواند بهتر در شکل 6 قدردانی (پایین ، سمت چپ) ، جایی که میزان اتساع است بیان به عنوان تابعی از کرنش محوری. میزان اتساع آبی دی فسفر '  $\mu = \Delta \epsilon_l / \Delta \epsilon_c$  به عنوان سرعت تعریف شده از افزایش فشار جانبی آبی دی مربوط به افزایش فشار محوری  $\Delta \epsilon_c$ . این دیده می شود که وقتی بازده فولاد انقطاع رخ می دهد ، به علت تغییر ناگهانی در مدول ، پس از این ، اتساع افزایش نرخ به طور نامحدود. از سوی دیگر ، برای FRP دو ، آن را به طور مداوم نسبت به ارزش تقریبی کاهش می یابد. توجه داشته باشید که موقعیت از نقطه ای که عمل تبدیل شدن به سلول شروع می شود موثر است که ، وقتی که شاخه های از یک unconfined ترک) بستگی به سختی از دستگاه محدود : GFRP - محدود .departs بتن بعد از دو نفر دیگر. این نقطه ای که فشار کافی جانبی توسعه است که مانع از اتساع جانبی بتن را از افزایش بی بند و بار است.

در شکل 6 (پایین ، سمت راست) ، جالب است که از فشار حجم در مقابل منحنی فشار محوری که برای ژاکت CFRP کاهش کرنش حجمی اول ، همانطور که انتظار می رود رعایت ، و سپس تبدیل شدن به صفر و فراتر از سطح معینی از کرنش محوری افزون فشار سلول curtails گسترش حجمی و جهت معکوس است.



شکل 7. مقایسه اثر سلول در بتن با فولاد ، CFRP و GFRP محدود.

در شکل 7 ، سمت چپ ، اثر سلول (استرس جانبی در مقابل فشار محوری) برای هر سه نوع از لباس محلی است مقایسه شده است. این به صراحت نشان داده آنچه انتظار می رود ، است که ، قبل از بازده ژاکت اعمال می فولاد اقدام بالاتر محدود ، که با این حال ثابت می ماند بعد از عملکرد ، در حالی که کت FRP نشان می دهد سلول monotonically افزایش است ، بنابراین در استفاده از یک عمل سلول در دو نوبت (GFRP) و یا ورود سه بار (CFRP) است که از فولاد ، با تو همان نسبت حجمی ج. در شکل 7 ، درست است ، جالب است مقایسه ژاکت اثر بیان شده در شرایط تنش نسبت دندان لترال به تنش فعلی محوری. فولاد اثر ژاکت پس از عملکرد تنها به علت رفتار

نرم شدن بتن ، در حالی که در دو مورد دیگر آن است که رفتار الاستیک از کت FRP را افزایش می دهد که نسبت. در اینجا ، باید آن را آشکار چگونه دو ماده FRP برسد تقریباً همان سطح از کارایی ، اما در سطوح مختلف کرنش محوری ، که ارائه جذاب تر استفاده از لباس محلی GFRP که همچنین بهره برداری از تورق در عین حفظ اثر مشابه از کت CFRP.

ایده ظهور از این نمودار که CFRP استفاده شود به ارائه بتن با افزایش قدرت بالاتر و تورق متوسط ، در حالی که GFRP باید مورد استفاده قرار گیرد ارائه تورق بالاتر و افزایش قدرت متوسط است. این یافته خواهد بود اساس ملاحظات طراحی محور توسعه در بخش بعدی.

### 3 IDEALISATIONS مورد استفاده در طراحی و تحلیل

پدیده زمینه ای افزایش قدرت و انعطاف از FRP - بتن محدود هنوز هدف های بی شماری مطالعات تجربی و تحلیلی (برای بررسی ، همچنین نگاه کنید به رقم مونتی 2001). بنابراین ، اجماع کلی در معادلات به اتخاذ در طرح ارتقاء اقدامات است هنوز می شود رسیده است. با این حال ، برخی از نشانه های در این راستا به تازگی در نشریه صادر دروغ در چیز جزئی (2001) موجود میباشد. لازم به ذکر است که مبتنی بر قابلیت اطمینان مطالعات هنوز در راه است (مونتی و سانتینی 2002) است که باید ارزش های کالیبره شده از ضرایب ایمنی جزئی به به مقدار مکانیک از FRP کاربردی ارائه می کنند. در صورت عدم وجود چنین نشانه ای ، معادلات منتشر شده در زیر باید به عنوان توصیفی از پدیده در نظر گرفته شده و نه به عنوان معادلات را طراحی کنند. در *precautious* و محافظه کار راه ، ضریب ایمنی  $\gamma_f = 1.5$  را می توان به ارزش مشخصه از FRP استفاده استحکام  $f_{fk}$  به طوری که ارزش طرح احتمالی

می تواند باشد :  $f_f = f_{fk} / \gamma_f$  در حالی که مدول الاستیک  $E_f$  است که نوع قابل اغماض از نمونه به

نمونه ، می توان ، در نظر گرفته شده برای اهداف عملی ، به عنوان قطعی (و بنابراین برابر با اعلام شده توسط سازنده). برای کرنش نهایی و مدول الاستیک از ژاکت FRP ، نگاه کنید به ملاحظات توسعه در 3.1. همانگونه که قبلاً مورد بحث ، دو مورد از FRP - تقویت باید وارد شود : که در آن لازم است برای افزایش ظرفیت های محوری از عنصر بتن مسلح ، و یکی که در آن به دنبال افزایش انعطاف است به جای آن. در این دو مورد لازم است به شناسایی ارزش دو مقدار که حاکم بر طراحی کت FRP : در مورد قدرت سابق ، در دومی کرنش نهایی بتن می باشد.

#### 3.1 خواص FRP موثر

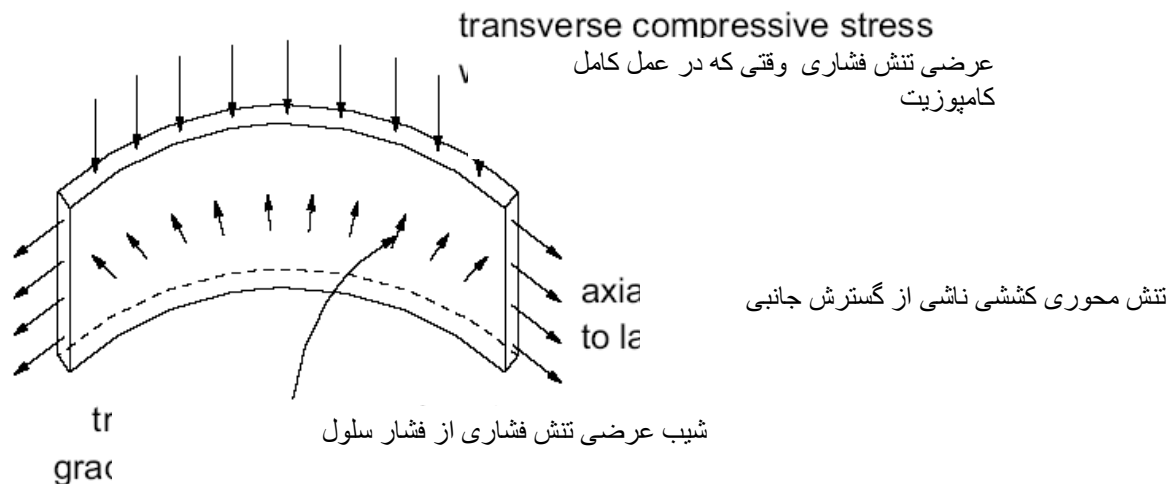
خواص از FRP - بتن محدود بستگی دارد در هر دو کرنش نهایی  $\epsilon_{fu}$  و مدول الاستیک  $E_f$  از FRP برای پوشش آن استفاده می شود. به طور کلی ، این دو مقدار ، یک بار FRP قرار داده شده است ، رسیدن به ارزش ها (مشخص شده توسط شاخص : ژاکت =  $\epsilon_{ju}$  و  $E_j$  که کمتر از آن اعلام شده توسط تولید کننده ، به جای مراجعه به ورق های خود را دارند. دلایل کاهش چنین به در به دنبال پدیده های زیر باشد :

- ایکس حضور دولت تنش سه محوری (شکل 8) که بستگی به انطباق سه اثر در ژاکت : FRP :  
<sup>1</sup>) انبساط جانبی بتن است که برای تولید استرس پیرامونی ، <sup>2</sup>) باند با سطح بتن ، که به تولید تنش محوری ، و <sup>3</sup>) ، از اهمیت پایین تر ، به بیرون فشار اعمال شده توسط گسترش بتن در صورت داخلی ژاکت. این فشار را کاهش می دهد نهایی  $\epsilon_{ju}$  از ژاکت FRP. بنابراین ، در طراحی ، به جای کرنش نهایی  $\epsilon_{fu}$  داده شده توسط تولید کننده ، ارزش :

$$\varepsilon_{ju} = \min[0.9 f_f / E_f = 0.9 f_{fk} / (\gamma_f E_f), 0.9 \varepsilon_{fu} / \gamma_f]$$

باید گرفته شود به جای آن. ارزش بیشتر از این باید توسط شواهد تجربی کافی انگیزه.

- ایکس کیفیت اجرا : در صورتی که الیاف به درستی ندارند ، یا به علت حضور حفره یا به آماده سازی سطح ناکافی ، بخشی از فشار پیرامونی است به کار به کشش الیاف و این کار غیر همگن دولت تنش در مواد. علاوه بر این ، الیاف را می توان در مکاتبات از بی نظمی های محلی در سطح تماس های آسیب دیده. این پدیده به ارمغان می آورد به کاهش مدول الاستیک از ژاکت ، به طور کلی به ترتیب از 10 % ، به طوری که یکی است :  $E_j = 0.9 E_f$  زحمت می توان با کمی قبل از tensioning ورق قبل از اعمال فائق آید.
- ایکس انحنای ژاکت ، به خصوص در مکاتبات به ناقص و گرد گوشه ستون. این پدیده است که در 3.5 ، شرح داده شده را از طریق محاسبه ضریب  $k_s$ .
- نفوذ ایکس از ضخامت در حضور چند لایه. این پدیده را می توان زیرا اثر غفلت آن از نهاد پایین تر با وجه به دیگران است.



شکل 5. حالت تنش سه محوری در ژاکت

### 3.2 بررسی فشار محدود

سلول با فولاد.

این است که در سیلندر axially لود بتن شناخته شده و محدود با stirrups فولاد ،  $f_l$  حداکثر فشار محدود مقدم

است از نظر تقویت عرضی محاسبه نسبت  $\rho_{st}$  و قدرت عملکرد آن  $f_y$  ، به عنوان

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad \text{with} \quad \rho_{st} = \frac{4 A_{st}}{s d_s} \quad (1)$$



جایی که  $k_e = \text{arching}$  اثر ضریب (معمولا 0.8)، فاصله ها = stirrups ، s = منطقه stirrups ،  $A_{st}$  = قطر هسته بتنی محدود.

### سلول با FRP

در مورد عناصر بتن به طور مداوم با ورق های FRP ، با محدود الیاف circumferentially تراز وسط قرار دارد ، محدود حداکثر فشار  $f_l$  فشار نهایی  $\varepsilon_{ju}$  = موثر از ژاکت FRP (همانطور که در تعیین 3.1) :

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} = 2 \frac{E_j \varepsilon_{ju} t_j}{d_i} \quad \text{with} \quad \rho_j = \frac{4t_j}{d_i} \quad (2)$$

که در آن  $\rho_j$  = نسبت FRP ،  $E_j$  ،  $t_j$  ،  $d_j$  = مدول الاستیک ، ضخامت و قطر ، به ترتیب ، از ژاکت

FRP. توجه کنید که رابطه قبلی معتبر است در مورد عناصر axially لود استوانه ای و به طور مداوم با FRP محدود. برای تنظیمات مختلف (به عنوان مثال ، عناصر با مقطع مستطیل ، discontinuously با نوار FRP محدود) ، کاهش ضریب 3.5 شرح داده شده در قرار داشته باشد.

### 3.3 بررسی مقاومت نهایی محدود FRP - بتن

ارزیابی مقاومت نهایی بتن مفید است در مواردی که ظرفیت تحمل بار از عناصر بتن مسلح تقویت شده با FRP باید برآورد شده است. در تمام معادلات ارائه شده ، ارائه شده در زیر ، محدود بتن مقاومت نهایی  $f'_{cc}$  است ارزیابی بر

اساس هر  $f'_{co}$  دو مقاومت بتن unconfined داده شده توسط (2).

بسیاری از معادلات پیش بینی ها در معادله Richart و همکاران است. (1929) :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (3)$$

که در آن ، برای پارامتر  $k_1$  است که اقدامات اثر سلول ، عبارات زیر پیشنهاد شده اند :

$$k_1 = 2.1(f_l/f'_{co})^{-0.13} \quad (\text{Karbhari and Gao 1997})$$

$$k_1 = 6 f_l^{-0.3} \quad (\text{Samaan et al. 1998})$$

$$k_1 = 2.2(f_l/f'_{co})^{-0.16} \quad (\text{Saafi et al. 1999})$$

$$k_1 = 3.5(f_l/f'_{co})^{-0.15} \quad (\text{Toutanji 1999}).$$

Spolstra و مونتی (1999) ارائه معادله زیر می باشد :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \quad (4)$$

در حالی که Saadatmanesh و همکاران. (1994) ، Purba ، و مفتی (1999) ، با استفاده از معادله Mander و همکاران. (1988) :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 1.254 \quad (5)$$

### 3.4 بررسی کرنش نهایی بتن FRP محدود - ارزیابی بتن کرنش نهایی

افزایش سلول  $\epsilon_{cu}$  اعمال شده توسط FRP، اساسی است که بر آورد تورق از عناصر عمودی زلزله زیر طراحی شده و سپس با FRP ارتقا هستند. در زیر دو عبارت بیشتر استفاده می شود به یاد می آورد. Seible و همکاران. (1995)، پیشنهاد بیان برای  $\epsilon_{cu}$ ، مورد استفاده برای فولاد بتن داشته است:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_{st} f_y \epsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (\text{with steel}) \quad (6)$$

جایی که  $\epsilon_{su}$  = کرنش stirrups نهایی، داشتن قدرت عملکرد  $f_y$  سالانه و با عرضی تقویت نسبت خیابان تو.

$\rho_{st}$  بیان فوق به صورت FRP اقتباس:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_j E_f \epsilon_{ju}^2}{f'_{cc}} \quad (\text{with FRP}) \quad (7)$$

که در آن  $E_f$  = مدول الاستیک FRP،  $\epsilon_{ju}$  = کرنش نهایی موثر از ژاکت FRP (به عنوان مشخص در 3.1، با تغییرات در 3.5 در صورت لزوم) و در هر دو معادله بالا  $f'_{cc}$  کامپیوتر (5) است، در حالی  $f_l$  مقدم با محاسبه (2) در (1) در حالت اول و با دوم.

بیان جایگزین، تا در مورد FRP - بتن محدود استفاده می شود، شده است پیشنهاد شده توسط Spolstra و موتی (1999):

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left( 2 + 1.25 \frac{E_c}{f'_{co}} \epsilon_{ju} \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \right) \quad (8)$$

جایی که  $f_l$  مقدم با کامپیوتر است (2)،  $f'_{co}$  = unconfined بتن استحکام، و  $\epsilon_{ju}$  = موثر کرنش نهایی از

ژاکت FRP (همانطور که در 3.1، مشخص با تغییرات در 3.5 وقتی ضروری است). مقررات وابستگی به مدول الاستیک بتن کمیسون اروپایی و در  $E_c$  بتن در اوج قدرت  $\epsilon_{co} \approx 0.002$ . توجه داشته باشید که، با ابراز

مگا پاسکال در تنش و با فرض برای مدول الاستیک بتن  $E_c = 5700 \sqrt{f'_{co}}$  (Eurocode 2, 1992)،

معادله ساده به قبلی:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 14.25 \frac{\epsilon_{ju}}{f'_{co}} \sqrt{f_l} \quad (9)$$

جایی که  $f_l$  مقدم با محاسبه (2)، با تغییرات گزارش شده در 3.5 در صورت لزوم.

### 3.5 تغییرات برای غیر مدور مقطع و سلول با نوار

در صورت مستطیل یا مربع سطح مقطع، که در آن گوشه شده اند گرد با شعاع بتن مسلح  $R_c$  (تشکیل شده بین 5 و 40 میلی متر میلی متر) قبل از پیچیدن با FRP، تاثیر سلول به طور قابل توجهی کاهش می یابد. این پیشنهاد شده است (میرمیران و همکاران 1998) اتخاذ در این موارد تغییر فشار سلول  $f_l' = k_s f_l$  (ب)

$$f_l = 2 f_f t_j / D \quad \text{از طریق ضریب :}$$

$$k_s = \frac{2 R_c}{D} \quad (10)$$

د که در آن طرف دیگر از مقطع است. بیشتر مطالعات اخیر (مونتی و 2002 Renzelli)، که با این حال نیاز به پالایش، توصیف به شیوه ای دقیق تر و منطقی برای اثر حبس در بخش مستطیلی است. هنگامی که پوشش بتن از عناصر تقویت کافی نیست، دشوار است گرد گوشه با شعاع بالا  $R_c$  بتن مسلح. در این موارد، Priestley و همکاران (1994) پیشنهاد به جغاری کردن روی سطوح و ستونها بخش مستطیل شکل در یکی از هندسه متفاوت (معمولا دایره یا بیضی شکل، به عنوان مثال نشان داده شده در شکل 12). برای بخش های بیضی شکل، فشار سلول به عنوان تابعی از نیمه محور و ب داده شده است :

$$f_l' = \frac{f_f t_j [1.5(a+b) - \sqrt{ab}]}{2ab} \quad (11)$$

در مواردی که در آن تقویت شده است به صورت مداوم داده اند، چرا که هر دو با مارپیچ ناپیوسته و یا با حلقه های فاصله دار متوجه نیست، آن را مطرح شده است (Saadatmanesh همکاران آل. 1994) مقدار کاهش فشار  $f_l' = k_g f_l$  (with  $f_l = 2 f_f t_j / D$ ) حدود با استفاده از ضریب :

$$k_g = \frac{(1 - s_f / 2d)^2}{1 - \rho_{sc}} \quad (12)$$

که در آن  $s_f$  فاصله حلقه است و  $\rho_{sc}$  نسبت به منطقه تقویت طولی است منطقه بتن محصور شده توسط stirrups.

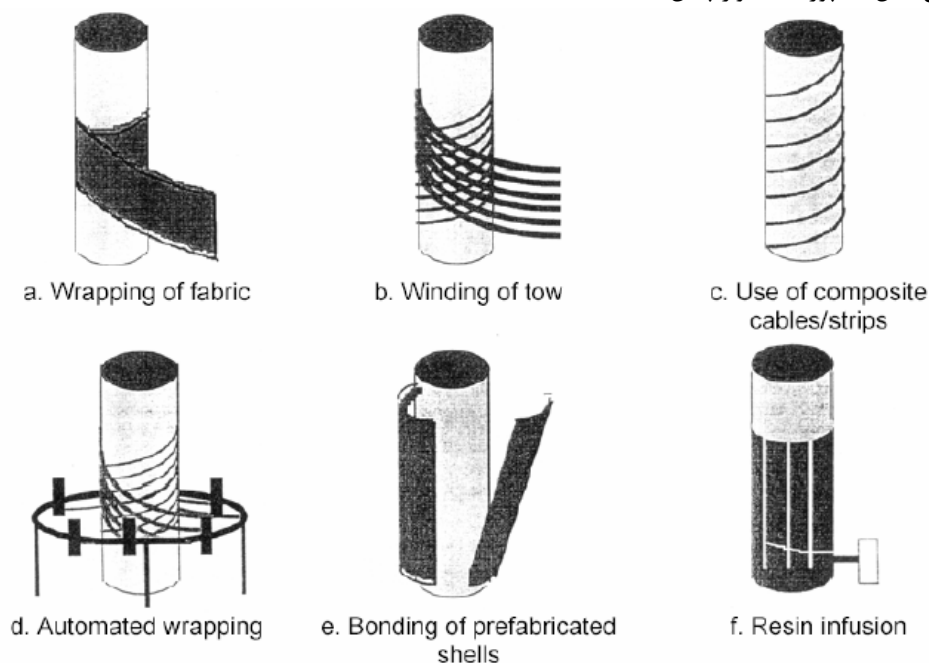
### FRP 4 پیچیده ستون

#### 4.1 مقدمه

انواع ستون سیستم های FRP پوشش را مورد بررسی قرار گرفته و توسعه یافته بر اساس نوع مواد، شکل و فرایند برنامه (شکل 9). آنها را می توان به پنج گروه طبقه بندی بر اساس روش پردازش / نصب و راه اندازی دسته بندی (Karbhari و همکاران. 2001) :

1. مرطوب غیر روحانی به بالا روند با استفاده از پارچه، نوار یا دو فرد؛
2. prepreg در قالب دو، نوار یا پارچه؛
3. پوسته های پیش ساخته؛
4. رزین فرآیندهای تزریق؛

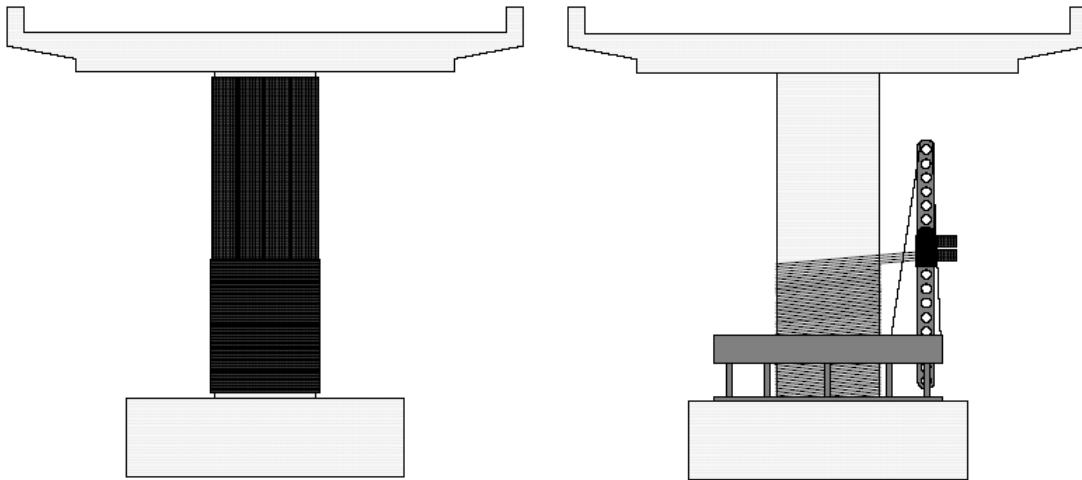
5. خارجی کابل کامپوزیت یا نوار پیش ساخته.



شکل 9. مواد و روش ها از پیچیدن FRP از ستون های بتن مسلح (Karbhari و همکاران 2001).

در روش (a) ستون را می توان با ورق های FRP یا تک و یا چند لایه ، و یا حتی با FRP در نوار یا حلقه های مارپیچ به حرکت در (شکل a10) قرار داده شده پیچیده می شود. برنامه های کاربردی از این روش هستند بطور بیش از حد برای هر دو ساختمان ستون پل و بعضا گزارش شده (نگاه کنید به سابق ، پژوهشگران سال 1996 ، Neale و 1997 Labossiere ، قهوه های مایل به زرد 1997). تخمگذار به بالا از prepreg نوار ساده ، بسیار سریع ، اصول ساخت و ساز است ، اما سخت تر است برای کنترل ، از آن است که توسط دست انجام به طور کامل ، و نگرانی های مرتبط با کنترل کیفیت از مخلوط رزین ، حصول وجود دارد خوب مرطوب از الیاف با رزین آغشته یکنواخت بدون entrapment حفره بیش از حد ، تراکم خوب از الیاف بدون چروک بیش از حد از الیاف عمدتا حلقه زدن به کارگردانی ، کنترل از روند درمان و دستیابی به درمان کامل ، و جنبه های حین و بعد از درمان به دوام زیست محیطی مرتبط است. در مورد مرطوب دو سیم پیچ یا نوار (b) ، فرایند ممکن است خودکار ، اگر چه هنوز اشباع رزین از طریق استفاده از حمام مرطوب و / یا اسپری ، و نگرانی های بسیاری از همان کسانی که برای توصیف غیر روحانی به بالا روند . علاوه بر این ، ضرورت پخت تحت دمای بالا (معمولا در محدوده 80-150 درجه سانتیگراد) می تواند باعث مشکلات اگر بتن بستر بسیار مرطوب و در نتیجه بخار آب رانده تاول در jacketing پخت کامپوزیت شود. روش (c) ، که شامل استفاده از کابل و یا نوار های پیش ساخته است ، تا حد زیادی منتشر نشده است به عنوان نشده است. در روش (d) دستگاه لفاف پیچ در پیچ است که به صورت خودکار برای الیاف اطراف ستون (شکل 10 - b ، شکل 11 - b) استفاده می شود. ماشین ساخته شده برای اولین بار در ژاپن در 80 (انجمن پژوهشگران 1996) ، شده است برای ارتقاء بعضا پل طراحی شده است ، اما می توان آن را برای ساختمان های ستون ، استفاده می شود نیز هست. کاغذ بسته بندی دستگاه خودکار است تا در اطراف ستون مجموعه. الیاف ، زخم بر روی قرقره ، در فیبر سر سیم پیچ قرار می گیرد ، و حرکت به سمت بالا در اطراف ستون ، قبل از آغشته با رزین زخم. بعد از سیم پیچ ، پتو درمان قرار داده شده است. سیم پیچ زاویه ، فیبر کسر حجمی ، ضخامت و کامپیوتر به طور کامل کنترل می شود. با استفاده از

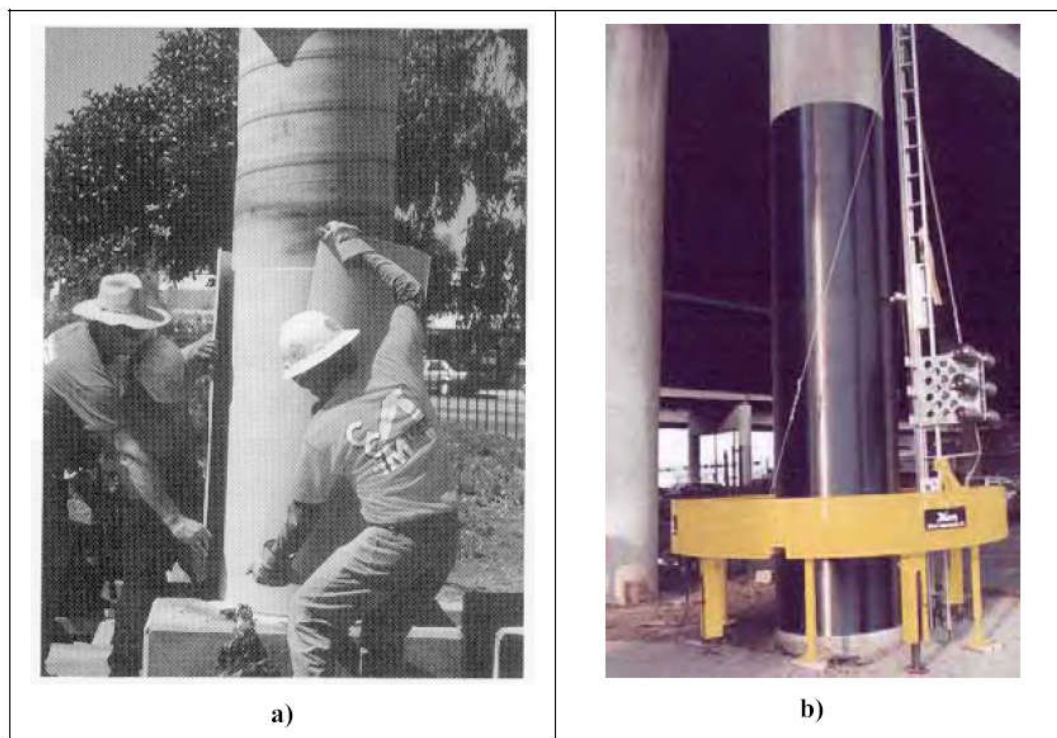
این دستگاه این امکان وجود دارد به باد الیاف در حالی که پیش از آنها *tensioning*، بنابراین سیستم *jacketing* فعال، مستقل از اتساع بتن جانبی برای به دست آوردن. نقطه ضعف دستگاه چنین است که، در حضور خاک های غیر مسطح، عملیات کالیبراسیون اولیه مورد نیاز است، معقول است که کم کردن سرعت استفاده از آن. همین اثر را می توان در واقع با سیستم های دیگر، به دست آمده را با تزریق یا گسترش ملات اپوکسی و یا در فشار بین ژاکت و سطح ستون. تکنیک (e) تشکیل شده در نرم افزار در سراسر ستون از دو پوسته نیمه پیش ساخته (شکل a11) است که می تواند، بسته به آن شکل مقطعی، یا مدور (برای سابق، Nanni و نوریس 1995) یا مستطیل (در سابق، Ohno و همکاران 1997). در جایگزین، کامل پوسته های مدور با یک شکاف عمودی را می توان باز کرد و در اطراف ستون قرار داده شده (برای سابق، شیائو و کارشناسی ارشد 1997). این سیستم بسیار ساده است و در هر نرم افزار در محل است، و *affords* سطح بالایی از کنترل کیفیت مواد به دلیل ساخت کارخانه کنترل مبتنی بر صدفها می باشد. با این حال، پوسته باید با تحمل سخت با توجه به ابعاد بعضا متوجه شدم. در صورتی که از لایه های چندگانه، آنها باید به درستی می چرخاند تا اطمینان حاصل شود همکاری مورد نظر را از سیستم *jacketing* کل. پوسته های پیش ساخته می تواند به عنوان *formworks* استفاده می شود، همچنین به عنوان تقویت عملکرد عرضی و در مورد بخش مستطیل شکل، عمل محدود از پوسته کمتر موثر است و به طور کلی ترجیح به ایجاد تغییر در ستون مقطعی شکل (به عنوان توضیح آخر). در نهایت، در صورت تزریق رزین (f)، پارچه خشک اعمال می شود و دستی است و سپس رزین تزریق با استفاده از خلاء با درمان تحت شرایط محیط.



ب) سیستم خودکار فیبر پیچیدن

الف) نوار Prepreg غیر روحانی به بالا

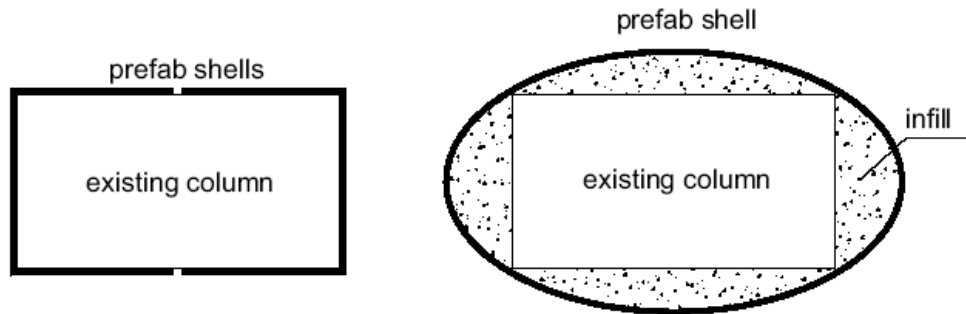
شکل 10. نمونه های شماتیک از FRP wrappings.



شکل 11. (a) موقعیت های پیش ساخته پوسته FRP ، و (b) سیستم پیچیدن خودکار می باشد. یادآوری این نکته ضروری است که افزایش قدرت قابل حصول توسط FRP - کاغذ بسته بندی قابل توجه است که به عنوان در تورق نیست. با این حال ، در صورت لزوم ، روش ارتقا از ستون ها در بالا بردن ظرفیت خمشی هدف. در این حالت ، ظرفیت معیار طراحی قرار داشته باشد (به عنوان ، برای سابق ، بیان شده در Eurocode 2 (CEN 1991)) ، به دلیل افزایش ظرفیت خمشی در ستون معرفی نیروهای بالاتر در پرتو ستون مشترک (یا در footings) و آن را تقویت عمل برش در ستون خود. از آنجا که این مکانیسم های مقاومت از نوع شکننده هستند ، آن الزامی است به آنها اجتناب کنند ، از طریق تقویت آنها نیز هست. هدف از ستون محدود است بنابراین یا افزایش ظرفیت حمل بار آن یا تورق آن تحت اقدامات جانبی مانند آنهایی که ناشی از زلزله. هر دو مورد خواهد شد در بخش زیر 4.2 ارائه شده است. علاوه بر این ، دستگاه محدود ارائه می دهد محدودیت عرضی به طولی میله های زندان ، جلوگیری از کمانش آنها ، و جلوگیری از spalling پوشش بتن می باشد. این تکنیک همچنین می تواند مورد استفاده قرار گیرد برای جلوگیری از لغزش پیش از موعد rebars در دامان - splicing مناطق ، یا برای جلوگیری از خروج rebars در مناطق لنگرگاه ، همانطور که در بخش 4.3 ارائه شده است.

بسیار مهم است درک کنند که ، در صورت از اعضای با مقطع مستطیل شکل ، عمل محدود است کمتر موثر نسبت به دایره. در واقع ، به دلیل فاصله طولانی بین گوشه ها ، کامپوزیت عملا نمی محدود ساختار داخلی بتن اگر فقط به سطح استفاده شود. در این موارد ، تقویت کننده الیاف معمولا شل و قادر به ارائه بستری. اگر نسبت ابعاد بزرگتر از 2 ، مناسب است به نوشتن در بخش بازیگران شکل بیضوی در (ترجیحا نور) بتن ، که متعاقبا FRP - پیچیده شده (شکل 12). اگر در این راه حل قابل دوام است ، به دلیل افزایش وزن مشهود نیست ، باید به گوشه های گرد به منظور اجتناب از استرس بیش از حد غلظت در ورق های تا خورده در اطراف آنها (شعاع حدود 15 تا 25 میلی متر ، بسته به مشخصات داده شده توسط FRP منبع ژاکت و در بتن موجود ضخامت پوشش). طراحی و مسائل مربوط به موارد فوق

شرح داده شده در بخش هستند با 3.5 سر و کار داشتن.



شکل 12. Ovalisation از بخش مستطیل شکل قبل از پیچیدن.

## 4.2 حمل بار ظرفیت و تورق

### 4.2.1 ارتقا ظرفیت حمل بار

طراحی از مقدار FRP است انجام با شروع از مقدار بار طراحی از ت. مقدار مورد نیاز برای FRP - استحکام بتن به عنوان محدود به دست آمده :

$$f'_{cc} = \frac{N_d}{A_c} \quad (13)$$

جایی که  $A_c$  بتن می شود محدود است.

هنگامی که ارزش به دنبال استحکام بتن محدود محاسبه شده است ، یکی از معادلات ارائه شده در 3.3 می تواند ، به عنوان مثال :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \quad (14)$$

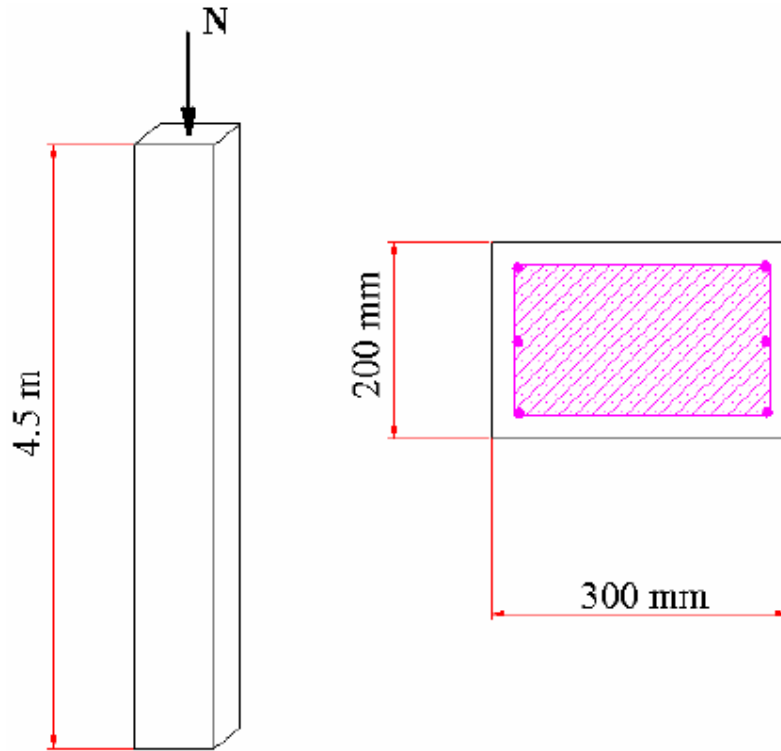
به منظور به دست آوردن فشار محدود مورد نیاز  $f_l$  ، و اعمال ، برای مقطع مختلف از دایره ، ضرایب مناسب در 5.3 ارائه شده است ؛  $f_l$  داشتن محاسبه از :

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} = 2 \frac{E_j \varepsilon_{ju} t_j}{d_j} \quad \text{with} \quad \rho_j = \frac{4t_j}{d_j} \quad (15)$$

$t_j$  ضخامت از ژاکت FRP به راحتی یافت می شود.

### 4.2.1.1 مثال : ارتقاء از مقاومت فشاری ستون بتن مسلح

این طرح مورد نظر را پوشش FRP با الیاف گذاشته افقی) از بتن مسلح با ستون کل بخش مستطیل شکل ، به منظور به دست آوردن 20٪ از افزایش ظرفیت تحمل بار عمودی (شکل 13). قبل از استفاده از کاغذ بسته بندی ، به منظور اجتناب از تمرکز تنش در گوشه و کنار ، این شده است با شعاع های گرد



شکل 13. یک مثال از یک ستون بتن مسلح تقویت شده با FRP برای به دست آوردن 20٪ از افزایش ظرفیت حمل بار.

خواص ستون		
4.50 m	ارتفاع	h
0.30 m	عرض بخش	b
0.20 m	عمق بخش	d
25 MPa	نامحدود مقاومت بتن	$f'_{co}$
30 MPa	لازم محدود قدرت بتن (افزایش 20٪ با توجه به $f'_{co}$ )	$f'_{cc}$
40 mm	شعاع گوشه های گرد	$R_c$
خواص CFRP <sup>1</sup>		
230000 MPa	مدول الاستیک	$E_{fk}$
1.5 %	کرنش نهایی	$\varepsilon_{fu}$
1.5	ضریب ایمنی جزئی	$\gamma_f$

<sup>1</sup> برای ارتقا قدرت CFRP ترجیح داده است ، نگاه کنید به شکل 3.5

• فشار حبس  $f_l$  مورد نیاز برای به دست آوردن قدرت محدود بتن  $f'_{cc} = 1.20 f'_{co}$  ،

بر اساس ارزیابی (4) :



$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \rightarrow f_l = \frac{1}{9} \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 0.2 \right)^2 \cdot f'_{co} = \frac{1}{9} \left( \frac{30}{25} - 0.2 \right)^2 \cdot 25 = 2.7 \text{ MPa}$$

- کاهش فشار محدود موثر با توجه به اثر بخش مستطیل شکل (نگاه کنید به ملاحظات در 3.3.5):

$$k_s = \frac{2R_c}{b} = \frac{2 \cdot 40}{300} = 0.27$$

- حبس به اعمال فشار برای از دست دادن به علت گرد کردن گوشه حساب (نگاه کنید به ملاحظات در 3.3.5):

$$f'_l = f_l \frac{1}{k_s} = 2.7 \frac{1}{0.27} = 10 \text{ MPa}$$

- خواص از CFRP انتخاب شد (نگاه کنید به ملاحظات در 3.3.1 با  $\gamma_f = 1.5$ ):

- طراحی مدول الاستیک از CFRP:

$$E_j = 0.9 E_{fk} = 207000 \text{ MPa}$$

- فشار طراحی نهایی از CFRP:

$$\varepsilon_{ju} = \min \begin{cases} 0.9 f_f / E_f \\ 0.9 \varepsilon_{fu} / \gamma_f \end{cases} = 0.009$$

- ضخامت FRP ژاکت به دست آمده است از (2):

$$t_j = \frac{f_l}{2} \frac{d_j}{E_j \varepsilon_{ju}} = \frac{10}{2} \frac{300}{207000 \cdot 0.009} = 0.8 \text{ mm}$$

با توجه به برای هر لایه ضخامت معمول در حدود 0.17 میلی متر، 5 لایه CFRP مورد نیاز به منظور به دست آوردن افزایش ظرفیت تحمل بار عمودی 20٪ در ستون بتن مسلح با مقطع مستطیلی است.

#### تورق 4.2.2 ارتقاء داده شده

در زیر، سه معیار ارائه شده که هدف ارتقاء در تورق از عناصر ساختاری عمودی با آرماتور عرضی کافی نیست. با توجه به Seible و همکاران. (1995) ظرفیت تغییر شکل پلاستیکی لولا مناطق از عنصر گرد به قطر  $d_j$  می

توان با محدود هسته بتنی با افزایش مواد کامپوزیت با داشتن ضخامت:

$$t_j = 0.09 \frac{d_j (\varepsilon_{cu} - 0.004) f'_{cc}}{\phi_f \cdot E_j \cdot \varepsilon_{ju}^2} \quad (16)$$

که در آن ، برای مقاصد طراحی ، محدود بتن  $f'_{cc}$  می تواند برابر با 1.5 گرفته زمان محلی یک شرکت  $f'_{co}; E_j, \epsilon_{ju}$  **unconfined** هستند ، به ترتیب ، مدول الاستیک و نهایی فشار از کت در جهت پیرامونی (که برای آن ، ملاحظات در 3.1 درخواست ، با تغییرات در 3.5 در صورت لزوم) ،  $\phi_f$  عامل کاهش مقطعی است ظرفیت (معمولا به عنوان 0.9 گرفته) ،  $\epsilon_{cu}$  کرنش نهایی بتن مورد نیاز برای دسترسی مورد نیاز است تورق مقطعی. لازم به ذکر است که ارزش دومی این است که هدف آسانی ندارد تورق ، به طوری که لازم است برای انجام لحظه انحنای - تجزیه و تحلیل که از آن کرنش بتن مربوط به سطح تورق مورد نیاز به دست آمده است. محققان ژاپنی (Mutsuyoshi و همکاران 1999) به دنبال شیوه ای متفاوت ارزیابی نسبت به جابجایی عامل تورق از FRP - محدود ستون. طبق این رویکرد ، عامل تورق ممکن است به ظرفیت برشی تو پنجم مربوط  $V_u$  ، و به لحظه ای ظرفیت  $M_u$  از عضو پس از مقاوم سازی ، بر اساس معادلات تجربی از نوع :

$$\mu_{\Delta} = \alpha + \beta(V_u a / M_u) \leq 10 \quad (17)$$

که در آن است دهانه برشی و ثابت  $\alpha, \beta$  در نوع بستگی دارد (که deformability) از ایف. معادله طراحی جایگزین شده است (مونتی و همکاران 2001) پیشنهاد شده برای تورق ارتقا از ستون مدور با قطر D. معادله ناشی از تعریف بخش ارتقاء شاخص  $I_{sec} = \delta_{sec}^{tar} / \delta_{sec}^{ava}$  ، به نمایندگی از نسبت از هدف مقطعی تورق (به روز رسانی از طریق به دست آمده) و تورق در ابتدا در دسترس مقطعی (ارزیابی ارزیابی از طریق بخش های موجود). بازده معادله پیشنهادی مورد نیاز فشار محدود ، به عنوان تابعی از  $\epsilon_{ju}$  کرنش نهایی جو از ژاکت FRP (که برای آن ، ملاحظات در 3.1 درخواست ، با تغییرات در 3.5 در صورت لزوم) :

$$f_l = 0.4 I_{sec}^2 \frac{f_{cc,st} \cdot \epsilon_{cu,st}^2}{\epsilon_{ju}^{1.5}} \quad (18)$$

و آن را به عنوان تابعی از دو مقدار بیان شده است : 1)  $f_{cc,st}$  ، از موجود **steelconfined** بتن ، از طریق مشخص (Mander و همکاران سال 1988 ، نگاه کنید به بخش 3.3) :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} - 1.254 \quad (19)$$

با  $f_l$  از لحاظ عرضی تقویت  $\rho_{st}$  نسبت از قدرت و عملکرد آن محاسبه  $f_y$  ، به عنوان (بخش 3.2 را ببینید) :

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad \text{with} \quad \rho_{st} = \frac{4 A_{st}}{s d_s} \quad (20)$$

جایی که  $k_e$  = arching اثر ضریب (معمولا 0.8) ،  $s$  = stirrups فاصله ،  $A_{st}$  = منطقه stirrups ، و  $d_s$  =

قطر هسته محدود بتن و 2)  $\epsilon_{cu,st}$  از موجود فولاد بتن محدود ، محاسبه از طریق (بخش 3.4 را ببینید):

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_{st} f_y \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (21)$$

که در آن سو  $\varepsilon_{su} = \text{stirrups}$  کرنش نهایی، داشتن  $f_y$  قدرت عملکرد و با عرضی تقویت نسبت  $\rho_{st}$ .

این دو مقدار باید در مرحله اول به ارزیابی وضعیت فعلی ارزیابی ساختار (ارزیابی)، در حساس ترین بخش از این عنصر به ارتقاء داده شود در تورق، با در نظر گرفتن تنها سلول های ارائه شده توسط روابط موجود، که مقدار باید در محل اندازه گیری شد.

طراحی از ژاکت FRP با این روش می توان خلاصه به شرح زیر است:

1. محاسبه  $f_{cc,st}$ ، از (5) با  $f_l$  و  $\varepsilon_{cu,st}$  از (6)،

2. انتساب ارتقاء شاخص  $I_{sec}$ ، که، از چه مقدار اولیه در دسترس تورق باید افزایش یابد  $\delta_{sec}^{ava}$  در قسمت به

روز رسانی (ارزیابی از دسترس برنامه های کامپیوتری) به منظور به دست آوردن هدف تار تورق  $\delta_{sec}^{tar}$  همانطور که

در تعریف طراحی فاز)،

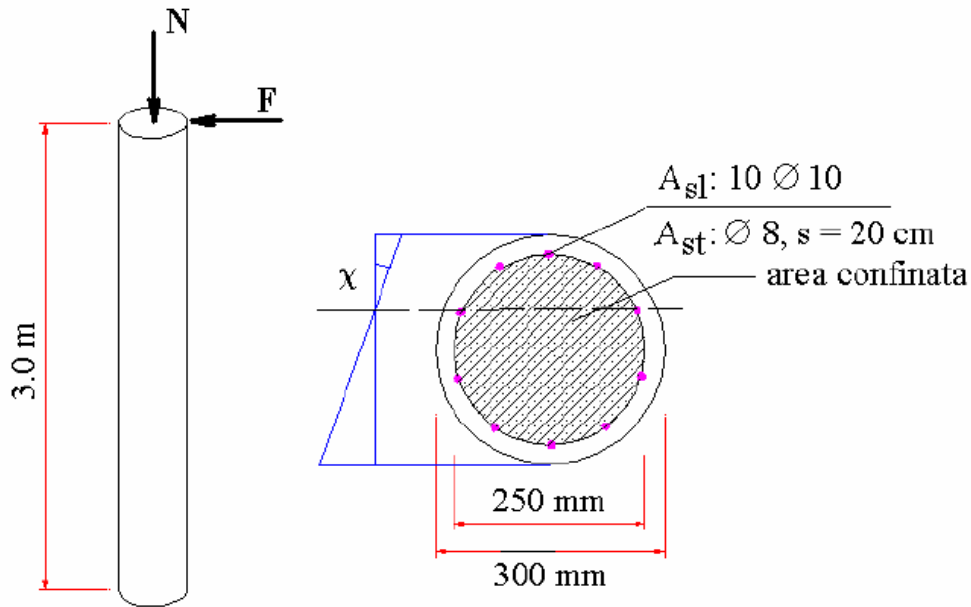
3. انتخاب مواد برای راکت FRP (و در نتیجه  $E_j$  و  $\varepsilon_{ju}$ )،

4. محاسبه فشار مورد نیاز محدود از (18)،

5. محاسبه ضخامت FRP از (2) با استفاده از ملاحظات در صورت نیاز در 3.5.

#### 4.2.2.1 مثال: ارتقاء لرزه ای از بتن مسلح با ستون مدور

این مثال نماینده مورد ارتقاء لرزه ای ستون بتن مسلح است نا منظم طراحی شده و ارائه تورق کمیاب در بخش پایه، در منطقه تشکیل بالقوه پلاستیکی لولا تحت زلزله (شکل 14). jacketing طراحی شده است در اطراف پایه ستون (با الیاف به صورت افقی گذاشته) به منظور به دست آوردن افزایش تورق انحنای برابر با 4 بار است که در دسترس است قبل از تقویت.



شکل 14. یک مثال از یک ستون بتن مسلح تقویت شده با FRP برای به دست آوردن افزایش 400٪ از تورق انحنای (ارتقاء لرزه نگاری).

خواص ستون		
3.0 m	ارتفاع	h
0.30 m	قطر بخش = قطر ژاکت محدود	$d = d_j$
0.25 m	روابط محدود با قطر هسته	$d_s$
100 kN	بار محوری	N
25 MPa	نامحدود مقاومت بتن	$f'_{co}$
430 MPa	تقویت قدرت فولاد	$f_{sy}$
	تقویت طولی : $10 \phi$ ، روابط : $8 \phi$ در 200 میلی متر	
خواص GFRP <sup>1</sup>		
65000 MPa	مدول الاستیک	$E_{fk}$
2.8 %	کرنش نهایی	$\epsilon_{fu}$
1.5	ضریب ایمنی جزئی	$\gamma_f$
<sup>1</sup> برای تورق ارتقاء GFRP استفاده شده است ، نگاه کنید به شکل 3.5		

• نسبت آرماتور عرضی :

$$\rho_{st} = \frac{4A_{st}}{s d_s} = \frac{4 \cdot 0.5}{20 \cdot 25} = 0.004$$

• تورق اولیه در دسترس انحنای مقطعی (کامپیوتر از طریق برنامه کامپیوتری) :

$$\delta_{\chi}^{ava} = 6.90$$

• شاخص به روز رسانی (تورق در دسترس ساخته شده است 4 برابر بزرگتر) :

$$I_{sec} = \frac{\delta_{\chi}^{star}}{\delta_{\chi}^{ava}} = 4$$

• خواص مواد GFRP انتخاب شده (با ملاحظات در 3.1 ، با  $\gamma_f = 1.5$ ) :

- طراحی مدول الاستیک از GFRP :

$$E_j = 0.9E_{fk} = 58500 \text{ MPa}$$

- فشار طراحی نهایی GFRP :

$$\epsilon_{ju} = \min \begin{cases} 0.9 f_f / E_f \\ 0.9 \epsilon_{fu} / \gamma_f \end{cases} = 0.0168$$

• مورد نیاز محدود فشار اعمال شده توسط ژاکت GFRP :

روش :

(1) محاسبه اعمال فشار محدود توسط  $f_l$  روابط خود را با فولاد (1) :

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y = \frac{1}{2} 0.8 \cdot 0.004 \cdot 430 = 0.7 \text{ MPa}$$

(2) محاسبه روابط فولاد محدود خیابان استحکام بتن  $f'_{cc,st}$  با (5) :

$$\frac{f'_{cc,st}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} - 1.254$$

این است که:

$$f'_{cc,st} = 1.18 \cdot f'_{co} = 1.18 \cdot 25 = 29.5 \text{ MPa}$$

که از:

$$f'_{cc,st} = 1.18 \cdot f'_{co} = 1.18 \cdot 25 = 29.5 \text{ MPa}$$

(3) محاسبه روابط فولاد محدود بتن کرنش نهایی مس خیابان  $\epsilon_{cu,st}$  با (6) :

$$\epsilon_{cu,st} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_{st} f_y \epsilon_{su}}{f'_{cc,st}} = 0.004 + \frac{1.4 \cdot 0.004 \cdot 430 \cdot 0.02}{29.5} = 0.0056$$

(4) محاسبه اعمال فشار محدود توسط  $f_l$  GFRP با (18) :

$$f_l = 0.4 I_{sec}^2 \frac{f'_{cc,st} \cdot \epsilon_{cu,st}^2}{\epsilon_{ju}^{1.5}} = 0.4 \cdot 4^2 \frac{29.5 \cdot 0.0056^2}{0.0168} = 2.7 \text{ MPa}$$

• ضخامت ژاکت FRP به دست آمده است از (2) :

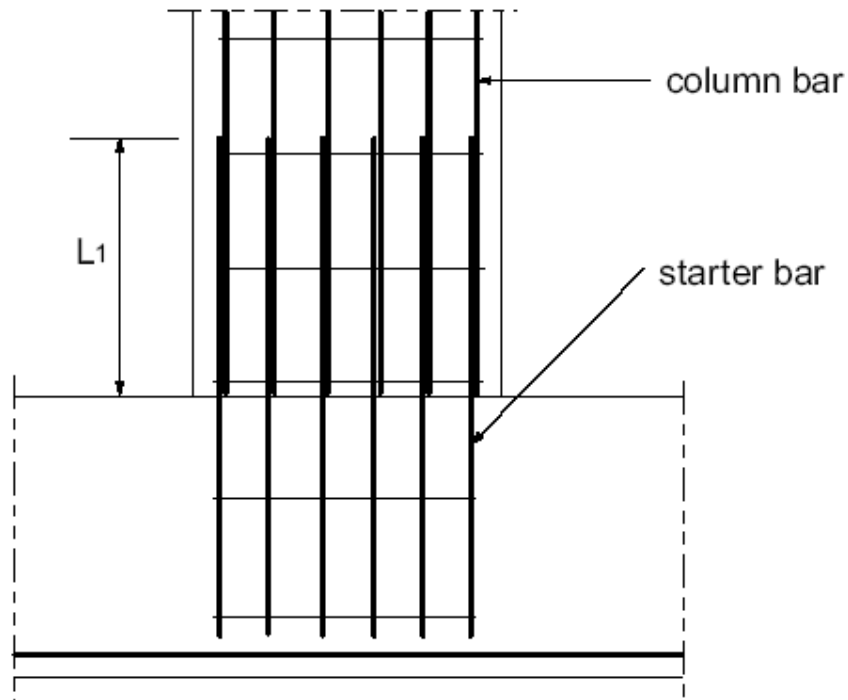
$$t_j = \frac{f_l}{2} \frac{d_j}{E_j \epsilon_{ju}} = \frac{2.7}{2} \frac{300}{58500 \cdot 0.0168} = 0.4 \text{ mm}$$

با توجه به اینکه هر لایه دارای ضخامت معمول در حدود 0.17 میلی متر ، 3 لایه GFRP به منظور به دست آوردن تورق 4 برابر بزرگتر از یک در ابتدا در دسترس است.

### 4.3 دامان - اسپلایس شکست

از مطالعات اخیر بر روی ساختمان های قدیمی و پل ها در مناطق لرزه ای ، از آن شده است به رسمیت شناخته شده که این سازه ها اغلب به حال تقویت طولی ناقص در دامان پلاستیکی بالقوه - spliced لولا منطقه (شکل 15). در طرح های از پیش ies70 ، شلپ کردن طول معمولاً 20-35 برابر قطر بار ، که خیلی کمتر به توسعه قدرت نهایی شد از میله های زندان ، و به این ترتیب استحکام خمشی نظری ستون. همچنین برای موارد با بزرگتر شلپ شلپ کردن ، باهم متصل کردن طول ، اگر تقویت عرضی کافی نباشد به تولید بیش از حد کم فشار سلول مهار شکست

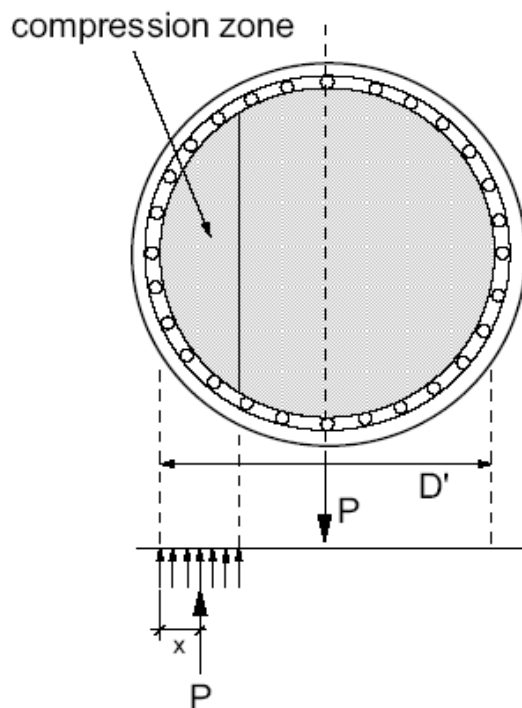
اسپلایس ، سقوط است به احتمال زیاد رخ می دهد اگر بخش ستون مورد نیاز بالا و یا حتی سطوح تورق متوسط است.



شکل 15. پایه ستون با میله نمونه دامان - spliced طولی.

گاهی اوقات تقویت طولی در **midheight** از ستون فسخ ، بر اساس پاکت لحظه. وقتی این کار بدون حسابداری موثر طراحی شده تغییر مکان به علت تنش برشی مورب ترک خوردگی ، ناخواسته **hinging** پلاستیکی ممکن است در این اتفاق می افتد منطقه است. این می تواند به آسیب شدید منجر شود ، به عنوان مورد در ژاپن در سال بود **Urakawa** - **oki** زلزله در سال 1982. در این مورد ختم در اواسط ارتفاع با شد طول توسعه ناکافی تنها 12 برابر قطر نوار. شواهد تجربی نشان می دهد که استحکام خمشی ستون با استفاده از دامان - **spliced** تقویت طولی در پلاستیک بالقوه لولا تنزل منطقه به سرعت به ارزش برابر با که است که می تواند توسط نیروی فشاری محوری در ستون پایدار ، بدون سهم از تقویت ، با استفاده از اندازه بخش کاهش می یابد به داخل لایه گرفته از آرماتور طولی ، همانطور که در شکل 16 نشان داده شده است. قدرت متناظر است :

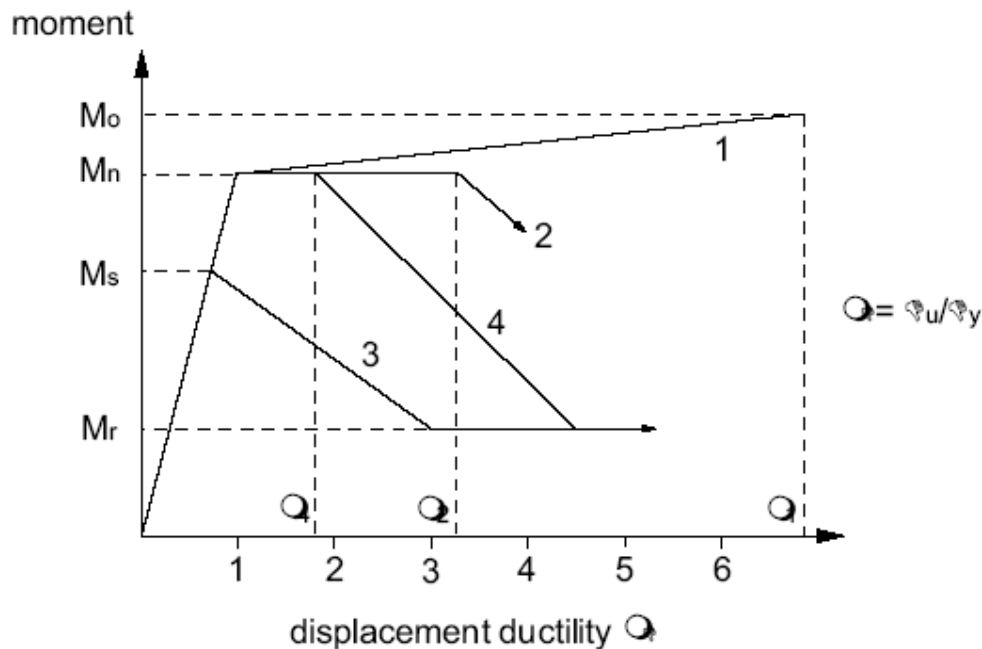
$$M_R = P \left( \frac{D'}{2} - x \right) \quad (22)$$



شکل 16. باقیمانده ظرفیت لحظه ای از ستون ها پس از دامان - اسپلایس شکست.

#### 4.3.1 مدل از استحکام خمشی و تورق بخش ستون

از مطالعه در حلقه پسماند عادی از ستون مدور ، مدل زیر شرح استحکام خمشی و تورق بخش ستون پیشنهاد شده است ، همانطور که در نشان داده شده است شکل 17.



شکل 17. استحکام خمشی و تورق جابجایی ستون ها.

خط (1) نمایندگی های دو خطی از ستون نسبتا خوب محدود است. ظرفیت اسمی لحظه در  $\mu_{\Delta} = 1.0$  رسیده است ، و  $M_0$  ظرفیت به دست آمده در  $\mu_1$  . لحظه  $M_0$  overstrength تجاوز به عنوان یک نتیجه از فشار ، سخت شدن  $M_n$  تقویت خمشی و اثرات سلول.

خط (2) نشان دهنده یک ستون بدون دامان - splices ضعیف محدود در پلاستیکی لولا منطقه است. حداکثر قدرت کند  $M_n$  ، و تورق جابجایی حداکثر تجاوز نمی کند عامل  $\mu_2$  است در مکاتبات از حصول  $\epsilon_{cu} = 0.005$  (ضعیف محدود در بر داشت بتن). ارزش نمونه از  $\mu_2 = 3.0$  خواهد شد در بر داشت.

هنگامی که محدودیت های خطوط از تورق (1) و (2) می رسید ، به سرعت تنزل قدرت با توجه به خرد کردن از هسته بتنی و کمانش از تقویت طولی.

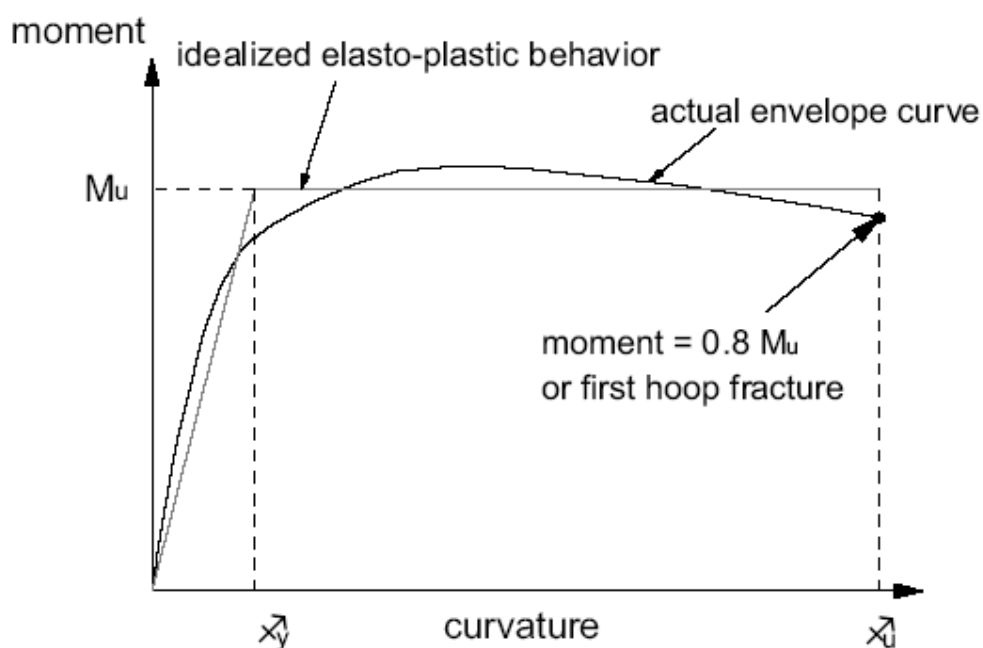
خط (3) نشان دهنده انحطاط از یک ستون با دامان - splices ، که در آن اسمی لحظه ظرفیت  $M_n$  نمایش داده نمی شود به دست آورد. قدرت شروع می شود یا اهانت آمیز در کمتر از  $\mu_{\Delta} = 1.0$  از حداکثر قدرت  $M_S$  به قدرت  $M_r$  باقی مانده.

خط (4) نشان دهنده انحطاط از یک ستون با دامان - splices ، که در آن اسمی لحظه ظرفیت  $M_n$  حاصل خواهد شد ، و تخریب زمانی اتفاق می افتد سطح تورق  $\mu_4$  است توسعه یافته مربوط به فشار شدید فشرده سازی بتنی (unconfined)  $\epsilon_c = 0.002$  .

جابه جایی و انحنای ظرفیت تورق از ستون خواهد شد محدود جابه جایی  $\Delta_u$  نهایی و نهایی انحنای  $\phi_u$  است که می تواند توسط ستون های پایدار بدون سقوط. تعریف از این ارزش ها است تا حدودی ذهنی است ، اما به خوبی به تصویب رسید رویکرد برای ستون های بتن آرمه است که تعریف این مقادیر به عنوان جابه جایی (انحنای) مربوط به یکی از دو شکست برای اولین بار از تقویت محدود در پلاستیک لولا ، که منجر به تخریب سریع اجرا ، یا به یک کاهش

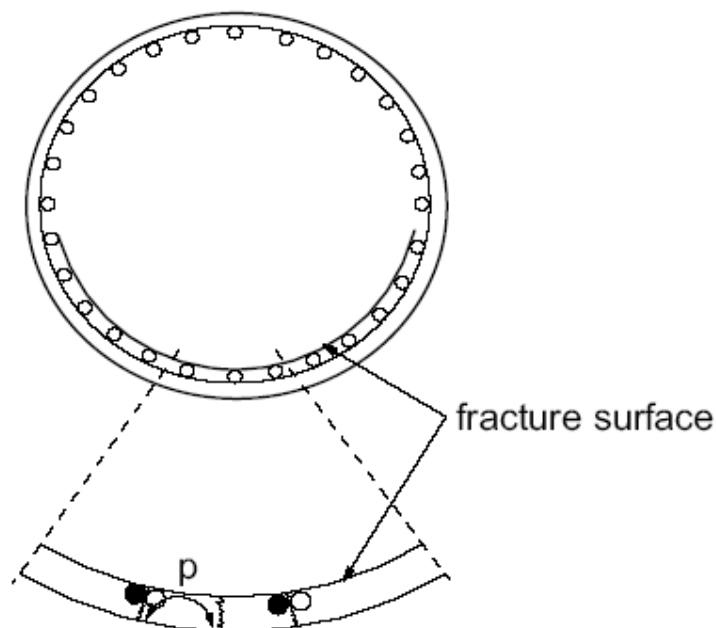


20٪ در لترال بار (لحظه ای) ظرفیت پس از حداکثر قدرت رسیده شده است ، همانطور که در شکل 18 نشان داده شده است.



شکل 18. تعریف انحنای نهایی.

مکانیزم شکست پیشنهاد شده توسط Priestley و همکاران. (1994) برای توصیف رفتار splices دامان در بخش مهمی از ستون ها ، شامل توسعه موازی ترک عمودی به میله ستون. برای این ترک به منظور توسعه ، می توان آن را نشان داده است که سطح کرک دوم در داخل میله ستون و به موازات این هواپیما باید از تقویت به منظور تسهیل توسعه اتساع جانبی توسط ترک های عمودی را دارد. برای شکست به رخ می دهند ، ممکن است که فرضیه منطقه در ارتباط با نوار ستون باید از بتن متصل به استارت جداگانه نوار ، همانطور که در شکل 19 نشان داده شده است.



شکل 19. مکانیزم شکست دامان - splices در ستون مدور  
تنش کششی لازم برای شکست سطح این ممکن است به عهده گرفت برابر با مستقیم قدرت کشش :

$$f_t = 0.33\sqrt{f'_c} \quad (23)$$

برای ستون مدور با میله  $n$  طولی، پوشش  $c$ ، قطر  $d_b$ ، گام rebar دایره قطر  $D'$  طول،  $l_s$  نیروی کششی در کل بر روی سطح پارگی در شکست خواهد شد

$$T_b = f_t \left[ \frac{\pi D'}{2n} + 2(d_b + c) \right] l_s = f_t p l_s \quad (24)$$

فسفر که در آن محیط از سطح شکاف است.  $T_b$  پارامتر نیروی است که می تواند حداکثر است در نوار ستون توسعه مگر اینکه قابل عرضی سلول وجود داشته باشد. اگر  $T_b > A_b F_y$ ، نوار می تواند نیروی عملکرد آن، توسعه و ایده آل اولیه ممکن است استحکام خمشی توسعه یافته. اگر  $T_b < A_b F_y$  خواهد شکست باند در کمتر از استحکام خمشی رخ می دهد، با سریع تخریب قدرت تحت بارگذاری چرخه ای. حتی اگر (24) نشان می دهد که قدرت را می توان نوار کاملا رشد یافته است، تورق در دسترس خواهد بود کوچک. شکست باند به نظر می رسد اجتناب ناپذیر در ضعیف محدود دامان - splices زمانی که این ها *cyclically* لود می شود. با این حال، اگر سلول کافی موجود است، ترک می تواند موجود است، و مقاومت اصطکاکی در سراسر شکاف ارائه شده توسط فشار بستن ممکن است کافی به توسعه قدرت نوار. آزمایش ها نشان می دهد که محدود است به گونه اتساع است که می تواند وجود داشته باشد مجاز قبل از لغزش باند رخ می دهد. این گونه است که تقریباً در

$\epsilon_d = 0.001$  . برای اطمینان از اینکه شکست باند نشانی از توسعه نیست بدون در نظر گرفتن سطح تورق ، استرس محدود مربوطه به اتساع شعاعی از  $\epsilon_d = 0.001$  باید کافی باشد برای توسعه استحکام کششی از نوار. برای ستون مدور با hoops عرضی یا ماریچ به حرکت در مقطعی از منطقه  $A_b$  در فاصله S ، تنش مؤثر محدود در  $E_s = 200 \text{ GPa}$  ، با  $\epsilon_d = 0.001$  خواهد شد.

$$f_l = \frac{400 A_b}{D' s} \text{ MPa} \quad (25)$$

د که در آن  $D'$  حلقه یا ماریچی می باشد. اجازه دادن ضریب  $\mu = 1.4$  در شکاف سطح ، نیروی کششی توانا در بودن در نوار توسعه یافته است ، با قیاس با (24) :

$$T_b = 1.4 f_l \left[ \frac{\pi D'}{2n} + 2(d_b + c) \right] l_s \quad (26)$$

برای هیچ شکست باند بالا در تورق است ،

$$T_b \geq A_b f_u \approx 1.5 A_b f_y \quad (27)$$

ترکیبی از دو معادله قبلی ، فرمول حداقل مؤثر فشار سلول مهار شکست اسپلایس به دست آمده است :

$$f_l \geq \frac{1.5 A_b f_y}{1.4 \left[ \frac{\pi D'}{2n} + 2(d_b + c) \right] l_s} \quad (28)$$

از کجا  $A_b$  منطقه به صورت مقطعی انجام یک نوار طولی است.

حد پایین تر را به دامان  $l_s$  طول زیر که شکست باند نیز ایجاد می شود وجود دارد نظر از استرس محدود توسط تقویت عرضی فراهم شده است. نمایش نتایج : از آزمون نشان می دهد که استرس باند مؤثر ممکن است به عنوان گرفته شده است :

$$\mu_u = 1.5 \sqrt{f'_c} \text{ MPa} \quad (29)$$

بنابراین طول اسپلایس حداقل آن باید امکان توسعه قدرت نوار نهایی است

$$l_{s, \min} \cong \frac{1.5 A_b f_y}{\pi d \mu_u} \cong \frac{0.25 d f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (30)$$

توسعه فقط نوار قدرت عملکرد ، ضریب باید به جای  $0.167$   $0.25$  معادله. (30) نیز ممکن است مورد استفاده قرار گیرد برای تعیین مقدار کافی از لنگرگاه های مختلف از میله های زندان در مکان ، مشخصه مانند زانو مفاصل. اگر

پلاستیکی ستون لولا در بالا انتظار می رود ، eqs. (24) ، (26) و (27) اعمال خواهد شد. اگر ستون نمی خواهد به صورت پلاستیکی لولا در بالا ، قدرت ، عملکرد و نه از استحکام نهایی نوار ، ممکن است در مورد استفاده (27). همانطور که در بالا ذکر شد ، شکست اسپلایس می تواند با ارزیابی از کششی پیش بینی ظرفیت استرس در سراسر سطح تقسیم شکست بالقوه است. پس از ترک خوردگی توسعه در این رابط ، نارسایی اسپلایس می تواند مهار فشار محدود ارائه می شود کافی است مطمئن بدون اتساع بیش از حد. آزمایشات نشان میدهد که فشار بحرانی اتساع شعاعی است  $\epsilon_d = 0.001$  Priestley و همکاران. (1994) مشتق شده زیر نیز قابل قبول بیان ، که بدست آمده است از (28) ، جهت محاسبه حداقل فشار مورد نیاز سلول برای جلوگیری از باند شکست تقویت دامان - spliced طولی :

$$f_l \geq \frac{A_b f_y}{\left[ \frac{\pi D'}{2n} + 2(d_b + c) \right] l_s} \quad (31)$$

که در آن  $A_b$  ،  $d_b$  و  $f_y$  هستند با قطر ، سطح استرس و عملکرد یک نوار طولی spliced ،  $D'$  است قطر دایره گام از تقویت ، آن است که تعدادی از کافه ها ،  $c$  است پوشش بتن ضخامت و  $l_s$  طول نوار استارت است. این فشار سلول باید در دسترس باشد در بحرانی فشار شعاعی از  $\epsilon_d = 0.001$  ، و می توان به ویژگی ای مرتبط با مقاوم سازی استفاده می شود مفهوم :

$$f_l = \frac{\rho f_s}{2} \quad (32)$$

$$f_s = E_j \epsilon_d \quad (33)$$

$$\rho = \frac{4t_j}{D} \quad (34)$$

بنابراین ، حداقل ضخامت فولاد موثر منفعل یا ژاکت FRP می تواند به عنوان بیان شده :

$$t_j \geq \frac{D f_l}{2 E_j 0.001} = \frac{500 D f_l}{E_j} \quad (35)$$

که در آن  $E_j$  مدول موثر از کشش در جهت عرضی بخش است اتساع. این رابطه برای هر دو معتبر است فولاد و FRP محدود دامان - spliced بخش. هنگامی که این معادله است که تصور می شود درست است ، روشن است که کت پشم شیشه منفعل ، و در برخی حد نیز ژاکت کربن هستند ، بهترین راه حل ، با توجه به (زیاد) خشکی کمتر در نمی نسبت به فولاد. در نظر بگیرید با کت پشم شیشه  $E_j = 40,000$  مگاپاسکال ، و سپس ضخامت 5 برابر بزرگ تر از با ژاکت فولاد مورد نیاز است. هنگامی که مواد FRP - استفاده می شود ، روشن است که لایه فعال است راحت

تر. برای ترکیبی از ژاکت FRP فعال و غیر فعال ، (35) می شود :

$$t_a E_a + t_p E_p \geq 500D (f_l - f_a) \quad (36)$$

که در آن  $E_p$  و  $t_a$ ،  $t_p$ ،  $E_a$  هستند ضخامت و قدر مطلق کشش فعال و غیر فعال لایه ها به ترتیب ، حذفی و  $f_a$  ناشی از محدود فعال در ستون است.

با توجه به Priestley و همکاران. (1994) آزمون نشان می دهد که در آن نسبت طولی تقویت انجام 2.5٪ تجاوز نمی کند و نسبت بار محوری آنها کمتر از  $v = 0.15$  ، به شرح زیر است رویکرد تقریبی عملکرد رضایت بخش ارائه خواهد شد.

### 4.3.2 سلول از لولا های پلاستیکی با دامان – splices

فراهم می کند که  $f_l = 2.0$  مگاپاسکال در فشار اتساع از  $\epsilon_d = 0.001$ . با این ، حداقل موثر ضخامت مورد نیاز از یک ژاکت می تواند به عنوان بیان شده :  
برای فولاد و منفعل FRP

$$t_j \geq \frac{Df_l}{2E_j 0.001} = \frac{1000D}{E_j} \quad (37)$$

برای فعال / غیر فعال FRP

$$t_a E_a + t_p E_p \geq 500D (2 - f_a) \quad (38)$$

## زلزله و تقویت برشی نیربتن آرمه با FRP

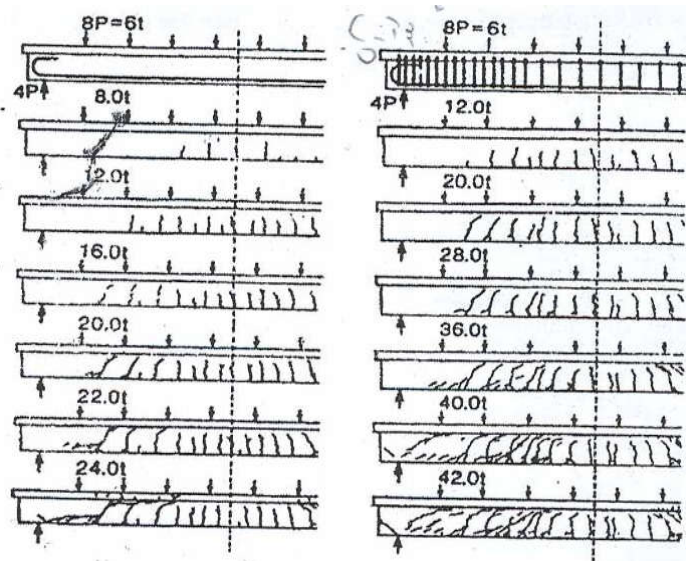
### 4. نبروی برشی

در این فصل فرضیه و کد آئین نامه هایی را که برای مدل های متمایز حمل بار برای برش استفاده می شود در این پایان نامه ( کار تحقیقی ) نشان داده شده است . در بخش 4-2 مدهای گسیختگی برای برش و رفتار آن تحت بارگذاری شرح داده شده است . علاوه بر این مدل براساس BBK94 و زاویه متغییر مدل خرپا که در EC2 استفاده شده به همراه جزئیات در بخش های 3-4 و 4-4 توصیف شده است . تقویت کردن با فیبر به وسیله ی تقویت پلیمر ، FRP در بخش 4-3-6 مورد بحث قرار گرفته است . فرضیه بعد از فرضیه فیلد تراکم ( CFT ) و فرضیه فیلد تراکم ویرایش شده ( MCFT ) در بخش 4-5 و 4-6 توضیح و نمایش داده شده است .

### 1.4. مقدمه

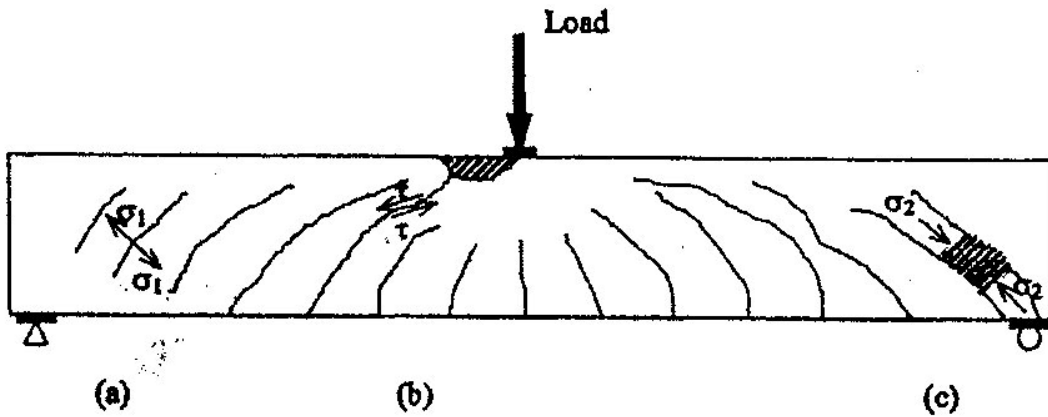
یک بحث روشن و گویا در سال ( 1997 ) توسط ( Collins & Mitchell ) در مورد مقاومت برش وجود دارد که خلاصه آن به شرح زیر است . تعیین مقاومت برش وظیفه آسانی نیست و هنوز قوانین عمومی در مورد مدل فیزیکی آن برای محاسبات وجود ندارد تا عمل ترکیب بارگذاری شده به وسیله برش و رفتار آن شرح داده شود ( تا رسیدن به خطاهای نهایی ) شکاف برش به روش های متفاوتی در محل های طولی و عمودی در طول نورد می تواند شکل بگیرد . که زاویه شکاف به پارامترهای زیادی وابسته است . شکل 4.1.1 رفتار تیر را در تست های ( march ) نشان می دهد . تا سطح تقسیم بار گذاری را به صورت یکنواخت افزایش دهد یا ( سطح افزایشی را بطور یکنواخت تقسیم بار کند )

یک تفاوت قابل توجه بین تیر وجود دارد و آن این است که در یک تیر ( بسته ای از آرماتور های طولی ) وجود دارد که در دیگری نیست . که شکل آن در تصویر 4.1.1 نمایش داده شده است در ابتدا رفتار دو تیر بسیار شبیه همدیگر است در هر دو تیر ترک های خمشی ( مار پیچ ) شکل می گیرد که در نقطه ی وسط دهانه به وسیله ی بارگذاری در حدود 8 tons و یا 20tons توسعه داده می شود . شکاف ها یا ترکهای خمشی بیشتر روی span (دهانه) شکل می گیرند و توسعه می یابند . در تیر بدون آرماتور های طولی ترکهای خمشی - برشی بوسیله 20tons با یک خطای کوچک توسعه داده می شوند . تیر شامل آرماتور های طولی برای حمل بار بعد از ترکهای خمشی - برشی کار خود را ادامه می دهد با بار حدود 36 tons . ترکهای مایل تحت زاویه ای شکل داده و خم می شوند. تیر سرانجام در نقطه وسط دهانه با بار 42tons می شکند .



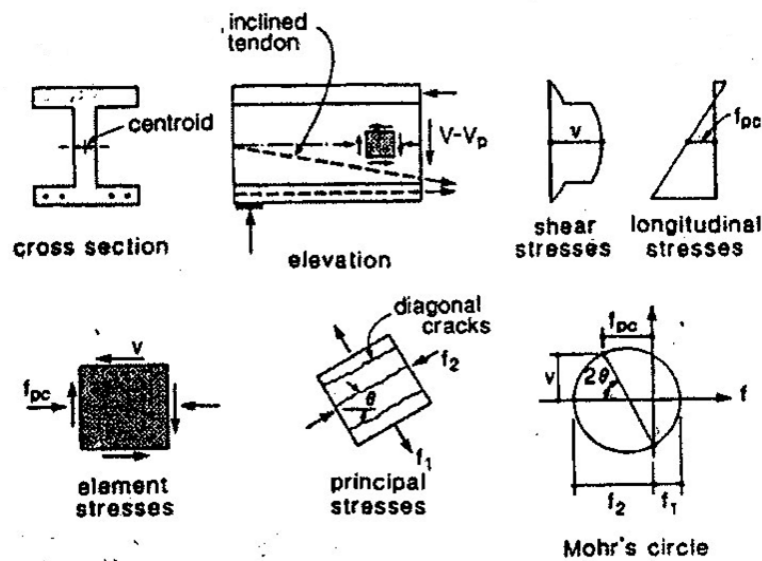
هدف از طراحی برش جلوگیری از شکست زودرس برش است که به طور مثال به وسیله تیرهای بدون آرماتورهای طراحی بالا شرح داده شده هدف این است که اعضا ظرفیت برش را تا حد بالایی طراحی کنند و مطمئن باشند که نقص رخ نخواهد داد .

2.4 مد های خطا و نقص



در شکل 4.2.1 علت وقوع خطاهای برش شرح داده شده است  
 (a) خطای امتداد برش جایی است که قدرت کشش از بتن فراتر از فشار کشش است  
 (b) خطای خمش برش شروع می شود با یک ترک خمشی تا یک خطای برش وقتی که محدوده تراکم بوسیله ترک برش بریده می شود  
 (c) خطای تراکم برش پشتیبانی می کند وقتی که فشار فشرده فراتر از قدرت تراکم بتن شود  
 1.2.4 رفتار قبل از ترک یا شکاف

نیروی برش حمل شده توسط بتن با نیروی برش اعمال شده برابر خواهد بود. در مرکز ثقل تیر بتن در عرض فشار برش خواهد بود فشار فشرده طولی قبل از فشار. نتیجه فشار کششی که می تواند Mohr's تعیین شود از روی دایره موهر (



تنش کششی اصلی بر روی مساحت مقطع در جهت قائم تغییر می کند برای اینکه تنش برشی،  $V$  تغییر می کند و برای اینکه گشتاور بوسیله خروج از مرکزیت نیروی محوری.

تنش های برشی طبق نظریه قابلیت ارتجاع (الاستیسیته) در جان تیر از فرمول زیر بدست می آید:

$$\tau = \frac{SV}{I_z b_v} \quad (4.2.2)$$

در این فرمول:  $S$  = گشتاور استاتیک،

$V$  = نیروی برشی در مقطع

$I_z$  = گشتاور دوم اینرسی در راستای  $Z$

$b_w$  = عرض موثر

تنش های فشاری  $f_{pc}$ ، فشار در جان تیر می توانند از معادله naviers بدست آید:

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M}{I} Y \quad (4.2.3)$$

در این فرمول:  $P$  = نیروهای عمودی فشاری

$A$  = مساحت سطح مقطع بتن

$$M_{bend} + M_{prestress} = M$$

$M_{bnd}$  = بارگذاری گشتاور خمشی

$$P.e_s = M_{prestress}$$

$e_s$  = خروج از مرکزیت نیروی محوری

$I$  = گشتاور دوم اینرسی

$Y$  = فاصله تا مرکز گرانش

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M_{bend} + N.e_s}{I}$$

2.2.4 رفتار بعد از ترک:

بتن ترک برمی دارد موقعی که  $f_t$  به تنش های ترک خورده می رسد  $f_{cr}$ . تنش های برشی که ترک های میل را بوجود می آورند از دوباره از معادله 1.2.4 بدست می آیند مانند:

$$(4.2.5)$$

ترک های مایل در راستای تنش فشاری اصلی بوجود می آید. ترک های مایل را می توان از دایره موهر بدست آورد شکل را 2.2.4 ببینید مانند:

4.2.6)

$$\tan 2\theta = \frac{2v}{f_{pc}} \quad ($$

3.2.4 رفتار در شکست

رفتار از شکافتن و بالا به شکست نهایی موضوع پژوهش فشرده است. نظریه ها توسعه داده شده اند که کشش، برش، خمش و فشار را توضیح بدهند. حتی در اخیرترین نظریه های وابسته زمان، حرارت، خزش و کرنش مایل هستند.

پاسخ 2000 تحلیل مقطع بتن مسلح، براساس نظریه میدان فشردهگی اصلاح شده، MCFT

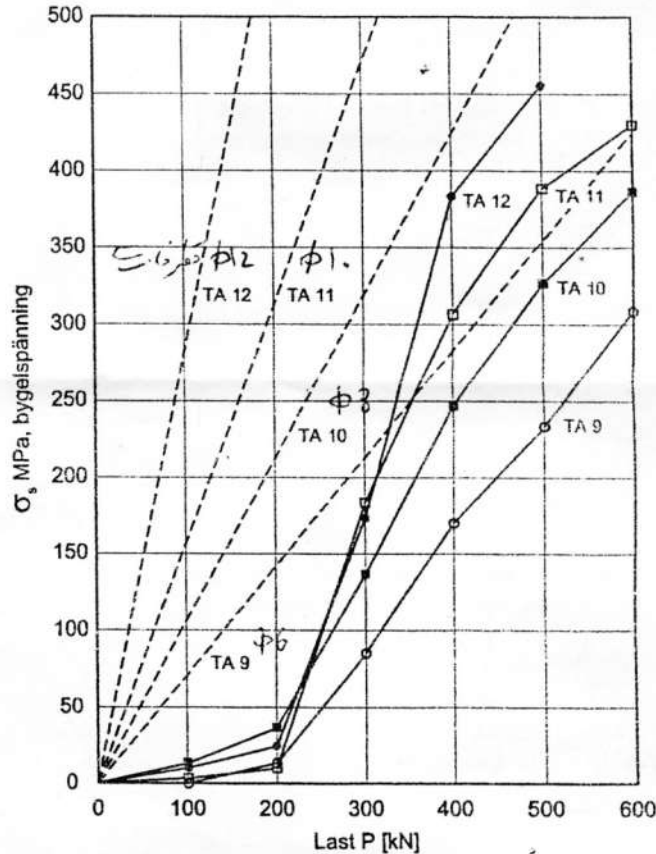
می تواند نمودار ارائه بدهد که مراحل متفاوت را بطرف شکست  $D$  پیوست دیدن روشن بسازند.



3.4. آیین نامه ی سوئدی bbk94.

1.3.4. معرفی

طرح برش بر طبق (westerbreg 2002b) در BBK94 رمز سوئدی مبنی بر مدل جمع نامیده شده است جائیکه برش ظرفیت وقتیکه حاصل جمع از یک کمک بتون vc+vp شمرده شده است و یک کمک عرضی برش تقویت  $V_s$  بهم فشردگی استفاده نمودن بتون زاویه 45 درجه مشکل می گیرد.



روش جمع تجربی است و حتی ادعا کردن نیست که رفتار مقطع بتون در برش شکست توصیف بکند. اساس تجربه زیاد است حتی اگر آنجا نسبتاً آزمایش های به اندازه طبیعی در ساختمانهای زیاد چنانچه پل بزند. موقعی که اندازه گیری تنش در برش تقویت آن پیدا شده است تنش است که اندک قبل از شکافها تاسیس شده است. تنش سپس در همان زاویه در 45 truss درجه مدل افزایش می یابد. این را شکل 1-3-4 روشن ساخته است. خط شکسته نشان می دهد تنش طبق مدل 45 درجه حامل و نقطه شمرد و خط پیوسته نشان می دهد تنش در آزمایش ها را اندازه بگیرد.

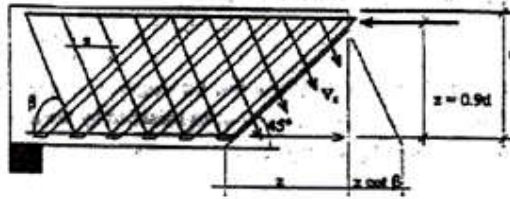
خطها تنش سنجیده همان زاویه حساب شده دارند اما مسافت موازی انتقال داده شده اند که به بارگیری تطبیق می کند یا بتون  $V$  ظرفیت برد.

4.3.3.  $V_s$ ، سهم از تقویت مورب

سهم از تقویت مورب بر طبق مدل اصلی Morsch برای برش محاسبه می شود. دراین به اصطلاح مدل تیر مشبک 45، بخش 4.3.3.1 را ملاحظه کنید، شکاف برشی در یک زاویه  $\theta = 45^\circ$  گسترش میابد و تقویت برشی در یک

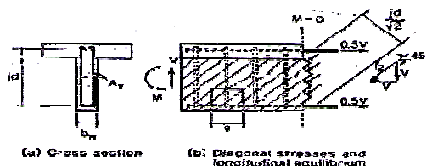
$$V_s = \frac{A_w f_w \cdot 0.9d}{s} (\sin \beta + \cos \beta)$$

زاویه  $\beta$ ، شکل 4.3.3 را ملاحظه کنید. نیروی برشی که به وسیله تقویت مورب مقاوم شده است از فرمول زیر بدست می آید



شکل 4.3.3 اصطلاح تقویت برشی،  $V_s$ ، برگرفته از مقطعی است که در آن تقویت برشی دارای زاویه  $\beta$ ، و عمق برش،  $Z$ ،  $0.9d$  در نظر گرفته شده است که  $d$  ارتفاع مفید مقطع می باشد. گابریلسون (1999) 4.3.3.1 مدل تیر مشبک  $45^\circ$

در مدل تیر مشبک  $45^\circ$ ، کالینز و میچل (1997) را ملاحظه کنید، تنشهای تراکمی مورب در بتن همانند اجزای تیر مشبک عمل می کند در حالیکه میلگردها به عنوان اجزای تنش عمودی عمل می کنند. قلاب سر دکل تیر مشبک از تقویت کششی طولی تشکیل شده است در حالی که منطقه تراکمی خمشی تیر مثل یک یال خرپا عمل می کند. شکل 4.3.4 را ملاحظه کنید



شکل 4.3.4 ملاحظات موازنه برای تیر مشبک  $45^\circ$ ، کالینز و میچل (1997)

$$V\sqrt{2} \quad \frac{f_c \cdot b \cdot jd}{\sqrt{2}}$$

از آنجایی که نیروی تراکمی مورب کلی برابر است با، تنش تراکمی اصلی از فرمول زیر بدست می آید:  
مولفه طولی نیروی تراکمی مورب  $V$  می باشد، شکل 4.3.4 b را ملاحظه کنید، در یک تقویت طولی این نیرو باید با یک نیروی کششی،  $N_v$ ، خنثی بشود. از این رو نقطه کششی در یک تقویت طولی ایجاد شده به وسیله  $f_c \cdot b \cdot jd$  فرمول زیر تعیین می شود  
بر اساس نمودار جسم آزاد (ایستایی) نشان داده شده در شکل 4.3.4 c دیده می شود که نیروی تراکمی مورب،

کارای یک مولفه عمودی است که باید با ایجاد یک نیروی کششی در میلگرد،  $A_v f_v$ ، متعادل شود که با جایگزین کردن بجای  $F_2$  در معادله 4.3.2 داریم

که در اینجا  $A_v$  مساحت سطح مقطع پایه های میلگرد،  $S$  فاصله میلگرد،  $F_v$  تنش کششی در میلگردها است.  
4.3.4  $V_p$ ، ظرفیت برشی در رابطه با پیش فشرده کردن و نیروهای تراکمی محوری در ساختارهای بتنی تقویت شده و ساختارهایی که در آنها از نیروهای تراکمی محوری بهره برده شده است ظرفیت برشی در رابطه با تنشهای تراکمی

اضافی در سطح مقطع افزایش پیدا می کند. افزایش برش با عبارت نشان داده می شود. اصطلاح اضافی دیگری نیز در نیروی برشی مد نظر قرار می گیرد که بیانگر بار مورب بیرونی است که باعث عدم تغییر شکل در بخش کششی مقطع می شود. در این روش نیروهای تراکمی که از شکافهای خمشی که باعث گسترش و سرانجام یک از هم گسیختگی برشی می شوند باید مورد توجه قرار گیرند فرمول بصورت زیر ارائه شده است

که در اینجا

$$M_{d \max} = \text{حداکثر گشتاور خمشی بعلت طرح بارهای مورب در مقطع حقیقی}$$

$M =$  گشتاور خمشی که باعث عدم تغییر شکل در همان مقطعی می شود که  $M_{d \max}$  در آن تاثیر داشته است. شکل 4.3.5 را مشاهده کنید.

$1.2y_m =$  ضریب اطمینان جزئی، این ضریب به خاطر این است که برای هر دو  $V_c$  و  $V_p$  به یک میزان سطح اطمینان ناتوانی در نظر گرفته شود.

در مورد ساختار بتن پیش فشرده گشتاور خمشی بدون تغییر شکل با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود

$$\sigma = \frac{M_0}{I} = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_s}{W_{top}}$$

$$M_0 = P \left( e_s + \frac{W_{top}}{A} \right) V_{top}$$

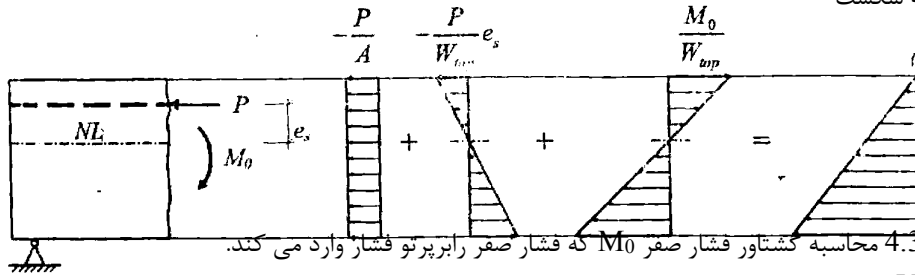
در حالیکه

$P =$  برابر است با نیروی فشاری در مرکز به عبارت دیگر پس از صدمات ابتدایی فشار

$e_s =$  نیروی پیش فشرده خروج از مرکز

$W_{top} =$  مقاومت بخش که همان گشتاور دوم اینرسی  $I$  تقسیم بر مسافت  $l$  به فشار مرزی بخش

$A =$  ناحیه شکست



تصویر 4.3.5 محاسبه گشتاور فشار صفر  $M_0$  که فشار صفر را برپرتو فشار وارد می کند.

4.3.5،  $V_i$ ، حجم شکست به علت تنوع در عمق اثر یا نیروی اریب غیر افقی

هنگام محاسبه  $V_i$ ، مسیر فشار و یا نیروی کشش با توجه به مسیر اغراف در نظر گرفته می شود

گشتاور منفی: ش

$$V_i \sim F_c \tan \alpha$$

$$F_c = \frac{M_{sum}}{z} + \frac{A_{bf}}{A_c} P - \frac{V_d - V_i}{2} = \frac{M_{sum}}{z} + \frac{A_{bf}}{A_c} P - \frac{V_d - F_c \tan \alpha}{2}$$

در حالیکه:

$$M_{corr} - M_s = M_{sum}$$

$$M_{corr} = \text{گشتاور برابر با}$$

$e_s =$  نیروی پیش فشرده خروج از مرکز

$A_{bf} =$  ناحیه شخصی پایین مرزی

$A_c =$  ناحیه شخصی پرتو

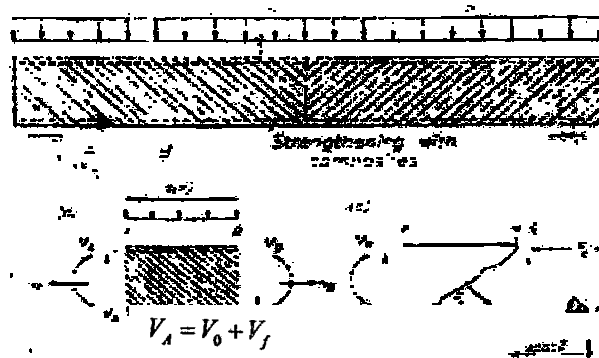
$P =$  نیروی پیش فشرده

4.3.6 نقش فیبر پلیمری محکم، نیروی FRP

$$F_c = \frac{\frac{M_{sum}}{z} + \frac{A_{bf}}{A_c} P - \frac{V_d}{2}}{1 - (\tan \alpha) / 2}$$

در جزوه ای در رابطه با نیروی FRP ساختارهای موجود در شخص اصول طراحی وتالجتسن(2003) رابطه زیر با توجه به نقش نیروی شکست ارائه شده

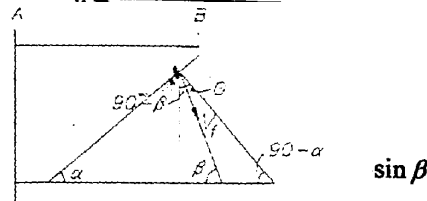
- 1- ترکیب تنها نیروهایی را که در مسیر فیبر هستند شامل می شود.
- 2- شیب شکست  $\alpha=45^\circ$  هست
- 3- فشارهای اصلی عمود بر سطح شکست می باشد.
- 4- حجم شکست با استفاده از طرح بست بدست می آید.



where

$$V_0 = V_c + V_s + V_p + V_l$$

استرس موثر است در نسبت کامپوزیت و جهت آن به شکاف بررسی نظر گرفته شود. Fig 4.3.7 نشان می دهد که رابطه بین زاویه شکست  $\alpha$ ، جهت فیبر  $\beta$ ، و زاویه  $(\cot \alpha + \cot \beta)$  فیبر اصلی و فیبر  $\theta$ .



شکل 4.3.7: بررسی ارتباط بین زاویه  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\theta$ ، Täljslen (2003)

آن و سپس شرح زیر است:

$$45^\circ < \beta < 90^\circ \quad \theta = \alpha + \beta - 90 \quad (4.3.23)$$

استرس موثر در فیبر  $\sigma_{f,e}$  می تواند به عنوان بیان شده:

$$\sigma_{f,e} = \sigma_f \cos^2 \theta - \varepsilon_f E_f \cos^2 \theta \quad (4.3.24)$$

$\cos^2 \theta$  کاهش به علت تغییر مسیر از تنش  $\theta$ ،  $\cos$ ، و تغییر از عرض، از منطقه تاکید کرد، همچنین با عامل  $\cos \theta$ .

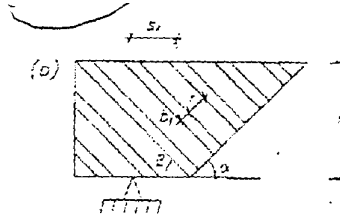
دادن سهم کامپوزیت عنوان:

$$V_f = \varepsilon_f E_f \frac{A_f z (\cot \alpha + \cot \beta)}{s_f} \sin \beta \cos^2 \theta \quad (4.3.25)$$

برای پرتو با نوار در شکل 4.3.8 تقویت می دهد:

(4.3.26)

$$s_f = \frac{b_f + r}{\sin \beta}$$



شکل 4.3.8: تقویت با نوارها ، Tdljsten (2003)

سهم از کامپوزیت با تقویت در هر دو طرف از پرتو با نوار عمودی می تواند به عنوان بیان شده :

$$A_f = 2t_f b_f$$

$$z = 0.9d$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\beta = 90^\circ$$

$$\theta = 45^\circ$$

(4.3.27)

$$V_f = 2t_f b_f \varepsilon_f E_f 0.9d \frac{(1 + \cot \beta)}{s_f} \sin \beta \cos^2 \theta$$

4.4 یورو کد

4.4.1 کاربرد نیاز به طراحی تقویت برشی

طراحی از کاربران با توجه به یورو کد 2 (2002) با تقویت برشی در زاویه متغیر مدل خرپا ، شرح داده شده در بخش زیر اساس ، همچنین نگاه کنید به بخش 4.4.2

ارزش ها برای محدود کردن زاویه جز فشاری مایل در جان تیر در Eq.4.4.1 داده می شود.

در شکل 4.4.1 نمادگذاری زیر نشان داده شده است :

$\alpha$  زاویه بین تقویت برشی و تنش وتر اصلی (با اندازه گیری مثبت به عنوان نشان داده شده است).

$\theta$  است زاویه بین جز فشاری سازه های بتنی و وتر تنش اصلی.

$F_{td}$  ارزش طرح از نیروی کششی در تقویت طولی است

$F_{cd}$  ارزش طرح از نیروی فشاری بتن در جهت محور طولی عضو است.

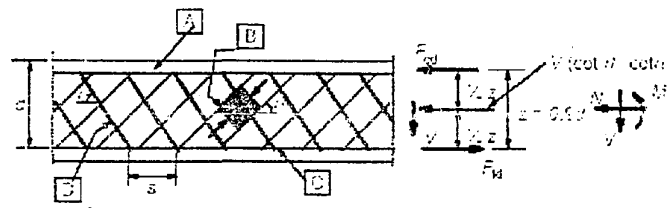
$b_w$  حداقل عرض بین محور کششی و فشاری

$Z$  بازوی اهرم درونی است ، برای یک عضو با عمق ثابت ، مربوط به خم شدن حداکثر لحظه ای در عنصر مورد نظر. در

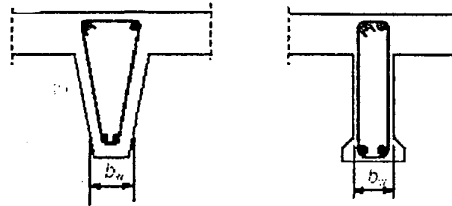
تجزیه و تحلیل برشی ، ارزش تقریبی  $Z = 0.9d$  به طور معمول ممکن است مورد استفاده قرار گیرد.

در عناصر با تاندون خم prestressed ، تقویت طولی در وتر کششی لازم می باشد برای حمل نیروی کششی طولی به

دلیل توسط Eq.4.4.8 برشی تعریف شده است.



A) compression chord B) struts C) tensile chord D) shear reinforcement



شکل 4.4.1: مدل خرپا و نماد برای اعضای برشی تقویت شده، یورو کد 2(2002)

زاویه ای باید محدود شود. حد توصیه شده به عنوان داده

$$1 \leq \cos \theta \leq 2.5 \quad (4.4.1)$$

برای کاربران با تقویت برشی عمودی، مقاومت برشی،  $V_{Rd}$  مقدار کمتری از این است:

$$V_{Rds} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cos \theta$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_c b_w z v f_{cd} / (\sin \theta + \cos \theta) \quad (4.4.3)$$

درحالیکه:

$A_{sw}$  برش عرضی نیروی شکست می یابد

$s$  فاصله ی جانبی

$f_{ywd}$  شامل نیروی شدت شکست

$v$  نشان می دهد که نمودار در نقطه ی اشتراک فشار و خط عمود بر آن شکسته می شود

مقدار  $\alpha_c$  از رابطه ی زیر بدست آمده:

1 برای ساختار پیش فشرده

$$0 < \sigma_{cp} \leq 0.25 f_{cd} \quad \text{برای} \quad (1 + \sigma_{cp}/f_{cd}) \quad (4.4.4)$$

$$0.25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0.5 f_{cd} \quad \text{برای} \quad 1.25 \quad (4.4.5)$$

$$0.5 f_{cd} < \sigma_{cp} < 1.0 f_{cd} \quad \text{برای} \quad 2.5 (\sigma_{cp}/f_{cd}) \quad (4.4.6)$$

و این در صورتی است که:

متوسط فشار، در این رابطه به علت نیروی محوری حاوی مقدار + می باشد  $\sigma_{cp}$

$$v = 0.6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] (f_{ck} \text{ and } \sigma_{cp} \text{ in MPa}) \quad (4.4.7)$$

نیروی کشش افزوده  $f_{td}$  را از مقدار طولی به علت شکست  $V_{Ed}$  می توان از این رابطه بدست آورد:

$$\Delta f_{td} = 0.5 V_{Ed} (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (4.4.8)$$

$M_{Ed} / z + f_{td}$  نباید بزرگتر از  $M_{Ed,max} / z$  باشد.

طرح تراکم متغییر:

برطبق نظر کولینس و میشل (1997)  $E_q 4.4.2$  و  $E_q 4.4.3$  از رابطه زیر حاصل می شود.

تصویر 4.4.2 موازنه رادر طرح تراکم متغییر خلاصه می کند.

a. برش عرضی

b. فشار قطری و موازنه ی طولی

C. نیروهای جانبی

اندازه ی فشارهای اصلی  $f_2$ ، را می توان از معادله 4.4.2b بدست آورد. البته در این رابطه به  $D$ ، فشارهای جانبی برابر با  $V/\sin\theta$  نیاز داریم. همانطور که  $D$  مساوی است با  $f_2 b_w j_d \cos\theta$  فشار اصلی برابر است با:

$$f_2 = \frac{V}{b_w j_d} (\tan\theta + \cot\theta) \quad (4.4.9)$$

عنصر عرضی فشار قطری برابر است با  $V \cot\theta$  همانند تصویر 4.4.2b این نیرو را می توان نیروی کشش برابر  $N_v$  در مقدار طولی خنثی کرد. بنابراین این نیروی کشش در مقدار طولی به علت شکست برابر است با:

$$N_v = V \cot\theta \quad (4.4.10)$$

همانطور که در نمودار 4.4.2c نشان داده شده فشار قطری  $f_2 h_w s \sin^2\theta$  می باشد که توسط نیروی کشش  $A_v F_v$  از اطراف خنثی می شود. با جایگزین کردن مقادیر  $f_2$  از Eq.4.4.9 بدست می آید:

$$\frac{A_v F_v}{s} = \frac{V}{j_d} \tan\theta \quad (4.4.11)$$

که مساوی است با EC2, Eq.4.4.2 همان فشارهای جانبی است.

بر طبق نظریه وستر برگ (2002b)، طرح تراکم متغییر به شرح زیر می باشد:

تصویر 4.4.3 احتمال یورو کد 2 رادر طرح تراکم متغییر نشان می دهد در حالیکه تمامی نیروهای شکست به جز شیب مقداری کمتر از 45 دارند.

در موازنه ی عمودی بست فشار همان  $(V_{Ed} - V_{ced})$  است و نیروی شکست از رابطه ی

$$(V_{Ed} - V_{ced} - Q_{AB})$$

بدست می آید در حالیکه گشتاور منفی می باشد

موازنه ی عمودی برای تعیین شکست موجود (گشتاور منفی):

$$V_{Ed} - V_{ced} - Q_{AB} - V_{Rd,sy} = 0 \quad (4.4.12)$$

$$V_{Rd,sy} = V_{Ed} - V_{ced} - Q_{AB} \quad (4.4.13)$$

توجه:

نیروی شکست با کاهش مقدار  $Q_{AB}$  که برابر با مقدار عرضی شکست کاهش می یابد.

تمامی شکست توسط نیروی شکست که از شکاف می گذرد بدست می آید. هیچ گونه مقدار معینی با  $V_{ced}$  موجود نمی

باشد. حجم شکست  $V_{Rd,sy}$  از موازنه Eq.4.4.11 بدست می آید.

موازنه افقی کنترل انحراف فشار (گشتاور منفی):

$$(V_{Ed} - V_{ced}) \cot\theta - \sigma_c b_w z \cos\theta \cos\theta = 0 \quad (4.4.14)$$

$$V_{Ed} - V_{ced} = \sigma_c b_w z \sin\theta \cos\theta = \frac{\sigma_c b_w z}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (4.4.15)$$

$$v = 0,6(1 - f_{ct}/250) \text{ EC2 Eq.6.5.}$$

در معادله 4.4.15 محدود

تنش تراکمی با وجود

$$V_{Ed} - V_{ced} \leq \frac{b_w z v f_{ct}}{\cot\theta + \tan\theta}$$

قرار دارد

در نتیجه سمت راست معادله برابر است با EC2 معادله 6.8 و معادله 4.4.3 یعنی ظرفیت برای تراکم پایه در بافت.

عبارت  $\alpha_c$  در معادله 4.4.3 باعث تنش بیشتری در پایه تراکمی می شود. اگر  $\alpha_c$  در معادله 4.4.3 استفاده شود داریم:

$$V_{Ed} - V_{ced} \leq \alpha_c \frac{b_w z v f_{ct}}{\cot\theta + \tan\theta}$$

$\cot\theta$  از معادله 4.4.17 بصورت زیر بدست می آید

$$\cot^2\theta - \frac{\alpha_c b_w z v f_{ct}}{V_{Ed} - V_{ced}} \cot\theta + 1 \geq 0 \quad \cot\theta = \frac{\frac{\alpha_c b_w z v f_{ct}}{V_{Ed} - V_{ced}} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha_c b_w z v f_{ct}}{V_{Ed} - V_{ced}}\right)^2 - 4}}{2}$$

در نتیجه

و

شکل 4.4.3 مدل تیر مشبک با زاویه متغیر بر طبق EC2 (نیروها در مقیاسی مرتبط با یکدیگر نشان داده نشده اند) ملاحظات بر طبق EC2: زمانیکه محدوده تراکم شیبدار است  $V_{c,d}$  مطابق است با تصویر اصلاح شده "V<sub>i</sub>" BBK:S می باشد.

4.4.3 V<sub>i</sub>، ظرفیت برشی با توجه به تغییر در ارتفاع مفید یا نیروی نرمال غیر افقی زمانیکه V<sub>i</sub> را محاسبه می کنیم جهت برآیند تراکم و/یا نیروهای کششی در رابطه با جهت لبه شیبدار در نظر گرفته خواهد شد گشتاور منفی:

$$M_{corr} - M_s = M_{sum}$$

$$V_d \text{ متناظر } M_{corr} =$$

$$P * e_s = M_s$$

$$V_i = F_{sd} \tan \alpha$$

$$F_{sd} = \frac{M_{sum}}{z} + \frac{A_{bf}}{A_c} p \frac{(V_d - V_i) \cot \theta}{2} = \frac{M_{sum}}{z} + \frac{A_{bf}}{A_c} p \frac{(V_d - F_{sd} \tan \alpha) \cot \theta}{2}$$

$e_s$  = مرکز گریزی نیروی تقویت کننده

$A_{bf}$  = مساحت سطح مقطع بتن لبه تحتانی

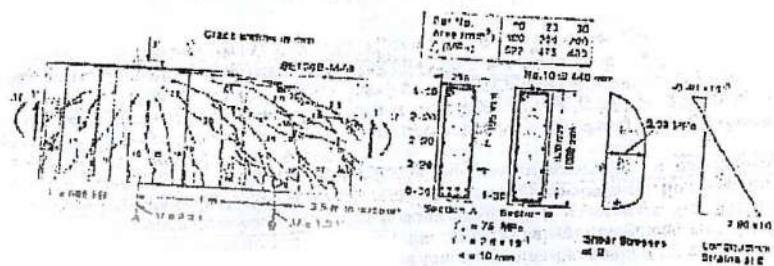
$A_c$  = مساحت سطح مقطع بتن تیر

$P$  = نیروی تقویت کننده

$$F_{sd} = \frac{M_{corr} + PC_3 + \frac{A_{bf}}{A_c} p V_d (\cot \theta) / 2}{1 - (\tan \alpha) (\cot \theta) / 2}$$

معادله 4.4.2 بیان می کند که:

در انتشارات کمیته ASCE-ACI (1998) ارائه ی وسیعی از تئوریهای مختلف مربوط به طراحی برش بتن سازه ای صورت گرفته است. در سطور زیر گزیده ای از نظریه های میدان تراکم ارائه شده است. شبکه ی ترک خورده ی یک تیر ساخته شده از بتن آرمه، برش را به شیوه ای نسبتاً پیچیده انتقال میدهد. با افزایش بار، ترکهای جدیدی شکل میگیرند درحالیکه ترکهای از پیش موجود وسعت یافته و شیب را تغییر میدهند. چون این قسمت د برابر گشتاور و نیز برش مقاومت میکند، کششهای طولی و شیب ترکها با عمق تیر دچار تغییر میشوند. روشهای طراحی برش برای بتن آرمه که تعیین کننده زاویه تتا با در نظر گیری تغییر شکلهای ارماتور عرضی، ارماتور طولی و بتن تحت استرس از نظر قطری میباشد بعنوان رویکردهای میدان تراکم شناخته شده اند. با استفاده از این متدها، شرایط تعادل، شرایط سازگاری و روابط استرس- کشش برای بتن آرمه و ترک خورده قطری برای پیش بینی پاسخ تغییر شکل بار بخشی که در معرض برش قرار گرفته مورد استفاده قرار میگیرند.

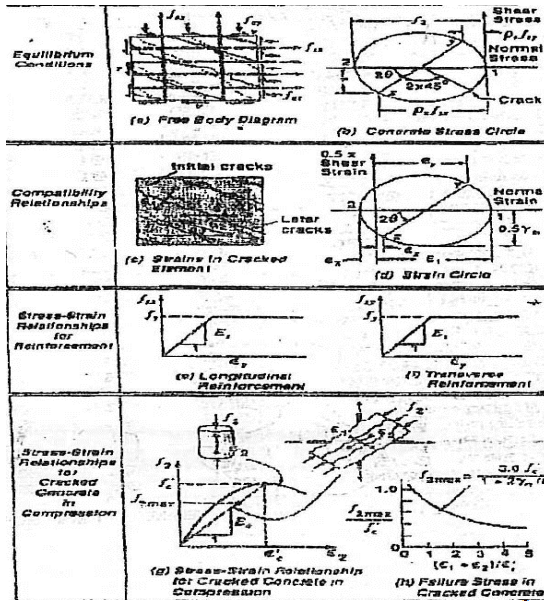


شکل 1-5-4: نمونه ای از شبکه ی ترک خورده ی تیری که در برش قرار دارد.



کوپفر و بومان رویکردهایی را معرفی کرده اند برای تعیین زاویه تا با این فرض که بتون ترک حورده و آرمه به طور خطی ارتجاعی و انعطاف پذیرند. متدهای تعیین تتا که برای طیف کامل بار کاربرد دارند براساس روش واگنر در تئوری میدان کشش توسط کالینز و میشل برای اعضای پیچش ایجاد شدند و برای طراحی برش توسط کالینز مورد استفاده قرار گرفتند. این روش، تئوری میدان تراکم یا نامیده میشود CFT.

شکل 2-5-4 نشاندهنده روابط اصلی نظریه میدان تراکم میباشد و استرس برش  $v$ ، که برای بتن آرمه ترک خورده به کار برده میشود باعث استرسهایی کششی در ارماتور طولی و ارماتور عرضی و استرسی تراکمی در بتن ترک خورده



(۴.۵.۴)

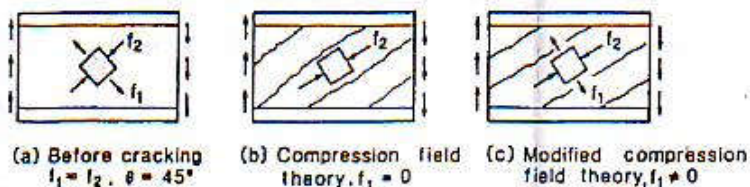
میشود که در زاویه تتا به سمت محور طولی متمایل میشود. روابط تعادلی بین این استرسها را میتوان از شکل 2-4-5 بدست آورد.

در حالیکه  $p_x$  و  $p_y$  مبین نسبتهای تقویت سازی در جهت‌های طولی و عرضی می باشند. شکل 2-5-4. روابط اصلی نظریه ی میدان تراکم، CFT، میشل و کالینز (1974) نقل شده از کمیته ASCE-ACI (1998)

اگر ارماتور طولی توسط کشش  $\epsilon_x$  افزایش طول یابد، ارماتور عرضی توسط  $\epsilon_y$  افزایش طول پیدا میکند و بتون متراکم شده به طور قطری تا  $\epsilon_2$  کوتاه میشود سپس جهت کشش تراکمی اصلی را میتوان از معادله ی واگنر به دست آورد که میتوان از دایره ی کشش موهر آنرا بدست آورد، به شکل 2-4-5 مراجعه نمایید.

$$\tan 2\theta = \frac{\epsilon_x + \epsilon_2}{\epsilon_y + \epsilon_2}$$

قبل از این معادله می توان از تعیین  $\theta$  استفاده کرد اگرچه کشش فشاری روابط بر ای تقویت بتن نیازمند است فرض آن است که تقویت کششی در ارتباط با تقویت فشار بوسیله درسوسه تقریب ساده نمایش داده می شود. در فرمول 4.5.2 بر اساس نتایج سری سند مشتقات تیرها COLLINS (1979) پیشنهاد شد که روابط بین تنش فشار اصلی  $f_2$  و تنش کشش اصلی  $\epsilon_2$  برای ترک مورب بتن می تواند مخالف با کشش فشار اصلی منحنی مشتق از یک لوله نصف باشد. شکل 4.5.2. او بدیهی شمرده که دایره کشش می تواند بزرگتر تاکید فشاری نیازمند به عدم موفقیت بتن که کمتر قابل توجه است. چیزی که پیشنهاد می شود آن است که عدم موفقیت ترک مورب بتن در تراکم فشار کم به علت این فشاری است که باید نسبتاً در سرتاسر وسعت ترک منتقل شود. اگر ترک های ابتدایی در شکل 4.5.2(a) نشان داده شوند شکل در 45 درجه تقویت طولی و اگر  $\theta$  کمتر از 45 درجه باشد که اگر مورد  $p_y$  کمتر از  $p_x$  باشد پس تنش برش قابل توجه باید منتقل شود. در سرتاسر این ترک ابتدایی شکل 4.5.2(b) توانایی سیمان برای انتقال سراسر تنش برش بستگی دارد به اندازه ترک ها که به نوبه خود آن به فشار کششی سیمان بستگی دارد. بعد از رکاب دارای تسلیم تنش کشش می تواند افزایش یابد اگر  $\theta$  بتواند کاهش یابد. کاهش  $\theta$  تقویت طولی و تراکم فشاری باعث افزایش تنش طولی در سیمان می گردد. پیشبینی شکست رخ نمی دهد. دروقتی بازده فولاد طولی یا در عدم موفقیت سیمان لحظه ای که کشش طولی افزایش می یابد  $\epsilon_2$  و کاهش می یابد در ظرفیت برش تفاوت بین ظرفیت شکست فشردگی با نفوذ ناپذیری حساب فشردگی در ترک سیمان و فرضیه میدان تغییر فشردگی را می توان در شکل 4.5.3 دید.



(a) Before cracking  
 $f_1 = f_2, \theta = 45^\circ$

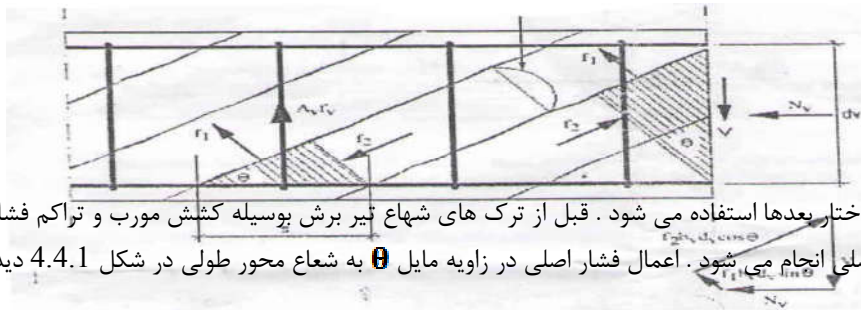
(b) Compression field theory,  $f_1 = 0$

(c) Modified compression field theory,  $f_1 \neq 0$

### شکل 4.5.3

#### 4.6 فرضیه میدان تغییر فشردگی

فرضیه میدان تغییر فشردگی MCFT براساس پژوهش MITCHELL و PCOLLINS و همکارانش در دانشگاه تورنتو در طول 30 سال بوده است. این روش در حال حاضر در کد آمریکا استفاده می شود. (AASHTO2002) و در راهنمای طراحی سوئدی برای افزایش که



این ساختار بعدها استفاده می شود. قبل از ترک های ششای تیر برش بوسیله کشش مورب و تراکم فشاری در جهت فشار اصلی انجام می شود. اعمال فشار اصلی در زاویه مایل  $\theta$  به شعاع محور طولی در شکل 4.4.1 دیده می شود.

تصویر شماره 4.6.2 موازنه در نظریه میدان تراکم تعدیل شده. تصویر اصلاح شده گابریل سون (1999) می باشد. تنشهای تراکمی مورب لبه ها را از یکدیگر جدا می کند. اما تنشهای کششی قائم بر شکافها کل تیر را نگه می دارد. به

دلیل اینکه تنشهای تراکمی  $F2v$  می تواند بیشتر از تنشهای کششی  $F1$ ، باشد. این اختلاف باید با کشش در میلگردها کنترل شود. موازنه به

$$A_s f_s = (f_2 \sin^2 \theta - f_1 \cos^2 \theta) b_s d_s$$

صورت زیر بیان می شود، قسمت هاشور خورده سمت چپ در تصویر 4.6.2 را ملاحظه کنید.

در اینجا  $FV =$  میانگین تنش در میلگردها که به همراه

$$V = f_1 \cot \theta \cdot b_s d_s + A_s f_s \frac{d_s \cot \theta}{d_s} = V_c + V_s \quad \text{از معادله 4.6.2 داریم:}$$

از معادله چنین استنباط می شود که ظرفیت حمل بار برای برش همان مجموع سهم بتن به دلیل کشش در بتن است و سهم تقویت برشی به دلیل کشش در میلگردها می باشد. اگر هیچ نیروی محوری عامل بر مقطع وجود نداشته باشد

کشش در تقویت محوری جایگزین مولفه محوری تراکم مورب خواهد شد. موازنه در راستای محوری به صورت زیر بیان می شود، قسمت هاشور خورده سمت چپ تصویر 4.6.2 ملاحظه کنید.

$$N_v = A_s x f_i + A_{pd} f_p = (f_2 \cos^2 \theta - f_1 \sin^2 \theta) b_s d_s$$

در اینجا  $Fp$  و  $F1$  میانگین تنشها در تقویت طولی محوری و تقویت پیش فشرده هستند

$$N_v = A_s x f_i + A_{pd} f_p = V \cot \theta - f_1 b_s d_s$$

و  $F2$  از معادله 4.6.2 گرفته شده است در نتیجه داریم:

زمانیکه بافت تیر (جان تیر) شکاف می خورد تنشهای متوسط  $F1$  کاهش و فشارهای اصلی ..... افزایش می یابد فشارهای کششی در بتن ترک خورده باعث مستحکم شدن تیر می شود و فشارهای داخلی بتن را کاهش می دهند و تیر را در مقابل فشارهای برشی بیشتر قبل از اینکه تیر متلاشی شود مقاوم می کنند. تنشها در شکاف یا تنشهای متوسط که به وسیله معادله های فوق محاسبه شدند متفاوت است تنشهای کششی در شکافها (ترکها) بتن صفر می

شود اما تنشها در میلگردها افزایش میابد. ظرفیت حمل بار برای برش یا توانایی شکاف در انتقال فشار در امتداد شکاف مجدد می شود. زمانیکه برش افزایش پیدا کرد میلگردها به محدوده تسلیم شدگی در شکاف می رسند. حتی در نیروهای برشی بالاتر تنشهای برشی موضعی،  $V_{ci}$  بر روی سطح شکاف باید فعال بشوند تا تنشهای کششی در امتداد شکاف منتقل می شود.

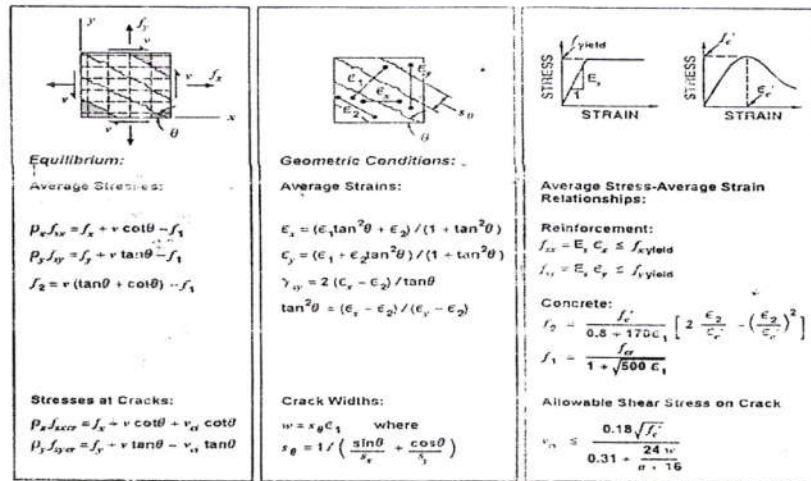
تصویر 4.6.3 را ملاحظه کنید. هنگامی که فشارهای اصلی و عمق شکاف افزایش میابد ظرفیت برش در بافت تیر توانایی شکافها را در انتقال تنشها در امتداد شکاف محدود می شود. زبری سطح شکاف حداکثر ظرفیت انتقال بار در امتداد شکاف تعیین می کند. تصویر 4.6.3 a را ملاحظه کنید.

زمانیکه بتن ترک میخورد نیروهای داخل شکاف باید با مقدار نیروهای داخل فضای بین شکافها بکسان باشد. موازنه حداکثر میزان میانگین نیروهای کششی را مشخص می کند. تصویر 4.6.3b را ملاحظه کنید.

$$A_v f_{vy} \left( \frac{d_v}{s \tan \theta} \right) + v_{ci} \frac{b_v d_v}{\sin \theta} \sin \theta = A_v f_v \left( \frac{d_v}{s \tan \theta} \right) + f_1 \frac{b_v d_v}{\sin \theta} \cos \theta$$

$$f_1 = v_{ci} \tan \theta + \frac{A_v}{s b_v} (f_{vy} - f_v)$$

(a) تنشهای برشی موضعی در شکاف  $V_{ci}$ ، کالینا، میچل 1997  
 (b) دو سطح متقاطع در معادله 4.6.7 بمنظور محاسبه حداکثر میانگین تنشهای کششی اصلی استفاده می شود. در شکاف، سطح متقاطع A-A میلگردها منحنی تسلیم شدگی فلز شده اند. مقطع B-B در فضای بین شکافها قرار دارند. تصویر اصلاح شده گابریل سون 1999 می باشد.  
 فرضیات بوجود آمده در تئوری میدان ترک تغییر یافته MCFT در شکل 4.6.4 ارائه شده این روش در ضمیمه D بیشتر توضیح داده شده و مثال آورده شده است.



BENTZ رابطه سختی کشش که در شکل 4.6.4 آمده را برای تعیین اندازه بهتر که برای دید مناسب است ارائه کرد رابطه ای که توسط بنتس استفاده شده تابع این است که آیا چسبندگی سیمان شکاف خیلی محکم است یا استحکام کمی دارد. سختی کششی یک وابسته است. یعنی وابستگی بین استحکام و چسبندگی است که باعث هر کشش برای توسعه چسبندگی بین شکافها می شود. از این رو در جاهایی که چسبندگی سیمان توسط آرایش فضایی بسته ای از قالبهای قطری کوچک محکمتر شده است، متوسط شدت کشش در چسبندگی شکافها بیشتر از مکانهای محکم شده توسط آرایش فضایی باز از قالبهای قطری بزرگ باشد می توان انتظار داشت. یک پارامتر مناسب برای تعیین

خصوصیات وابسته اند: آرایشهای متفاوت استحکام ، تقسیم محیط چسبندگی سیمان در کشش متوسط محیط تمام قالبهای استحکامی وابسته به فضا هستند. برای تقویت چسبندگی سیمان شکاف خورده رابطه زیر پیشنهاد می گردد.

$$f_1 = \frac{f_c}{1 + \sqrt{3.6m \pm 1}}$$

$$m = \frac{A_c}{\sum db\pi}$$

در اینجا

پارامتر وابسته (میلی متر) = m

منطقه ای از سیمان که به نحو موثر به قالب محکم شده است =  $A_c$

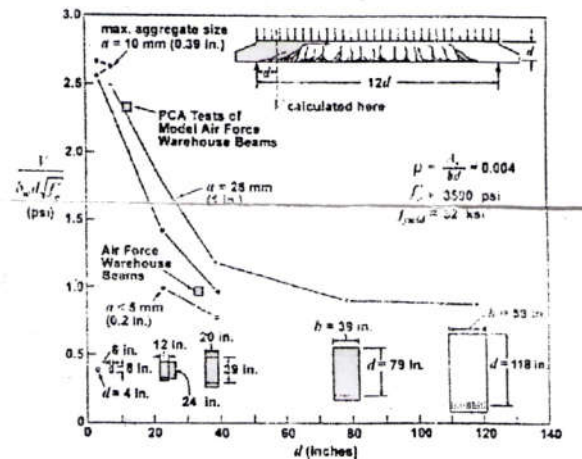
قطر قالبها در محیطی که به سختی چسبیده شده =  $d_b$

در یک مقاله نقشه چاقو سالم از شاهین های چوبی بزرگ توسط آدام لابل در سال 2003 سایز مناسب توصیف شده است. اینجا تعدادی مقالات مهم هستند :

$$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d$$

هدف آن برآورد نکه دارنده بار نقص چاقو بخش انتخاب شده شامل تقویت چاقو نیست. آن برای اجزاء بدون رکابها ارتقاء نیافته بود ، فشار چاقو در کاهش نقص به عنوان بزرگتر شدن اجزا این فشار کاهش نقص چاقو برای کاهش اندازه اجزا سایز مطلوب در چاقو نامیده شده است .

وسع ترین رسیدگی تجربی از سایز مطلوب چاقو توسط شی ایا اتل ژاپنی تولید شده است نتایج اساسی این کار در شکل 4.7.1 خلاصه شده که فشار چاقو در کاهش نقص دیده شده می توانند در هر دو حالت زمانی که عمق اجزا افزایش پیدا می کند و هم درحالی که اندازه تراکم ماکزیمم کاهش پیدا می کند ساده ترین توضیح برای تاثیر سایز چاقو عرضهای شکاف بزرگتر می باشد که در اجزاء بزرگتر اتفاق می افتد.



تاثیر عمق اجزا و اندازه تراکم ماکزیمم بر روی فشار چاقو به هنگام نقص

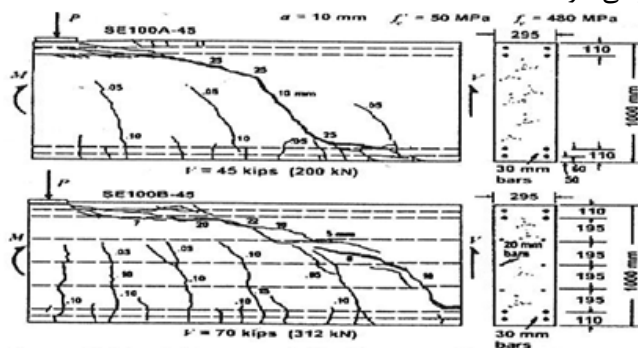
عرضهای شکاف تقویت به طور خطی هم با فشار کشش در شکل 4.7.1 ، تقویت و هم بافتهای بین شکافها افزایش می یابد. (Shioya) مشاهده کرد که فضای شکاف در عمق میانی از شاهین هایش حدودا مساوی با فضای عمق شاهینها بود . از این رو برای تقویت یکسان فشار و دو برابر شدن عمق شاهین ، عرض شکاف در عمق میانی دو برابر خواهد شد . استفاده کردن از پارامترها توسط تئوری زمینه تراکم تغییر داده شده شناخته می شود. (Collins, mcft).

و kachma پیشنهاد کردند که پیروی کردن از حالت قسمت های ظرفیت شیار شامل رکابها نمی شود .  $V_c = \frac{115}{50 + 5d}$  با داشتن  $\sqrt{f'_c}$  نمی شود بزرگ تر از را گرفت . پارامتر فضای شیار موثر برای تاثیر گذاری فضای شیار

$$S_e = \frac{1.38x}{\alpha + 0.63}$$

حساب می شود و بزرگترین سایز خورده سنگ به این ترتیب ایجاد می شود.

فضای شیار گرفته می شود برای قسمت هایی که تنها متمرکز می کنند استحکام نزدیک صورت کشش یا به عنوان بالاترین فاصله بین لایه های طولی موثر هر لایه از این تقویت باید یک منطقه کلی داشته باشد حداقل از وسیله های اختصاصی نباید بیشتر از 24 از هم فاصله داشته باشد نتایج تست مقایسه ها از پرتو افکنی ها و بدون لایه های داخلی مربوط به استحکام کنترل شیار به طور واضح نشان می دهد که آن یک فاصله ای ((فضای)) دور از استحکام است بیشتر از عمق کلی پرتویی که بزرگی اندازه موثر در تقسیم را تلقین می کند این نکته در شکل 4.7.2 شرح داده شده است یعنی جایی که می توان دید که سر لایه از میله های طولی میانی اضافه شده است و به طور عالی فضای شیار نزدیک عمق میانی را کاهش داده و ظرفیت شیار با بیش از 50٪ افزایش یافته است اصطلاح برای به عنوان تهیه می شود پیش بینی هایی که هر دو پرتو ها رادر شکل 4.7.2 نشان می دهد می تواند استحکام 318 را داشته باشد اصطلاح پایه گذاری شده پیش بینی های نقص شیار مربوط به 198 برای بخشی بدون لایه های میانی تقویت و 302 برای قسمت هایی با این چنین لایه هایی پر می شوند .



## انواع الیاف برای سیستم های FRP

### چکیده :

سازه های بتن مسلح مدت هاست که در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده بوده است و عنصر محوری در مسلح سازی این سازه ها، فولاد می باشد. اگرچه فولاد مزایا و قابلیت های مهندسی بسیار قابل توجهی دارد، اما دارای اشکالاتی از جمله وزن سنگین و مقاومت کم در برابر شرایط نامساعد محیطی، دما، رطوبت و خوردگی می باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی مواد جایگزینی به نام FRP ساخته شده است که ضمن دارا بودن مشخصات مقاومتی بسیار خوب و آسانی کاربرد، در مقابل خوردگی و آسیب های محیطی نیز بسیار مقاوم می باشد.

در حال حاضر، استفاده از FRP در بسیاری از کشورهای جهان مرسوم گشته است و همچنان این فناوری در حال توسعه و پیشرفت می باشد. در کشور ما نیز، استفاده از این مصالح جایگزین خصوصا در سازه های آبی و نیز در ترمیم و بهسازی سازه ها بسیار ضروری به نظر می رسد که در اینجا بررسی و تحقیق مفید و جامعی در باره استفاده از FRP به عنوان جایگزین فولاد در سازه های

بتنی صورت گرفته و مزایا و معایب آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## کلمات کلیدی: انواع الیاف، برای سیستم های FRP

### 1- مقدمه:

#### 2- سازه های بتنی پیش‌تنیده و پس‌تنیده

در این قسمت به موارد کاربرد رشته‌ها و تاندون‌ها جهت کارهای پیش‌تنیدگی و پس‌تنیدگی اشاره می‌گردد.

#### 2-1- مواد کاربرد در آمریکای شمالی

پل کالگری، کانادا:

شکل 6-7 یک پل بزرگراه بتنی با استفاده از کابل‌های کمپوزیت الیاف کربن (CFCC) و تاندون‌های Leadline را نشان می‌دهد. این پل به صورت مورب و یکسره با دو دهانه به طول‌های  $22/83mm$  و  $19/23mm$  ساخته شده و در آن از 13 شاتیر با مقطع پیش‌ساخته بتنی T شکل برای هر دهانه استفاده شده است. شاتیرها دارای عمق  $1.1m$  و ضخامت جان  $160mm$  می‌باشند. از 26 شاتیر، چهار مورد آن با استفاده از کابل‌های CFCC به قطر  $15.2mm$  پیش‌تنیده شده بودند. دو شاتیر اضافی دیگر (هر یک در یک دهانه) توسط رشته‌های Leadline به قطر  $8mm$  پیش‌تنیده شده بودند. بقیه شاتیرها با استفاده از رشته‌های فولادی پیش‌تنیده شده بودند. در این پل از طریق سیستم فیبرهای نوری و کرنش‌سنج‌های متصل به CFCC، رفتار رشته‌های Leadline و رشته‌های فولادی پایش (مانیتورینگ) می‌شود.



شکل 6-7- پل کالگری، کانادا

سازه آبی، پورتهیونیم، کالیفرنیا:

شکل 7-7 سازه آبی متشکل از دو دهانه با مقیاس کامل را نشان می‌دهد. یکی از دهانه‌ها یک عرشه پیش‌تنییده با کابل‌های گرافیت است و دیگری یک عرشه کمپوزیتی فایبرگلاس می‌باشد. دهانه‌ها توسط 12 پایه  $356 \times 356 \text{ mm}$  به طول  $13/7 \text{ m}$  نگه داشته می‌شوند و به 6 کابل و رشته مارپیچی CFRP مسلح می‌باشند. سرپوش پایه‌ها با کابل‌های GFRP پست‌تنییده گردید. برای پیش‌تنییده نمودن  $6 \text{ m}$  از عرشه به عرض  $5/5 \text{ m}$  و به ضخامت  $457 \text{ mm}$ ، 180 کابل GFRP مورد استفاده قرار گرفت.



## 2-2- موارد کاربرد در ژاپن

ساختمان کلوپ گلف:

دال‌های مسطح این ساختمان با استفاده از میله‌های AFRP به قطر  $15 \text{ mm}$  پست‌تنییده گردید. این دال‌ها بر اساس کنترل ترک و خیز طراحی گردیدند. سیستم پست‌تنییدگی توسط یک سلول بار (load cell) و یک فشار سنج روغنی پایش می‌شود.

مجتمع مسکونی اومورو (Omuro):

این ساختمان شامل تیرهای پیش‌تنییده شده بطور جزئی (partially prestressed) می‌باشد که در آنها از تاندون‌های FIBRA به قطر  $13 \text{ mm}$  استفاده شده است. کشش در تاندون‌ها توسط سلول‌های بار پایش می‌شود. میله‌های FRP نیز به صورت آرماتورهای غیر پست‌تنییده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

پل عابر پیاده ناکاتسوگاوا (Nakatsugawa):

در دال ساده پیش‌تنییده این پل، از رشته‌های CFCC استفاده شد. این پل به صورت یک قطعه از پیش ساخته شد و دارای عرض  $2.5 \text{ m}$  و طول  $8 \text{ m}$  بود. مهارهای استفاده شده

در این سازه از جنس لوله‌های فولادی، با انتهای تاندون‌های CFCC فرو رفته به داخل لوله‌ها و تزریق شده با اپوکسی بودند. نیروهای کششی مجاز در هنگام پیش‌تنیدگی  $0.60P_U$ ، بلافاصله پس از پیش‌تنیدگی  $0.55P_U$  و تحت بارهای سرویس  $0.50P_U$  بودند. این پل به عنوان یک سازه غیر فلزی ساخته شد و آرماتورهای CFRP با آماده‌سازی سطحی (به منظور بهبود پیوستگی بتن با آرماتور) به عنوان خاموت و آرماتورهای حرارتی مورد استفاده قرار گرفتند.

### 3- مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی

مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با اتصال صفحات FRP به سطح بتن با استفاده از چسب‌های پلیمری به طرز موثری برای بهبود عملکرد تحت بار و حالت‌های حدی تبدیل شده است. در گذشته از صفحات فولادی استفاده می‌شد که دارای معایبی بودند از جمله: مشکل جابجایی به علت وزن سنگین و امکان خوردگی در محل اتصال.

#### 3-1- موارد کاربرد در آمریکای شمالی

پروژه‌های پوشش دادن ستون‌ها:

سازمان حمل و نقل کالیفرنیا به عنوان بخشی از برنامه بهسازی لرزه‌ای عمومی خود، ژاکت‌های محصور کننده‌ای را به دور ستون پل‌ها از جنس پوشش‌های فایبرگلاس، قرار داد. برای چسباندن این صفحات پوششی به ستون‌ها از اپوکسی استفاده شد. مواد چسبنده انبساطی به زیر این پوشش‌ها به منظور چسباندن مطمئن آنها به بتن تزریق شد. این صفحات به دور 11 ستون به قطر  $1.8m$  و 4 ستون به قطر  $1.2m$  پیچیده شد. این ستون‌ها در زلزله 17 ژانویه سال 1994 متحمل هیچ‌گونه آسیبی نشدند. این تکنیک پیچیدن پوشش صفحه‌ای به دور ستون‌ها در پروژه‌های دیگری نیز در کالیفرنیا انجام شده است. برای مثال در شهرهای لوس‌آنجلس و سانتامونیکا، پیچیدن پوششی از مصالح کمپوزیتی برای 200 ستون در سال 1993 و 1994 اجرا گردید (شکل 7-8).



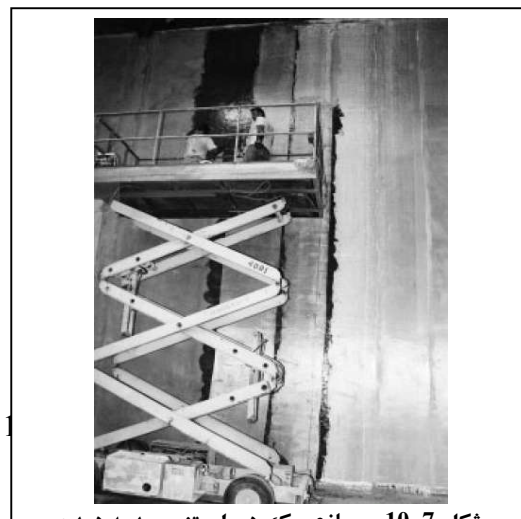


شکل 7-8- ستون پل که GFRP به دور آن پیچیده شده است

مقاوم‌سازی دیوارها، گلندیل، کالیفرنیا:

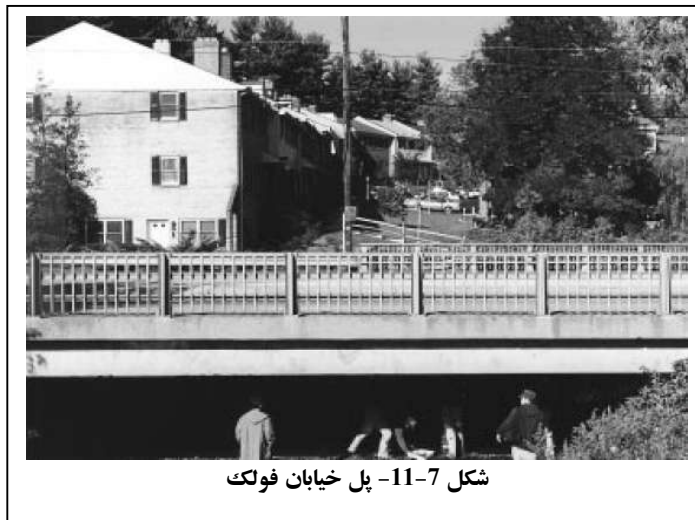
پارچه‌های کمپوزیتی از الیاف می‌تواند از طریق اپوکسی به سطح دیوارهای بنایی و بتنی چسبانده شود تا مقاومت این اجزاء را افزایش دهد. این تکنیک در سال 1994 برای ترمیم صدمات وارده به دیوار خارجی یک ساختمان یک طبقه، ناشی از زلزله Northridge، مورد استفاده قرار گرفت (شکل 7-9 و 7-10).

این دیوار که از بلوک‌های بنایی غیر مسلح به عرض  $200\text{mm}$  ساخته شده بود، در کل مقطع به طول  $18/3\text{m}$  و ارتفاع  $6\text{m}$  به شدت ترک خورده بود. صفحات نازکی از ساختارهای کمپوزیتی برای وجوه خارجی و داخلی این دیوار استفاده شد.



شکل 7-10- بهسازی یک دیوار بتنی صدمه دیده

پل خیابان فولک، ویلمینگتون، دیلویر:  
 برای تقویت این تیر پیش‌ساخته، پیش‌تنیده و یک دهنه که دارای طول  $16/5m$  و مقطع مستطیلی بود (شکل 7-11)، از صفحات الیاف کربنی استفاده شد. وجود ترک‌های ناشی از کمبود آرماتورهای برشی در آن، علت اصلی انجام کار تقویت و بهسازی بود. سازه بزرگ پل از 24 تیر پیش‌تنیده با مقطع مستطیلی که در مجاور یکدیگر قرار گرفته بودند، تشکیل شده بود. برای اهداف مشاهده، 6 مورد از تیرها مقاوم‌سازی شدند. یک لایه از صفحه CFRP یک‌جته به همراه الیاف قائم به سمت تیر، برای 4 تیر مورد استفاده قرار گرفت. در دو تیر دیگر از صفحاتی با مدول بالاتر و وزن بالاتر استفاده شد که در یکی از آنها بجای یک لایه، از دو لایه استفاده گردید.



### 3-2- موارد کاربرد در اروپا

پل ایبج، سوییس:  
 صدمه اتفاقی به یک تاندون پیش‌تنیده این پل در سال 1991 را عملیات تعمیر و نگهداری، ترمیم این پل در سال 1991 را ضروری نمود. 3 لایه بلند CFRP به طول  $5m$ ، دو تا از آنها به ابعاد  $150mm \times 1.75mm$  و یکی از آنها به ابعاد  $150mm \times 2mm$  برای بهسازی سطح پایینی پل بکار رفت.

### 3-1-1- وزن مخصوص ( specific gravity )

آرماتورها و تاندون‌های FRP دارای چگالی بین  $g/cm^3$   $1/5$  تا 2 می‌باشند که تقریباً 4 برابر سبک‌تر از فولاد هستند. وزن کم آنها موجب کاهش هزینه‌های حمل و نقل و

ذخیره سازی و کاهش زمان جابجایی و نصب، در محل در مقایسه با آرماتورهای فولادی می‌گردد. این مزیتی است که باید در هر تحلیل برای انتخاب محصول بدان توجه شود.

### 3-1-2- انبساط حرارتی

خود بتن مسلح خود یک ماده مرکب است که در آن آرماتورها نقش ابزار تقویتی را داشته و بتن به عنوان خمیر عمل می‌کند. بنابراین ضروری است که رفتار دو ماده تحت تنش‌های حرارتی مشابه باشد تا تغییر شکل‌های ناهمگون بتن و آرماتورها به تا حداقل برسد. بسته به خواص مخلوط ضریب خطی انبساط حرارتی برای بتن از  $6 \times 10^{-6}$  تا  $11 \times 10^{-6}$  بر  $^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند. در جدول 3-1 ضرایب انبساط حرارتی برای محصولات معمولی FRP فهرست شده است.

	Steel reinforcing bar	Steel tendon	GFRP bar	GFRP tendon	CFRP tendon	AFRP tendon
Tensile strength, MPa (ksi)	483-690 70-100	1379-1862 200-270	517-1207 75-175	1379-1724 200-250	165-2410 240-350	1200-2068 170-300
Yield strength, MPa (ksi)	276-414 40-60	1034-1396 150-203	Not applicable			
Tensile elastic modulus, GPa (ksi)	200 29,000	186-200 27,000-29,000	41-55 6000-8000	48-62 7000-9000	152-165 22,000-24,000	50-74 70,000-11,000
Ultimate elongation, mm/mm	> 0.10	>0/04	0.035-0.05	0.03-0.045	0.01-0.015	0.02-0.026
Compressive strength, MPa (ksi)	276-414 40-60	N/A	310-482 45-70	N/A	N/A	N/A
Coefficient of thermal expansion ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) ( $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ )	11.7 6.5	11.7 6.5	9.9 5.5	9.9 5.5	0.0 0.0	-1.0 -0.5
Specific gravity	7.9	7.9	1.5-2.0	2.4	1.5-1.6	1.25

جدول 3-1- مقایسه خواص مکانیکی (در راستای طولی)

شده در راستای طولی (یعنی راستای مقاوم آن) اندازه‌گیری شده است. مقادیر ارائه شده، برخی محصولات رایج موجود را پوشش می‌دهند. برخلاف فولاد، مقاومت کششی میله های FRP تابعی از قطر میله است. این بدین معنی است که به علت جهش در برش، الیاف واقع در مرکز مقطع میله تنشی به اندازه الیاف واقع در نزدیکی سطح خارجی میله را تحمل نمی‌کنند. این پدیده منجر به کاهش مقاومت و بازده در میله های با قطر بیشتر می‌گردد. برای مثال برای GFRP تولید شده در ایالات متحده، مقاومت کششی از حدود 480Mpa برای میله با قطر 28/7mm تا 890MPa برای میله با قطر 9/5mm متغیر می‌باشد. برخی تاندون های FRP از طریق تابیدن 7 میله (Glass) CFRP یا S-2 با قطر 3mm تا 4mm ساخته می‌شوند. مقاومت نهایی این تاندون ها قابل مقایسه با رشته های پیش

تنیده فولادی می باشد. برای تاندون های GFRP مقاومت نهایی از 1380 MPa تا 1724MPa متغیر می باشد، در حالیکه برای تاندون های CFRP این مقدار بین 1862 MPa تا 2070MPa متغیر می باشد.

### **3-1-4- ضریب ارتجاعی کششی**

چنانکه در جدول 3-1 ذکر شده است ضریب ارتجاعی طولی میله های GFRP تقریباً 25 درصد فولاد است. این ضریب برای تاندون های CFRP که اغلب دارای الیاف محکم تری هستند از میله های GFRP بیشتر می باشد.

### **3-1-5 - مقاومت فشاری**

میله های FRP در فشار، ضعیف تر از کشش هستند و این به دلیل مشکلات آزمایش دقیق کمپوزیت های یک جهته در فشار می باشد و نیز مربوط به روشهای نگه داشتن و تنظیم قطعه و نیز اثرات پایداری الیاف می باشد. با وجود این، مقاومت فشاری کمپوزیت های FRP برای اغلب کارها، نگرانی اول به شمار نمی رود. مقاومت فشاری به صاف یا دندانه دار (آجدار) بودن میله نیز بستگی دارد. مقاومت فشاری در محدوده 317 MPa تا 470 MPa برای میله های GFRP که دارای مقاومت کششی حدود 552 MPa تا 896 MPa بوده اند، گزارش شده است. مقاومت های فشاری بالاتر برای میله های با مقاومت کششی بالاتر مورد انتظار می باشد.

### **3-1-6- ضریب ارتجاعی فشاری**

برخلاف سختی کششی، سختی فشاری میله های FRP با اندازه، نوع، کنترل کیفیت ساخت و نسبت طول به قطر نمونه ها تغییر می کند. ضریب ارتجاعی فشاری میله های FRP کوچکتر از ضریب ارتجاعی کششی آنها می باشد. براساس آزمایشات نمونه های شامل 55 تا 60 درصد حجمی الیاف پیوسته

E-Glass با خمیر وینیل استر شامل رزین ایزوفتالیک، ضریبی به اندازه 34 GPa تا 48GPa بدست آمده است.

### **3-1-7- مقاومت برشی**

به طور کلی مقاومت برشی کمپوزیت ها بسیار کم است. برای مثال میله های FRP براحتی در راستای عمود بر راستای طولی با آره های معمولی بریده می شوند. این نقص در اغلب موارد می تواند از طریق جهت گیری میله های FRP به گونه ای که بارهای اعمالی به صورت کششی محوری ظاهر شوند، برطرف گردد. آزمایشات برش با استفاده از یک روش آزمایش Isoipescu با مقیاس کامل صورت گرفته است (Porter et al.1993). این روش آزمایش برش با

موفقیت برای بدست آوردن خواص برشی میله های FRP بر روی بیش از 200 نمونه انجام شده است.

### 3-1-8- خزش و شکست خزشی

الیافی مانند کربن و شیشه مقاومت بسیار خوبی نسبت به خزش دارند در حالیکه این مطلب برای رزین ها صدق نمی کند. بنابراین جهت گیری و حجم الیاف تاثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد خزشی میله ها و تاندون های مسلح سازی خواهند داشت. گزارشات یک مطالعه بر روی میله های GFRP با کیفیت بالا نشان می دهد که کرنش اضافی ایجاد شده توسط خزش، در حدود 3 درصد کرنش الاستیک اولیه می باشد.

در بارگذاری تحت شرایط نامطلوب محیطی، میله ها و تاندون های FRP که در معرض بار ثابت قرار دارند، ممکن است پس از مدت زمانی که «زمان تحمل» نامیده می شود ناگهان گسیخته شوند. این پدیده که شکست خزشی نام دارد، برای کلیه مصالح ساختمانی از جمله فولاد نیز صادق می باشد. اما برای میله های پیش تنیده فولادی این پدیده چندان مهم نمی باشد. فولاد می تواند بارهای کششی معمول را که در حدود 75 درصد مقاومت نهایی هستند تحمل نماید که البته نمی توان از عدم گسیختگی و کاهش مقاومت آن مطمئن بود. هنگامیکه نسبت تنش کششی تحملی به مقاومت کوتاه مدت FRP افزایش یابد زمان تحمل کاهش می یابد. آزمایشاتی در ارتباط با خزش در آلمان بر روی کمپوزیت های GFRP با سطح مقطع های مختلف انجام گرفت. این مطالعات نشان می دهد که اگر تنش تحملی، محدود به 60 درصد مقاومت کوتاه مدت باشد، شکست خزشی روی نمی دهد.

محدودیت فوق برای تنش ممکن است برای اکثر سازه های بتن مسلح اهمیت کمی داشته باشد چرا که تنش تحملی در آرماتورها، اغلب زیر 60 درصد می باشد. با این وجود در کاربردهای کمپوزیت های FRP به عنوان تاندون های پیش تنیده، این امر مستلزم توجه ویژه ای است. باید توجه داشت که فاکتورهای دیگری مانند رطوبت نیز تاثیر نامطلوبی بر رفتار خزشی داشته و ممکن است منجر به زمان تحمل کمتر شوند.

بار تحملی کوتاه مدت (48 ساعت) و بلند مدت (1سال) متناظر با 50 درصد مقاومت نهایی به تاندون های GFRP و CFRP در دمای اتاق اعمال گردید. نمونه ها، خزش بسیار کمی از خود نشان دادند و مدول کششی و مقاومت

نهایی پس از آزمایش تغییر قابل ملاحظه نکردند (Anigol1991 و Khubchandani).

### 3-1-9- خستگی

میله های FRP مقاومت خستگی خوبی را نشان می دهند. اغلب تحقیقات در این زمینه بر روی الیاف با مدول بالا بوده است، (مثلاً آرامید و کربن) که در معرفی سیکل های بزرگ بارگذاری کششی-کششی در کاربردهای هوافضا، قرار گرفتند. در آزمایشاتی که بارگذاری در 10 میلیون سیکل، تکرار گردید، این نتیجه بدست آمد که کمپوزیت های کربن - اپوکسی دارای مقاومت خستگی بهتری نسبت به فولاد هستند. در حالیکه مقاومت خستگی کمپوزیت های الیاف شیشه در نسبت های تنش پایین، کمتر از فولاد می باشد (Schwarz 1992). در تحقیق دیگری (Porter et al. 1993) نشان داده شد که میله های GFRP دارای مقاومت خستگی خوبی در برش در 10 میلیون سیکل تکرار می باشند. همچنین در یک بررسی دیگر، میله های GFRP که برای کارهای پیش تنیدگی ساخته شده بودند در معرض بارهای تکرار شونده دوره ای با تنش حداکثر 496MPa و محدوده تنش 345MPa قرار گرفتند. این میله ها توانستند 4 میلیون سیکل بارگذاری را پیش از گسیختگی در ناحیه ننگه داشته شده تحمل کنند. تاندون های CFRP مقاومت خستگی خوبی را از خود نشان دادند، و در مورد آزمایش خستگی کششی برای 2 میلیون سیکل تکرار نیز نتایج همین گونه بود. تنش متوسط در حدود 60 درصد مقاومت نهایی، با مقدار حداقل و حداکثر سطوح تنش برابر 55 و 64 درصد مقاومت نهایی بود. ضریب ارتجاعی تاندون ها پس از آزمایش خستگی تغییر نکرده بود.

### 3-2- فاکتورهای موثر بر خواص مکانیکی

خواص مکانیکی کمپوزیت ها به عوامل بسیاری چون تاریخچه و مدت زمان بارگذاری، دما و رطوبت بستگی دارد. این عوامل به یکدیگر وابسته بوده و بنابراین تعیین تاثیر هر یک با ثابت نگه داشتن بقیه عوامل دشوار می باشد.

### 3-2-1- رطوبت

جذب بیش از حد آب در کمپوزیت ها می تواند موجب افت قابل ملاحظه مقاومت و سختی شود. جذب آب تغییراتی در خواص رزین ها ایجاد کرده و می تواند موجب تورم و تاب برداشتن کمپوزیت ها شود. بنابراین ضروری است که خواص

مکانیکی مورد نیاز کمپوزیت ها تحت شرایط محیطی یکسان تعیین گردد. با این حال رزین هایی هستند که ترکیبات آنها طوری است که ضد رطوبت بوده و ممکن است در سازه ای که انتظار می رود در تمام زمان ها مرطوب باشد، استفاده شوند. در مناطق سردسیر، اثر سیکل های یخ زدن و ذوب شدن نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

### **3-2-2- آتش و دما**

بسیاری از کمپوزیت ها دارای خواص خوب و گاهی عالی در دماهای بالا هستند. اغلب کمپوزیت ها برآحتی آتش نمی گیرند. اثر دمای بالا بر روی رزین ها بیشتر از الیاف است. رزین ها دارای مقادیر زیادی کربن و هیدروژن هستند که قابل اشتعال اند و تحقیقات بر روی توسعه رزین های مقاوم به آتش در حال انجام می باشد. آزمایشاتی که در آلمان صورت گرفته نشان داده است که میله های FRP از نوع E-Glass می توانند 85 درصد مقاومت خود در دمای اتاق را پس از نیم ساعت قرارگرفتن در معرض دمای 300 درجه سانتی گراد و تحت تنش 50 درصد حداکثر مقاومت کششی خود، تحمل نمایند. در عین حال که این رفتار، از عملکرد فولاد از پیش تنیده بهتر می باشد اما در دماهای بالاتر، کاهش مقاومت افزایش یافته و مقاومتی در حد فولاد حاصل می شود.

مسئله آتش برای اعضای بتنی مسلح با کمپوزیت های FRP با مسئله قرارگیری مستقیم مصالح در معرض آتش متفاوت می باشد. در این حالت بتن به عنوان حائلی برای حفاظت FRP از تماس مستقیم با شعله ها عمل می کند. اما چنانکه دما در داخل عضو افزایش یابد، خواص مکانیکی FRP ممکن است به میزان قابل ملاحظه ای تغییر نماید. بنابراین توصیه می شود که استفاده کنندگان، اطلاعاتی راجع به عملکرد نوع خاص FRP و رزین آن در دماهای بالاتر، درجایی که احتمال آتش سوزی بالاست، در اختیار داشته باشد.

### **3-2-3- اشعه ماوراء بنفش**

کمپوزیت ها ممکن است از اشعه های ماوراء بنفش موجود در نور خورشید صدمه ببینند. این اشعه ها موجب واکنش های شیمیایی در یک خمیر پلیمری می شوند که می تواند منجر به تنزل خواص ماده گردد. اگرچه این مشکل می تواند از طریق اضافه کردن مواد افزودنی مناسب به رزین حل شود، اما این نوع آسیب، هنگامیکه اعضای FRP در مسلح سازی داخلی سازه های بتنی بکار می روند و در معرض اشعه مستقیم خورشید نیستند، چندان مهم نمی باشد.

### 3-2-4- خوردگی

آرماتورهای فولادی دچار خوردگی می شوند و افزایش حجم مواد آنها موجب ترک خوردگی و پوسته شدن بتن می شود که این امر موجب تسریع خرابی آن می گردد. یکی از مزایای مهم کمپوزیت ها این است که دچار خوردگی نمی شوند. اما باید توجه داشت که کمپوزیت ها در اثر قرارگیری در معرض محیط های خورنده ممکن است صدمه ببینند. در عین حال که میله های GFRP مقاومت بالایی در برابر اسیدها دارند، اما ممکن است در یک محیط قلیایی دچار آسیب شوند. در مطالعه ای که اخیراً بر روی کاربردهای بتن پیش تنیده صورت گرفته است، یک نوع خاص از رشته های FRP شیشه و اپوکسی موجود در داخل بتن، در معرض یک شبیه سازی آب شور جزر و مدی قرار گرفتند که منجر به جذب آب و کاهش مقاومت گردید. اگر چه این نتایج را نمی توان عمومیّت داد، اما اهمیت انتخاب سیستم صحیح رزین - الیاف برای یک کاربرد خاص از روی این نتایج مشخص می شود. تاندون های FRP که از الیاف کربن ساخته شده اند به اغلب مواد شیمیایی مقاوم هستند.

### 3-2-5- سالخوردهگی زودرس

نیاز به حصول داده های هوازدگی بلند مدت در یک مدت محدود موجب پیدایش روشهای تحلیلی چون سالخوردهگی زودرس به منظور پیش بینی دوام سازه های کمپوزیتی در معرض محیطهای خشن با گذشت زمان، گردیده است. تحقیق انجام شده در Pilkington Bros (Porte et al. 1982) نشان می دهد که پیش بینی های سالخوردهگی بلند مدت که در مدت زمانی کوتاه و در دماهای بالاتر صورت گرفته است، همبستگی خوبی را با سالخوردهگی ناشی از هوازدگی در طبیعت نشان می دهد. براساس این یافته ها، محققین دو رابطه برای سالخوردهگی زودرس کمپوزیت های FRP ارائه نموده اند. رابطه اول یک فاکتور تسریع براساس میانگین سالانه دمای یک اقلیم خاص را بدست می دهد. رابطه دوم رابطه ای بین دمای حمام آب و تعداد روزهای اضافه شده برای سالخوردهگی زودرس به ازای یک روز در حمام آب را نشان می دهد (Porter et al. 1992, Lorenz 1993). با استفاده از این دو رابطه، میخپرچهای (dowel) مرکب از الیاف E-Glass قرارگرفته در رزین وینیل استر، در دمای بالای 60 C برای مدت 4 هفته، دچار سالخوردهگی شدند. نمونه ها در حمام محلول آب آهک و نمک به منظور ایجاد سالخوردهگی آزمایش شدند. یک دوره سالخوردهگی زودرس به مدت 633 روز



در دمای بالای 60 درجه سانتی گراد در این محلول ها، بدون خرابی قابل ملاحظه برای یک حمام آهک بکارگرفته شد. این سالخورده‌گی زودرس معادل تقریباً 50 سال بود.

#### 4- پیش‌تنیدگی:

##### 4-1- مقاومت تیرهای بتنی پیش‌تنیده FRP

مشخصات تاندون های FRP از روی رفتار تنش - کرنش خطی - الاستیک آنها در نزدیکی گسیختگی مشخص می‌شود. بنابراین شکست یک تیر بتنی پیش‌تنیده شده با FRP، هم به دلیل گسیختگی کششی تاندون های FRP و هم به دلیل خرد شدن بتن صورت می‌گیرد. گسیختگی کششی ناشی از گسیختگی تاندون های FRP در ابتدا از دورترین تاندون نسبت به تار خنثی آغاز می‌شود. این نوع گسیختگی برای یک تیر بتنی پیش‌تنیده شده با FRP در مقایسه با تیر مشابه مسلح به فولاد پیش‌تنیدگی، ترد و شکننده می‌باشد. نوع دوم گسیختگی یعنی خرد شدن بتن هنگامی روی می‌دهد که کرنش بتن پیش از وقوع کرنش کششی نهایی در تاندون FRP به حد نهایی خود برسد. این حالت گسیختگی مشابه رفتار تیرهای بتنی مسلح در قسمت فوقانی با فولاد پیش‌تنیدگی می‌باشد. اعضای بتنی عموماً در قسمت تحتانی با فولاد مسلح می‌شوند تا تسلیم فولاد قبل از خرد شدن بتن اتفاق افتاده و حالت گسیختگی نرم اتفاق بیفتد.

##### 4-1-1- مقاومت خمشی

Tanigaki و همکاران (1989)، آزمایشات بلند مدت خمشی را به منظور مطالعه رفتار مقاومت نسبت به بار تیرهای بتنی بطور جزئی پیش‌تنیده شده با AFRP انجام دادند. چهار تیر بتنی پیش‌تنیده با عمق 300mm مورد آزمایش قرار گرفتند. میله های به هم تابیده AFRP با سطوح زبر ماسه سیلیسی و سطوح صاف برای پیش‌تنیدگی سه تیر مورد استفاده قرار گرفتند و تیر چهارم پس‌تنیده شد. میله های AFRP نیز به منظور آرماتورهای اصلی در همه تیرها استفاده شد. نیروی پیش‌تنیدگی اولیه در دو تیر تغییر داده شد. بارهای متمرکز معادل  $P_{CT}$  (بار ترک اولیه) و  $1.5P_{CT}$  برای مدت 1000 ساعت اعمال گردید و ترک خوردگی و خیز تیرها ثبت گردید. پس از 1000 ساعت، نسبت انحنا و خیز به مقادیر برآورد شده الاستیک، 5 تا 8 برابر برای تیرهای در معرض بار  $P_{CT}$  و حدود 10 برابر برای تیر در معرض  $1.5P_{CT}$  افزایش یافت. تشکیل تدریجی

ترکهای جدید در 100 ساعت اول مشاهده گردید. در مدت باقیمانده آزمایش، ترکهای بسیار کمی شکل گرفت و تغییرات خیز با زمان متوسط بود. در همه نمونه ها، کرنش بتن از کرنش آرماتور سریعتر افزایش می یافت که نشانه حرکت به سمت پایین تار خنثی بود. نرمی سازه ها تضمین می کند که آنها بطور ناگهانی و بدون علائم هشدار دهنده گسیخته نشوند و تحمل تغییر شکل های زیاد را در نزدیکی حداکثر باربری خود دارا باشند. نرمی یک عضو بتنی مسلح به صورت نسبت تغییر شکل نهایی به تغییر شکل در هنگام تسلیم فولاد بیان می شود. نرمی ممکن است به صورت انحناء مقطع  $(\frac{F_u}{F_y})$  یا به صورت خیز  $(\frac{D_u}{D_y})$  یک عضو بیان شود.

در تاندون های FRP حالت تسلیم وجود ندارد بلکه به طور ناگهانی به شکل ترد گسیخته می شوند. بنابراین نرمی اعضای پیش تنیده با تاندون های FRP نمی تواند همانند اعضای پیش تنیده فولادی تعریف شود. مقایسه تیرهای بتنی مسلح به FRP و فولاد در یک نیروی پیش تنیدگی یکسان، نشان داده است که اگر گسیختگی در اثر خرد شدن بتن باشد، گشتاور نهایی و خیز نهایی یکسان خواهد بود. بعلاوه پس از بار برداری تیر دارای FRP که کمی گسیخته شده، تیر کاملاً به شکل اول برمی گردد، در حالیکه مجموعه ای از تغییر شکل های ثابت برای تیرهای پیش تنیده شده با فولاد اتفاق می افتد. اگر گسیختگی به خاطر گسیختگی تاندون FRP روی دهد، یک تیر مشابه پیش تنیده با فولاد در همان طراحی اعضای بتنی پیش تنیده با تاندون های FRP در زیر بارهای زنده عادی ممکن است منجر به ایجاد مقاطعی با درصد کم آرماتور مسلح سازی گردد. در نتیجه شکست این تیرها تابع گسیختگی تاندون ها می باشد که موجب تغییر شکل های کوچکتر در مقایسه با تیرهای مشابه پیش تنیده شده توسط فولاد می گردد.

Seu و همکاران (1991)، شش تیر بتنی پیش تنیده با دهانه  $2/4 m$  با تکیه گاه ساده و بارگذاری شده در دو نقطه را مورد آزمایش قرار دادند. سه تیر با تاندون های GFRP و سه تیر با تاندون های فولادی مسلح شده بودند. در این آزمایش سه سطح مقطع مختلف مورد استفاده قرار گرفتند که عبارت بودند از:  $6 \times 9$  اینچ،  $6 \times 10$  اینچ و  $6 \times 12$  اینچ. پاسخ پیش از ترک خوردگی برای

تیرهای مسلح به فولاد و تاندون های GFRP که دارای پیش تنیدگی موثر یکسان بودند، کاملاً برابر بود. اما، پاسخ پس از ترک خوردگی نمونه های مسلح به GFRP، انعطاف پذیرتر از پاسخ تیرهای مسلح فولادی بود. در هنگام گسیختگی، ترک ها در تیر مسلح به GFRP در ناحیه با ممان ثابت در مقایسه با تیرهای مسلح به فولاد پیش تنیده عریض تر بودند. گسیختگی کششی همراه با لغزش تاندون ها در تیرهای GFRP روی داد.

#### 4-1-2- کاهش پیش تنیدگی و مقاومت در برابر خستگی

هنگامیکه یک عضو بتنی پیش تنیده ترک خورده در معرض بارهای تکراری قرار می گیرد، گسیختگی ناشی از خستگی تاندون ممکن است روی دهد. مقاومت در برابر خستگی با محاسبه محدوده تنش  $f_p$  ایجاد شده در تاندون پیش تنیده تحت بارگذاری مکرر و مقایسه این محدوده تنش با مقدار بدست آمده از منحنی S-N برای یک سیستم پیش تنیده خاص، مورد بررسی قرار می گیرد. توصیه های FI (1992) مشخصات مقاومت خستگی فولاد پیش تنیده را به این صورت تعریف می کند: محدوده تنش تحمل شده به تعداد 2 میلیون دفعه با حداکثر تنش نزدیک  $0.85f_{py}$  و احتمال گسیختگی 10 درصد. عمر تاندون ها در معرض خستگی در تیرهای پیش تنیده کمتر از تاندون های آزمایش شده در هوا می باشد. برای تیرهای پس تنیده بارگذاری شده، انحناء تاندون باعث می شود که تاندون بر روی دندانه های ترک های زود ایجاد شده، ساییده شود. همچنین توجه ویژه ای باید به مقاومت خستگی مهارها مبذول گردد. این وسایل اغلب می توانند مقاومت کامل تاندون را تحت شرایط یکنواخت بارگذاری بکار گیرند اما هنگام اعمال بارهای تکراری این مقدار کمتر می گردد

Budelmann, Rostasy (1991)، میله های GFRP را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها گزارش کردند که مقاومت خستگی تاندون های FRP متاثر از ویژگی مهارها (قیدها) می باشد. اما مقاومت خستگی GFRP به طور قابل توجهی کمتر از سیم پیش تنیدگی با مهار گوه ای می باشد.

Mikami و همکاران (1990) سه تیر پیش تنیده شده با استفاده از تاندون های به هم تابیده AFRP را تحت بار تکراری، مورد آزمایش قرار دادند. تیرها دارای مقطع  $200\text{mm} \times 250\text{mm}$  بودند و هر یک شامل تاندون پیش تنیده با تنش حدود 45 درصد مقاومت کششی خود بودند. دهانه هر تیر  $1600\text{mm}$  بود و در هر طرف از تکیه گاهها یک برجستگی  $400\text{mm}$  بود. دو تیر در تعداد سیکل های 1 میلیون بار به

بارگذاری اولیه دارای نسبت حدود  $1/3$  بودند. تیر سوم تا حدود  $0/88$  ظرفیت یکنواخت نهایی بارگذاری شد و در تعداد سیکل های  $229000$  گسیخته شد.

Kumagai و Noritake (1991)، دو تیر بتنی پیش تنیده با تاندون های AFRP با دهانه  $10_m$  را آزمایش کردند. یک کابل سهمی شکل با  $19$  میله مسلح سازی هر یک به قطر  $6_{mm}$  برای پس تنیده کردن تیرها استفاده شدند. تیر اول تحت یک بار یکنواخت آزمایش شد. تیر دوم مکرراً بارگذاری شد تا به  $0/45M_u$  (گشتاور خمشی در اولین ترک)،  $0/55 M_u$  و  $0/5 M_u$  برسد که  $M_u$  نشان دهنده گشتاور نهایی یک تیر مشابه آزمایش شده تحت بار یکنواخت می باشد. تیر آزمایش شده  $2$  میلیون سیکل را بدون گسیختگی تحمل نمود. سپس نمونه تا حد گسیختگی بارگذاری شده و تنها  $10$  درصد کاهش را در ظرفیت باربری نهایی از خود نشان داد. در این آزمایش مهار کابل AFRP به خاطر خستگی اعمال شده صدمه ندید.

Mekay و Erki (1992)، مقاومت خستگی تیرهای بتنی پیش تنیده با استفاده از میله های AFRP را مورد آزمایش قرار دادند. سه تیر بتنی با ابعاد  $150_{mm} \times 300_{mm}$  و دهانه  $1/05_m$  آزمایش شدند. میله های AFRP در ابتدا تا  $80$  درصد مقاومت کششی خود کشیده شدند. تیر اول در دو مرحله بارگذاری شد که دچار ترک شد و بارگذاری تا نزدیک مقاومت نهایی ادامه یافت و سپس باربرداري شد. در مرحله دوم، تیر تا مرحله گسیختگی بارگذاری گردید. دو تیر دیگر در معرض دو سیکل بار استاتیکی بیش از حد ترک خوردگی قرار گرفتند. سپس تیرها در معرض بارگذاری سینوسی با فرکانس  $4_{HZ}$  قرار گرفتند. حداکثر و حداقل بارها طوری تنظیم شدند که شرایط پیش تنیدگی جزئی را از طریق داشتن بار کمتر درست در زیر بار ترک و بار بالاتر برای ایجاد تغییر تنش در میله AFRP به میزان  $200_{MPa}$  با حداکثر تنش در حدود  $80$  درصد مقاومت تعیین شده، را شبیه سازی نمایند. تیرها به ترتیب پس از  $1/96$  و  $2/1$  میلیون سیکل بعلت گسیختگی آرماتورها شکسته شدند. افزایش خیز دو تیر به ترتیب  $10$  و  $20$  درصد خیز اولیه بود. نتایج زیر از مطالعه حاصله بدست آمد.

1- مقاومت خستگی آرماتورهای AFRP در زیر بار حداقل به اندازه رشته های فولادی، تحت شرایط تنش استفاده شده در تحقیقات می باشد.

2- Relaxation در آرماتورهای AFRP بیشتر از رشته های فولادی عادی می باشد. یک تخمین منطقی از اثرات نامطلوب Relaxation برای AFRP در تنش اولیه در محدوده 1200MPa می تواند از طریق فرمول زیر بدست می آید :

$$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1.009 - \frac{\log(t)}{65.1}$$

که  $f_{pi}$  تنش گیرداری و  $t$  زمان بر حسب دقیقه می باشد.

#### 2-4- مقاومت تیرهای بتنی پس تنیده

Mutsuyoshi و همکاران (1990)، 10 تیر بتنی پس تنیده با مقطع مستطیلی آزمایش کردند که در 7 عدد از آنها کابل های الیاف کربن و در بقیه فولاد پیش تنیده بکار رفته بود. نیروی پیش تنیده طراحی بین 40 درصد تا 60 درصد مقاومت کششی کابل ها متغیر بود. آماده سازی سطحی متفاوتی برای کابل های CFRP در نظر گرفته شده بود تا ویژگیهای پیوندی کابل ها و بتن، از کابل های غیر پیوندی تا پیوندی مشخص گردد. ابعاد تیر،  $150mm \times 200mm$  بوده و دهانه آن  $1500mm$  بود. در هر تیر فقط یک کابل حالت گسیختگی را نشان داد، که عبارت بود از گسیختگی کابل های CFRP و خرد شدن بتن. همچنین آزمایش نشان داد که کاهش پیوند میان کابل های CFRP و بتن منجر به ظرفیت نهایی کمتری برای تیرها می گردد.

Yonekura و همکاران (1991)، مقاومت های خمشی و حالات گسیختگی متناظر آنها را در تیرهای بتنی پیش تنیده با CFRP و AFRP مورد آزمایش قرار دادند. مساحت تاندون های پیش تنیدگی، نیروی پیش تنیدگی اولیه و نوع و مساحت مواد مسلح سازی متغیر بودند. 11 تیر مسلح با CFRP و یک تیر مسلح با AFRP مورد آزمایش قرار گرفتند. رفتار تیرهای آزمایش شده، با تیرهای مسلح با آرماتورهای فولادی مقایسه شد. کل 16 تیر با مقطع I شکل با ارتفاع  $220mm$  و عرض بال  $150mm$  و دهانه  $1400mm$  دارای تکیه گاه ساده بوده، در دو نقطه بارگذاری شده، و بطور یکنواخت آزمایش شدند. نیروی پیش تنیدگی در پنج سطح از صفر تا 75 درصد بار گسیختگی به رشته ها اعمال شد. کرنش در نقاط مختلف روی تیرها ثبت شد تا توزیع کرنش روی مقطع بحرانی برای سطوح مختلف بار مشخص گردد. نتایج این مطالعه موارد زیر را نشان داد :

1- دو حالت گسیختگی کلاسیک برای تیرهای پیش تنیده با تاندون های FRP بدست آمد: گسیختگی تاندون ها و خردشدگی بتن ( شکست ناشی از گسیختگی تاندون های پیش

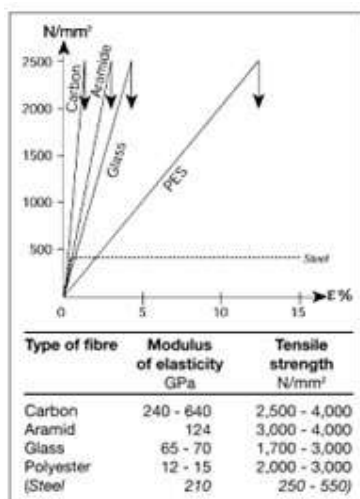
تنیده از طریق تغییر آرایش آرماتورهای محوري قابل جلوگیری است).

2- مقایسه یک تیر با فولاد پیش تنیده با تیر مشابه آن با تاندون های FRP اما با نیروی پیش تنیدگی کمتر، نشان داد که حالت اخیر، خیز بیشتر و بار نهایی کمتری را پس از شکل گیری ترک ها نتیجه می دهد ( با افزایش نیروی پیش تنیدگی و مساحت تاندون های پیش تنیده، تفاوت بار نهایی و خیز نهایی دو تیر کمتر شده و حالت گسیختگی یکسان می گردد).

3- افزایش نیروی پیش تنیدگی منجر به خیز کمتر و بار نهایی بیشتر در یک سطح بار یکسان گردید ( شیب منحنی های بار - افت پس از ترک خوردگی بدون تغییر ماند).

4- در مورد تیرهای با مقادیر زیاد آرماتورهای پیش تنیده، مقاومت تیرها حتی پس از افزایش نیروی پیش تنیدگی به میزان کمی افزایش یافت.

5- کرنش های ثبت شده در تیرهای با آرماتورهای FRP، از تیرهای با آرماتورهای فولادی بیشتر بوده و ارتفاع تار خنثی کمتر بود، چرا که ضریب ارتجاعی آرماتورهای FRP در حدود  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{2}{3}$  آرماتورهای فولادی بود.



انتخاب نوع الیاف سیستم FRP براساس نیازمندی سازه می باشد:

'کیفیت سطح مورد پوشش

\* درجه ایجاد مقاومت  
\* افزایش شکل پذیری

## تقویت سازه در مقابل زلزله با استفاده از صفحات **G** **Sheet**



تقویت دورپیچی سازه ها در مقابل زلزله تولید گردیده است. در چند مورد توسط تست های مختلف در پروژه های اجرایی شده (تست های ( push pull ) مشخص شده است که شکل پذیری سازه افزایش پیدا کرده است.

- E glass

AR (alkali resistant) glass - الیاف شیشه در مقابل مواد

قلیائی

## تقویت المانهای باربر با استفاده از صفحات **C** **Sheet240**



محصول C-Sheet240 بمنظور بهبود مقاومت فشاری ستونها مورد استفاده قرار میگیرد. لمینیت های CFK قابلیت تحمل

لنگر خمشی ناشی از بارهای وارده به ستونها را دارا می باشند.

در صورت استفاده از سیستم FRP مشکلی از نظر نفوذ پذیری بخار آب بوجود نمی آورد. (این مسئله توسط سیستم ضمانت میگردد)

### تقویت مقاومت خمشی با استفاده از سیستم FRP



تقویت مقاومت کششی و خمشی بوسیله استفاده از لمینیت های پیش ساخته CFK انجام میگردد. برنامه اندازه گیری ابعاد آنها با همکاری شرکت مهندسین BOW در آلمان انجام گرفته است. بوسیله برنامه تولید شده بصورت اتوماتیک مقاومت های برشی و مهاري محاسبه گردیده است.

### تقویت مقاومت برشی خارجی با استفاده از C-Sheet 640

تقویت مقاومت برشی خارجی بوسیله استفاده از لمینیت های پیش ساخته CFK انجام میگردد. بوسیله برنامه تولید شده بصورت اتوماتیک مقاومت های برشی خارجی و مهاري محاسبه گردیده است.

### نتیجه گیری :

با توجه به قابلیتها و ویژگیهای محصولات FRP و نتایجی که طی چند سال آزمایشات و تلاشهای بسیار محققین حاصل گشته است، میتوان دریافت که این محصولات میتوانند جایگزین بسیار مناسبی برای فولاد باشند. این مطلب از دو منظر قابل توجه و حائز اهمیت میباشد که یکی بکارگیری این محصولات در ساخت سازه ها و دیگری استفاده از آنها جهت بهسازی و مقاومسازی و ترمیم سازه ها و ابنیه موجود میباشد.

رویکرد اخیر بحثی جدید و مطرح در مجامع علمی در دنیا بوده و ضرورت و اهمیت آن در بسیاری زمینه ها به وضوح احساس میگردد و پروژه های تحقیقاتی بسیاری نیز در این



زمینه در حال انجام می‌باشد. در کشور ما نیز بحث مقاومت‌سازی و بهسازی اخیراً مورد توجه اساتید و پژوهشگران قرار گرفته و فعالیتها و اقداماتی در این زمینه آغاز گشته است. از جمله موضوعات مهم در این زمینه می‌توان به مقاومت‌سازی لرزه‌ای خطوط گاز و نفت، بهسازی سازه‌های آبی، مقاومت‌سازی سازه‌ها و ابنیه روستایی، بهسازی آثار تاریخی و غیره اشاره نمود. نکته قابل توجه دیگر آن است که از آنجا که یکی از ویژگی‌های مهم و مفید محصولات FRP مقاومت آنها در برابر خوردگی می‌باشد، استفاده از این محصولات در سازه‌های دریایی در نواحی آبی جنوب کشور که خوردگی یکی از معضلات عمده آنها می‌باشد، همچنین بکارگیری این محصولات در سازه‌ها در شهرهای بزرگ و صنعتی که آلودگی بالای آنها در هنگام بارندگی می‌تواند منجر به تولید باران اسیدی گردد، می‌تواند تا حد زیادی مشکلات موجود را برطرف نماید. امید است با فعالیت هر چه بیشتر پژوهشگران و توجه و عنایت کارشناسان و مسئولین به این موضوع جدید و خطیر، شاهد پیشرفت هر چه بیشتر کشور عزیزمان در این زمینه باشیم.

### پیشنهادهای:

بازرسی منظم و دقیق در حین ساخت و نیز ثبت اطلاعاتی در خصوص نفوذ مواد آلاینده نظیر دی اکسید کربن و اکسید گوگرد در قسمت بهره برداری همواره بسیار با ارزش تر از صرف هزینه های سنگین تعمیر و یا تعویض سازه خواهد بود.

### مراجع:

ارزیابی عملکرد و روش های مقاوم سازی سازه های بتنی - دکتر علیرضا رهایی - مهندس سعید نعمتی، 1384  
تعمیر و حفاظت سازه های بتنی - دکتر علی اکبر رمضانپور - مهندس رضا پاشایی، 1383  
آسیب دیدگی های بتن ، علل و عوامل آن - مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن 80  
کربناسیون در سازه های بتن مسلح- دکتر علی اکبر رمضانپور - مهندس رضا پاشایی، 1384  
جزوه درسی تکنولوژی بتن - دکتر فرشاد وزین رام، 1385

*Earthquake Engineering Research, 'Loma PRIETA Collection, University of California", Berkeley*

*Earthquake Engineering Research institute (2004), 'Northridge Earthquake of January 17, 2003 reconnaissance report', Earthquake Spectra, Supplement C to Volume 11*  
*EQE International (1995). The January, 2003 Kobe earthquake; An EQE Summary Report, April*  
*Richardson.G.N & Feger.A & Lee. K.L, "Seismic testing of reinforced earth walls", journal of geotechnical engineering, Div. ASCE 103 (1), 1977, pp. 1-17.*  
*Wilkins.M.L., "Fundamental methods Hydrodynamics", Journal of Methods in computational physics, Vol.3, 1964, pp. 211-263.*  
*Biggs.j.M., "Introduction to structural Dynamics".*  
*National Building Code of India Standards Institution*  
*Earthquake Damaged Buildings: An Overview of heavy debris and Victim Extrication, FEMA 158/ September 1988*  
*Post-earthquake solid waste management strategy (for the City of Vancouver and the surrounding area) Wojtarowicz, Margaret, Atwater, James W*  
*Giorgio Croci-The conservation and structural restoration of Architectural Heritage*  
*Earthquake Engineering Research, 'Loma PRIETA Collection, University of California", Berkeley- Earthquake Engineering Research institute (2004), 'Northridge Earthquake of January 17,2003 reconnaissance report', Earthquake Spectra, Supplement C to Volume 11*  
*EQE International (1995). The January, 2003 Kobe earthquake; An EQE Summary Report, April*  
*Richardson.G.N & Feger.A & Lee. K.L, "Seismic testing of reinforced earth walls", journal of geotechnical engineering, Div. ASCE 103 (1), 1977, pp. 1-17.*  
*Wilkins.M.L., "Fundamental methods Hydrodynamics", Journal of Methods in computational physics, Vol.3, 1964, pp. 211-263.*  
*Biggs.j.M., "Introduction to structural Dynamics*

## بکارگیری بتن الیاف فولادی در افزایش باربری دینامیکی و ویژگیهای سازه ای و بهسازی با ضایعات و الیاف KFRP

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد سازه

[Iman.Elyasian@gmail.com](mailto:Iman.Elyasian@gmail.com)

حسین میسمی، دکترای عمران

چکیده

با توجه به اهمیت مقدار زمان باربری دینامیکی سازه های مختلف در هنگام حوادثی از قبیل زلزله، افزایش این زمان راهکارهای مختلفی را می طلبد که یکی از این راهکارها مسلح نمودن بتن به الیاف می باشد. به طور کلی الیاف عبارت است از هر جسم نازک با طول زیاد و قطر کم که برای افزایش برخی از ویژگی های بتن در آن به کار گرفته می شود که می تواند از فلز، مواد رزینی، مواد پلیمری و... باشد. از جمله این نتایج افزایش شکل پذیری در حین بارگذاری دینامیکی، افزایش مقاومت کششی بتن و همچنین افزایش قابل توجه در زمان باربری بعد از وارد شدن بار دینامیکی به طور کامل می باشد. در ادامه با بکارگیری الیاف فلزی و ریز براده های آهنی سعی شده بر کارایی بتن تولیدی با حداقل هزینه افزوده شود. ضمناً با بکارگیری الیاف KFRP، یک نوار تقویتی بیرونی ایجاد نموده تا باعث افزایش شکل پذیری و افزایش باربری دینامیکی بتن گردیم. الیاف مورد استفاده در بتن که عبارتند از الیاف فولادی، آزیست، الیاف نایلونی، الیاف شیشه ای و حتی الیاف چوبی و کنفی، مورد بررسی وسیع قرار گرفته و هر یک راه کاربرد خود را می پیماید. در میان الیاف گوناگون استفاده از الیاف فلزی نیز مورد توجه است. خصوصیات این الیاف بالا بردن قابلیت کششی در رفتار خمشی و بالا بردن تاب فشاری و افزایش شکل پذیری و مقاومت در مقابل سایش و خوردگی می باشد

### 1- مشکلات بتن

- 1- پایین بودن نسبت مقاومت به وزن در مقایسه با فولاد و سایر مصالح باربر سازه ای
- 2- پایین بودن میزان کارایی
- 3- جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن
- 4- پایین بودن کرنش گسیختگی بتن در کشش
- 5- نفوذ پذیری و دوام پایین

### 2- بتن الیافی FRC

یکی از الیافهای مصنوعی که در بتن استفاده می شود پلی پروپیلن است که به منظور کنترل ترک در اثر تغییرات حجمی ناشی از انقباض و انبساط و تنشهای حرارتی. نیز برای افزایش مقاومت کششی، نرمی، قابلیت جذب انرژی استفاده می شود و این الیاف یکی از مشتقات پتروشیمی است و با دوهندسه تک رشته ای یا منفرد Mono Filament با قطر 10 تا 100 میکرومتر و ریسه ای Fibrillated با قطر 0.5 تا 1 میلیمتر استفاده می شود که الیاف تک رشته ای می توانند ضخیم (افزایش مقاومت، تاب خمشی بتنی پکپارچه نمودن بتن بعد از شکست) یا نازک (کنترل ترمهای جمع شدگی پلاستیک) باشند



رفتار کلی بتن را با مزایای حاصل بهبود می بخشد. بدیهی است این اختلاط و نحوه افزودن الیاف، زمان

3- رفتار بتن الیافی  
بتن الیافی متأثر از خواص الیاف، از اثر خواص مکانیکی الیاف خصوصیات بستگی به طرح

اختلاط، نوع ویبره و نسبت اندازه الیاف به ابعاد قالب، خواهد داشت. خواص مکانیکی بتن الیافی را تحت اثر نوع، درصد، نسبت طول به قطر معادل مقاومت زمینه، اندازه، شکل و نحوه تهیه و شکل سنگدانه هامی باشد. الیاف کنفی به صورت دورپیچ اجرا می گردد

#### 4-مزایای بتن الیافی

- 1- مقاومت در مقابل تورق وسایش
- 2- مقاومت در مقابل تنش های خستگی
- 3- مقاومت عالی در مقابل ضربه (مقاومت ضربه پذیری)
- 4-قابلیت کششی و ظرفیت زیاد تغییر شکل نسبی
- 5-قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی
6. افزایش در میزان جذب انرژی
7. افزایش دوام و ایجاد یک سطح مستحکم
8. عایق بودن سازه در برابر صدا
- 9-کاهش نفوذپذیری در بتن و در پی آن افزایش مقاومت بتن در برابر ذوب و انجماد
- 10-افزایش ناچیز مدول الاستیسیته بتن
- 11-ممانعت از آب انداختگی بتن و کمک به ادامه هیدراتاسیون
- 12-ایجاد شبکه ای سه بعدی که در تمام جهات بتن را تقویت می کند
- 13-هزینه کم و اختلاط آسان در بتن بدون نیاز به متخصص
- 14-پخش 100٪ همگن آن در بتن و عدم حبس هوا در بین رشته های آن
- 15-الیاف در برابر مواد اسیدی و بازی مقاوم است
- 16-کاهش شکنندگی بتن
- 17-افزایش مقاومت برشی بتن

#### 5-تهیه بهترین طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن به این مفهوم است که به چه نسبتی اجزای بتن را مخلوط کنیم تا بتن ساخته شده به خواص مشخصی دست یابد به طور معمول در طرح اختلاط بتن سه مسئله مطرح است: رسیدن به مقاومت مورد نظر، تامین دوام کافی و رسیدن به اسلامپ مورد نظر.

#### 6-انتخاب الیاف

- طول الیاف: الیاف با طول زیاد به دلیل افزایش سطح درگیری با بتن نتیجه بهتری را در افزایش مقاومت بتن از خود نشان دادند به همین علت آئین نامه های اجرایی افزایش طول را تا حد بهینه پیشنهاد می کند.
- ضخامت الیاف: این پارامتر نیز به دلیل افزایش مقاومت کششی الیاف و همچنین افزایش سطح درگیری با بتن حائز اهمیت است. از طرفی به دلیل محدودیت میزان اختلاط الیاف با بتن، انتخاب الیاف با ضخامت بیشتر، از میزان الیاف مورد نیاز کاسته و بر مقاومت بتن اثر منفی می گذارد لذا می بایست تعادلی بین این دو مورد برقرار گردد که با آزمایش می توان قطر بهینه الیاف کاربردی را بدست آورد.
- شکل الیاف: این مورد هم از نظر میزان درگیری با بتن دارای اهمیت است. اگر الیاف را به شکل ساده به کار بریم به هنگام وارد شدن تنش کششی، درگیری خوبی با بتن نخواهند داشت لذا با ابتکار و خلاقیت و آزمایش با استفاده از آزمایش با قالب های هشتی شکل می توان شکلی بهینه به الیاف داد. یکی از مواردی که در درگیری با بتن اثر دارد زبری الیاف می باشد که با موجدار کردن آن می توان به نتیجه مطلوب رسید.

● مقدار الیاف: مقدار الیاف از لحاظ درصد حجمی و درصد وزنی باید مورد آزمایش قرار گیرد. درصد حجمی الیاف به بتن در آزمایش مربوط به سطح مقطع محاسبه می شود اما در مورد درصد وزنی باید گفت که افزایش میزان الیاف مورد استفاده مفید است به شرطی که عمل اختلاط با مشکل مواجه نشود که این امر در اجرا مشخص می گردد که آئین نامه ها میزان درصد وزنی الیاف را 2 تا 3 درصد پیشنهاد می کند.

● ضریب پواسون: این ضریب میزان چسبندگی الیاف با بتن را مشخص می کند. هر چه ضریب پواسون الیاف به ضریب پواسون بتن نزدیک تر باشد این چسبندگی افزایش می یابد که با توجه به نامشخص بودن این ضریب برای الیافی که از بازار تهیه می شود می بایست در آزمایشگاه مقاومت مصالح آن را بدست آورد.

### 7- فرسایش در اثر کاویتاسیون

بتن مسلح به الیاف فولادی برای تعمیر آبروهای خروجی ، حوضچه های آرامش سرریزها و قسمتهای دیگر بعضی از سدها به کار رفته است . در هر مورد از زمان تعمیر تاکنون ، با وجود ارتفاع زیاد این سدها و شگرف بودن قدرت آب خروجی بتن الیافی به بهترین نحو پایداری کرده است .

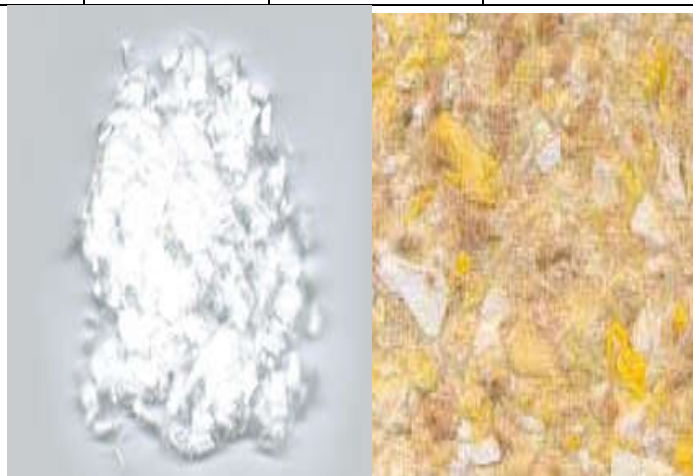
### 8- خواص بتن الیافی

الف - الیاف در حجم بتن به طور یکنواخت توزیع شده و خیلی بیشتر از میلگرد های تقویتی برشی به یکدیگر نزدیک هستند .

ب - مقاومت کششی در نخستین ترک و مقاومت کششی نهایی هر دو توسط الیاف افزایش می یابند .

ج - مقاومت برشی اصطکاکی افزایش می یابد.

نوع کامپوزیت با الیاف یکطرفه	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته (Gpa)	مقاومت کششی (Gpa)	قطر نمونه الیاف (μm)
الیاف پلی پروپیلن	9.0			
الیاف فولادی (بریده شده از ورق فولادی)	8.7	5 200	5.0 1-3	5.7 5-500
الیاف شیشه ای	6.2	80	2-3	9-15



بتن الیافی متأثر از خواص الیاف، رفتار کلی بتن را با مزایای حاصل از اثر خواص مکانیکی الیاف بهبود می بخشد. بدیهی است این خصوصیات بستگی به طرح اختلاط ونحوه افزودن الیاف، زمان اختلاط، نوع ویرنه ونسبت اندازه الیاف به ابعاد قالب، خواهد داشت و برخی خواص مکانیکی بتن الیافی راتحت اثر نوع، درصد، نسبت طول به قطر معادل مقاومت زمینه، اندازه، شکل ونحوه تهیه وشکل سنگدانه هامی دانند.

بتن الیافی رفتار خمشی و بالابردن تاب فشاری و افزایش شکل پذیری و مقاومت در مقابل سایش و خوردگی را افزایش می دهند و در ۱ پوشش کفها ۲ پوشش شیبهای ناپایدار و ترانشه ها با بتن پرتابی ۳ تعمیر سدها و تأسیسات هیدرولیکی ۴ بتن ریزی روی قالبهای غشایی در سطوح خاص مثل گنبد هابه روش پرتابی ۵ افزایش مقاومت برشی در ساختمان راکتور اتمی ۶ بتن پیش ساخته جهت در پوش دریچه های باز دید و مخازن ذخیره آب و یامخازن روغن و نفت و عرشه پله ها و همچنین جهت ساخت لوله های بتنی ۷ سازه های ضد انفجار و ضربه پذیر ۸ پروژه های عایق حرارتی نسوز ۹ سازه های دریایی که از خواص مقاومت در مقابل فرسایش امواج و تروخسکشدن و یایخبندان

### 9- هدف از کاربرد الیاف فولادی در بتن

- تسلیح اضافی برای افزایش مقاومت بتن مسلح یا بتن پیش تنیده به منظور کاهش ترک خوردگی و افزایش قدرت جذب انرژی تحت اثر بارهای ضربه ای، موجهای انفجار و وضعیت پیچیده تنش.  
- جانشین شدن بجای بتن مسلح معمولی به منظور کاهش هزینه دستمزد، افزایش در سرعت اجرا و ایجاد جسم یکنواخت و ایزو تروپ در بتن، به منظور افزایش مقاومت آن

### 10- الیاف فولادی

انتخاب الیاف فولادی خود بخش مهم و بسیار وقت گیری از کار بود. با توجه به اینکه بررسی اقتصادی مزیت استفاده از الیاف فولاد ضایعاتی، هدف اصلی تحقیقات بود، تعیین الیاف و بتن بشکلی که این امر را بیش از هر چیزی در نظر بگیرد؛ بسیار اساسی بود. مطالعات دکتر واهگ (سیمونیان) در سال ۱۳۶۸ تحت عنوان بهره گیری از تراشه های فولادی پس مانده از صنایع، و کار ارزنده آقای عبدالله (کیوانی)، بنام اصول و تکنولوژی بتن مسلح به الیاف فولادی، که از الیاف ضایعاتی استفاده کرده اند، در خصوص مشخصات و وضع الیاف، اطلاعات جزئی، ارائه نمی نماید. بنابراین، این تجربیات در خصوص مزیت اقتصادی محدودیت چندانی نداشته است. بنابراین تأمین مطالعه کافی روی انواع الیاف حاصل از تراشکاری و در سطح کشور، و الیافی که بتوان در بتن الیافی مصرف کرد، کاملاً ضروری شده نیاز به بررسی مستقیم در کارگاهها بود.

کارگاههای در دسترس، شامل کارگاههای دانشکده در دو قسمت کارگاه تراشکاری سبک و کارگاه تراشکاری مکانیک که عمدتاً جهت تراشکاری های سنگین مورد استفاده قرار می گیرد، و کارگاه های خارج دانشکده بود. به عنوان جمع بندی مطالب فوق می توان گفت:

از کل ضایعات حاصل از تراشکاری در کشور چیزی حدود ۳٪ قابل مصرف در بتن الیافی باقی می ماند. چنانچه قصد استفاده از ضایعات تراشکاری و فرزکاری باشد، باید پیش بینی نمود که توسط کارگری از مخلوط شدن ضایعات فلزی غیر هم جنس و یا هم خاصیت جلوگیری شود. همچنین از مخلوط شدن الیاف با ضخامت یا عرض نامطلوب نیز جلوگیری شود.

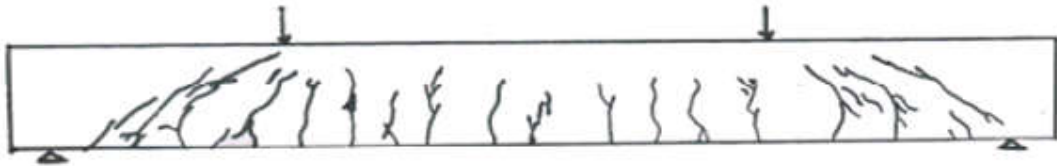
ضایعاتی که سطحشان با مواد شیمیایی چرب آلوده می شود، یا هر موادی که باعث کاهش چسبندگی در بتن می شود، از توده ضایعات حذف گردد.

با توجه به تعداد نمونه ها و وزن الیاف مورد لزوم و تهیه الیاف بصورت فوق، خود وقت قابل توجهی از پروژه را به خود اختصاص داد. لیکن نتیجه حاصل برای کل گروه همکار بسیار جالب بود و نسبت به پیش فرض شروع کار، دیدگاه بسیار واقعی تری از کاربرد اقتصادی الیاف را فراهم نمود. ادامه کار در جهت تکمیل بخش مطالعه فنی برای فراهم نمودن جمع بندی نهایی متمرکز گردید.

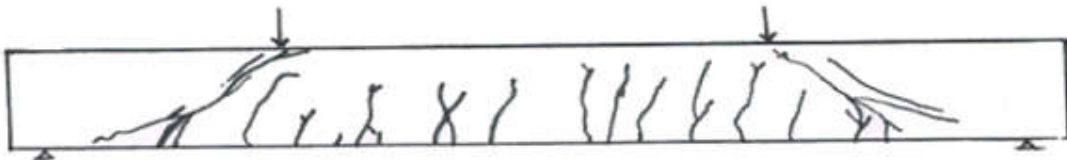
### 11- مزایای الیاف فولادی

- عدم پخش همگن الیاف در بتن
- عدم اثرگذاری بالا در شکل پذیری بتن
- این نوع الیاف در هنگام اختلاط با بتن ممکن است دچار شکستن شوند

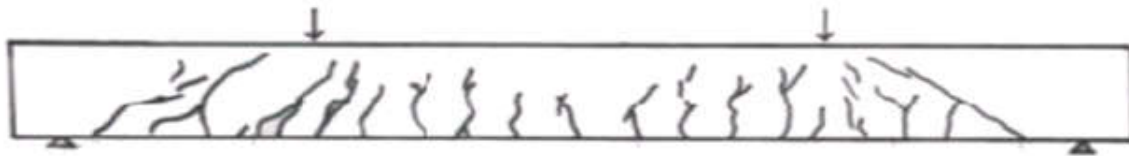
در محیط قلیایی بتن با مرور زمان از بین می رود



الگوی ترک تیر حاوی الیاف فولادی فاقد خاموت



الگوی ترک تیر فاقد الیاف فولادی با خاموت



الگوی ترک تیر حاوی الیاف فولادی با خاموت

### 1-الیاف شیشه ای

شیشه E ، شیشه S ، شیشه C و کوارتز

الیاف شیشه ای از لحاظ مقاومت کششی از الیاف فلزی ضعیف تر و از الیاف پلیمری قوی تر می باشد. اما نسبت به الیاف پلیمری دارای نقاط ضعفی می باشد که عبارتست از

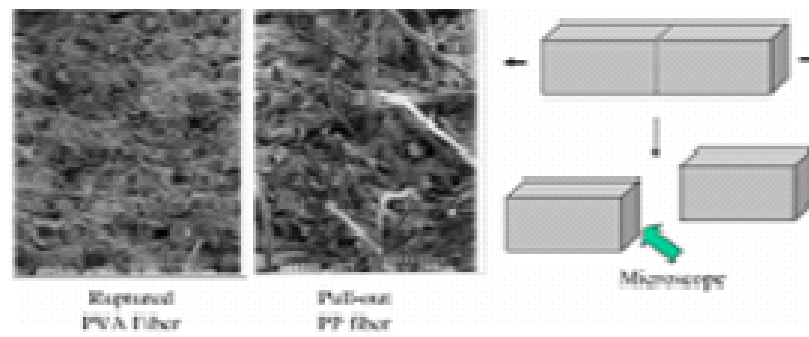
- عدم پخش همگن الیاف در بتن
- عدم اثرگذاری بالا در شکل پذیری بتن
- این نوع الیاف در هنگام اختلاط با بتن ممکن است دچار شکستن شوند
- در محیط قلیایی بتن با مرور زمان از بین می رود

### 2-الیاف کربنی

مقاومت ضربه پذیری بتن الیافی با آزمایش تکرار ضربه در اثر سقوط وزنه بررسی می شود.

### 12-بتن الیافی با Engineered Cementitious Composites یا بتن خمش پذیر Bendable Concrete

این نوع بتن از PVA (پلی وینیل الکل) ساخته شده است که با اضافه شدن این پلیمر به ماتریس بتن خواص آن تغییر کرده و فیبرهلی پلیمری با پل زدن بین ترکها از گسترش آنها جلوگیری می کنند بنابراین کرنش نهایی بالاتر و مود گسیختگی شکل پذیرتر امکانپذیر است معمولاً بتن ساده در کرنش حدود 0.01٪ دچار شکست ناگهانی و ترد بدون اخطار قبلی می گردد با اضافه کردن فیبرهای مذکور کرنش نهایی بتن 200 تا 600 برابر و حدود 2 تا 6٪ می گردد



Microscopic images of PVA and PP fiber reinforced composite

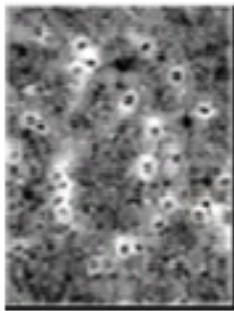
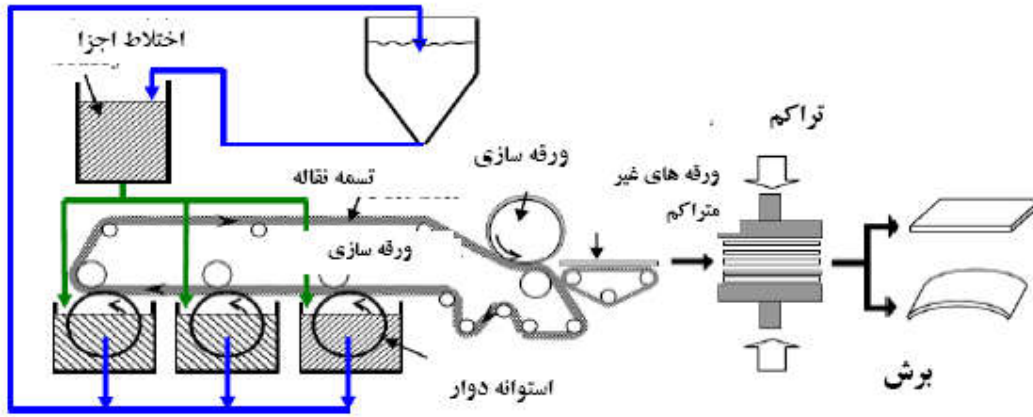


Image of interface between PVA and cement matrix



Response of ECC under flexural loading





### فرآیند ساخت HPB

ساخت پانل توانمند سیمانی HBR از بتن خمش پذیر یا ECC



الف) پانل سیمانی معمولی،  $t=8\text{mm}$



ب) HPB،  $t=8\text{mm}$

نمونه گسیخته شده پس از بارگذاری ضربه ای

- 13- کاربردهای بتن الیافی پلی وینیل الکل
- 1- سازه‌هی در معرض بارگذاری 3 بعدی لایه‌های روسازی بزرگراهها و عرشه پلها و عناصر هسته داخلی ساختمانهای مقاوم در برابر انفجار
- 2- لایه مقاوم برای افزایش دوام در برابر خوردگی سازه‌های بتن آرمه
- 3- لایه‌های دال ECC برای اتصال عرشه‌های پل
- 4- در دیوارهای برشی تقویت لرزه ای شده
- 5- پوشش تیرهای بتن آرمه با دوام برای کنترل خوردگی
- 6- محل اتصال تیر و ستون و در منطق مفاصل
- 7- پانل پیش ساخته برشی برای دیوارهای تقویت شده

8- سازه های در معرض تغییر شکلهای بزرگ و سازه های مدفون نیازمند جلوگیری از نشت و

تغییر شکلهای خاک

9- قالب بندی دائمی

10- عناصر اکستروود شده با خواص سازه ای

11- ساتکریت تر

12- سیستمهای سازه ای تقویت شده با FRP

13- پسابهای تصفیه شده رادیو اکتیو

14- بتن تعمیراتی سازه

14-فواید الیاف ECC

1- نسبت به سیستمهای فولادی و ترکیبهای مصنوعی مرسوم سیستمهای مقاومتری بهتری هستند.

2- در نسبت پایین سیمان، توانایی کنترل ترکهای بلند مدت و کوتاه مدت را فراهم می کند.

3- در نسبت بالای سیمان، جانشین فولاد و سیکه های فولاد می شود و نیاز به آرماتور بندی را کاهش می دهند و یک محلول ضد زنگ که عملکرد سازه را بالا می برد و استهلاک، سایش تجهیزات و هزینه مواد را کاهش می دهد، فراهم می نماید.

این الیاف به دلیل خواص مطلوب شامل دوام بالا ، فاقد الیاف درشت ، فاقد رنگ، کاهش نفوذ آب در بتن، کاهش ریزش و فساد ناگهانی بتن در فرایندهای یخ زدن و آب شدن نسبت به الیاف فولادی ترجیح داده می شود.

15- کاربردهای ECC

1-حفاظت های امنیتی و زلزله ای در سازه های جدید

2-دال سقف انبارهای کالا ، دالهای صنعتی و پیاده رو ها

3- تثبیت و پایداری شیبها و جداربندی تونلها

4-مخلوطهای کارخانه پیش ساخته

5-ملاطهای تعمیر کننده که شامل کمترین زمان گیرش است

6-انبارهای فاضلاب و طاق ها

7-تخته و دیوار سازه ای خیلی لاغر و با عملکرد بالا

16-مراجع:

1.حسین کربلایی،ایمان الیاسیان،لیلا معراجی،بتن پلیمری، سایت Iransaze وپیام مهندس

2. ایمان الیاسیان، تکنولوژی بتنهای توانمند، سایت Iransaze

3.ایمان الیاسیان، مدیریت حفاظت و تعمیرات بتن، سایت Iransaze

4.حسینی ابولفضل، تأثیر الیاف فولادی در کنترل ترکهای کششی بتن. نشریه مرکز تحقیقات مسکن، گ ۲۶۳ ، بهار

۱۳۷۸

5. خالو علیرضا، " رفتار و کاربردهای بتن الیافی ". مجموعه مقالات اولین کنفرانس تکنولوژی بتن ۱۳۷۸، ص ۱۷ /۱۲/ الیافی. دانشگاه صنعتی شریف، شرکت سایبر ۴۱
6. خالو علیرضا ۲، خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف، مجله عمران شریف، شماره هفتم و هشتم، ۲۷ ۲۳ و ۲۶ خرداد و مهر ۱۳۷۱، صفحات ۲۸
7. سیمونیان واهگ، بهره گیری از ترانسه های فولادی پس مانده از صنایع سنگینی در تهیه بتن مسلح با الیاف فولادی، مجموعه مقالات سمینار بتن ۶۷، سازمان برنامه و بودجه، دانشگاه تهران، ۲۶۲ ۲۱ الی ۳۱ خرداد ۶۷، ص ۲۷۱
8. طسوچی محمد ابراهیم، حسینی ابریشمی همایون، گرفتار بتن تقویت شده با الیاف فولادی تحت فشار یا کشش، مجموعه مقالات سمینار بتن ۶۷، سازمان برنامه و بودجه، دانشگاه تهران، ۲۱، ۹۴ الی ۳۱ خرداد، ص ۱۰۳
9. مجموعه مقالات اولین کنفرانس تکنولوژی « مکانیک شکست بتن الیافی »، • کاظمی محمد تقی. ۱۳۷۸ ص ۴۷ تا ۵۹ /۱۲/ بتن الیافی، دانشگاه صنعتی شریف، شرکت سایبر، ۴
10. کیوانی ۱، عبدالله، اصول و تکنولوژی بتن مسلح به الیاف فولادی، انتشارات رودکی ۱۳۶۹ کیوانی ۲،
11. عبدالله، حفاظت کاتدیک سازه های بتن آرمه با الیاف گالوانیزه " مجموعه مقالات ۷۵ ۱۳۷۸. ص ۸۵ /۱۲/ اولین تکنولوژی بتنی الیافی دانشگاه صنعتی شریف و شرکت سایبر، ۴
12. وبلاگ مهندسی معین عمران، " الیاف کربن تکنولوژی جدید کامپوزیت ها"، معین بهرامپور، 1385
13. وبلاگ مهندسی عمران و تکنولوژی (<http://civiltechno.blogfa.com>)
14. پایگاه اطلاع رسانی صنعت ساخت و ساز مرکز عمران ایران (<http://irancivilcenter.com>)
15. طراحی ساختمان های بتن مسلح دکتر شاپور طاحونی انتشارات دانشگاه تهران، 1385
16. آئین نامه بتن ایران (آبا) نشریه شماره 120 چاپ هفتم، 1385
17. ایمان الیاسیان، آزمونهای مخرب و غیرمخرب در بتن و جوش و کاربرد آنها برای درک و ارزیابی گسیختگی عدم چسبندگی در سازه های تقویت شده با ورقه های FRP

Karami" IMPROVING THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE .Sharbatdar, M.K. 18.M VCA 2008/ACF-ELEMENTS BY BENDABLE CONCRETES" The 3<sup>rd</sup> ACF International Conference 19.I.Elyasian" Destructive & Non Destructive Tests in Concrete applications for Evaluation Debonding Failures of FRP Strengthened System" 14 European conference on earthquake engineering, 2010 Ohrid in Republic of Macedonia

20. ACI Committee 440. 1996. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) for Concrete Structures (ACI 440R). ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, American Concrete Institute, Detroit, MI, 68 pp.
21. ACI Committee 544. 1982. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-82). Concrete International, May, Vol. 4, No. 5, pp. 9-30.
22. ACI Committee 544. 1988. Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88). Manual of Concrete Practice, Part 5, American Concrete Institute, Detroit, MI, 18 pp.
23. ACI Committee 544. 1990. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, American Concrete Institute, Detroit, MI, 22 pp.
25. Balaguru 1, P.N and Shah. S. P. 1992. Fiber Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill, New York, 1992.
26. Ezeldin and S. R. Lowe. 1991. Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Rapid-Set Materials. ACI Materials Journal, Jul-Aug, Vol. 88, No. 4, pp. 384-389.
27. Reinhardt and A. E. Naaman (Ed.). 1992. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Proceedings of the International Workshop held by RILEM, ACI and others.
28. June 23-26, 1991, Mainz, Germany; Ed. by H.W. Reinhardt and A.E. Naaman; E & FN Spon, London, xviii, 565 pp. (RILEM Proceedings Vol. 15).

## آزمونهای مخرب و غیر مخرب در بتن و کاربرد آنها برای درک وارزیابی گسیختگی عدم

### چسبندگی در سازه های تقویت شده با ورقه های FRP

#### Destructive & Non Destructive Tests In Concrete application For Evaluation Debonding Failures of FRP Strengthened System

ایمان الیاسیان-کارشناس ارشد سازه [iman.elyasian@gmail.com](mailto:iman.elyasian@gmail.com)

#### چکیده

عدم چسبندگی و بادکردگی (جدایش ورقه) مود شکست زودهنگام و ناگهانی در تقویت خمشی و برشی است که در مقاطع بحرانی تنش در اعضای تقویت شده بتنی اتفاق می افتد، در این خصوص روشهای ارزیابی غیر مخرب نیز وجود دارد که از طریق آن می توان تأثیرات رطوبت و درجه حرارت روی لایه های مختلف سیستم تقویت شده و میزان زبری سطحی که ورقه بر روی آن چسبانده می شود و جهت قرارگیری الیاف FRP و مقاومت در برابر کشیدگی [7] را با رادار و لیزر و رادیوگرافی به بازرسی مود شکست (پایایی و دوام آن) پرداخته می شود.

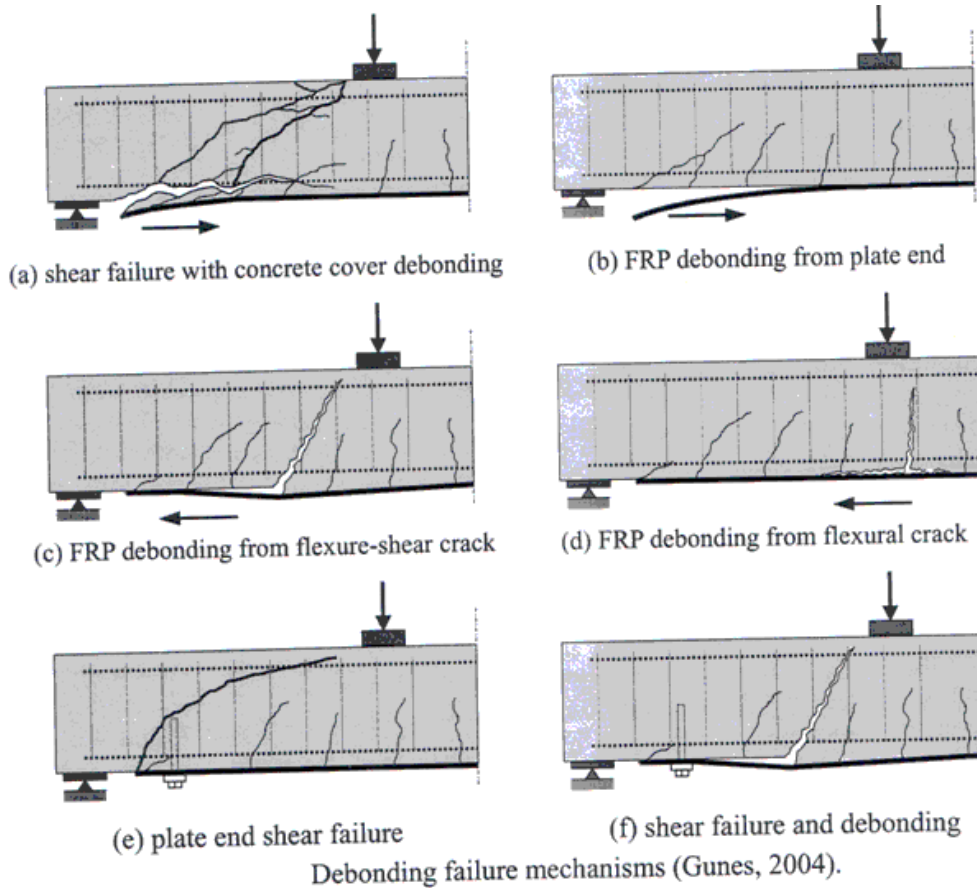
بازرسی - دوام - رادار - آزمونهای مخرب و غیر مخرب بتن - ارزیابی غیر مخرب FRP - کلید واژه

#### مقدمه

تقویت سیستم با FRP در سازه های بتن آرمه به دلیل سبکی وزن و افزایش باربری و سختی عضو بتن آرمه در حال افزایش است ولی مودهای شکست ترد و عدم چسبندگی در لایه های بتن (Debonding) و Delamination و شکست برشی منجر به تفاوت پیش بینی شده با تئوری با بار واقعی شده است مودهای شکست peeling و Debonding در صفحه طولی بتن و یا در چسب بین بتن و لایه FRP رخ می دهد و تأثیرات محیطی و مکانیکی عدم چسبندگی در این مودهای شکست خصوصاً در محیطهای شدید خورنده در حال بررسی است [1] در گذشته برای حل این مشکل از حفاظت کاتدی و پوششهای صنعتی روی سیستم تقویت چون چسبهای اپوکسی و مواد مقاوم در برابر خوردگی استفاده می شود که یکی از این مواد مقاوم پلاستیکهای تقویت شده یا همان FRP ها هستند که مقاومت بالا در مقابل وزن ناچیز و سایر محاسن دارند [7] در این خصوص برای توجیه اقتصادی ارزیابی غیر مخرب برای بازرسی مود شکست Debonding بایستی و دوام توسعه داده شود.

مسئله Debonding مودهای شکست مقاطع بحرانی مانند گسیختگی FRP، خرد شدگی بتن و عدم چسبندگی صفحه FRP در تیرهای بتن آرمه رخ می دهد و Debonding در مناطق با تمرکز تنش بالا و جاهایی که با قطع ماده (به دلیل تغییر سختی و حضور ترکها) رخ می دهد و منجر به کاهش عمده ظرفیت به دلیل حضور و گسترش ترکها در مجاورت فصل مشترک بتن و FRP و کاهش سختی می گردد که در آن بایستی به پارامترهایی چون زبری سطحی که FRP روی آن چسبانده می شود و جهت قرارگیری الیاف و چسبندگی و چسب بین FRP بتن و رطوبت و تغییرات درجه حرارت بستگی دارد. معمولاً مود شکست عدم چسبندگی در 60 تا 70 درصد بالاترین ظرفیت و بار نهایی مقطع اتفاق می افتد [7]. در اینجا لازم است اندکی راجع به مودهای شکست خمشی و برشی غالب در تیر و ستون بحث شود. به طور کلی مودهای شکست خمشی عبارتند از 1- شکست ناشی از گسیختگی FRP 2- شکست ناشی از خرد شدن بتن تحت فشار 3- شکست برشی (بر اثر ترک برشی) 4- کنده شدن بتن پوششی (Delamination) 5- کنده شدن صفحات نگهداری انتهایی (Debonding) 6- ایجاد ترک خمشی در میانه تیر 7- ایجاد ترک برشی-خمشی در میانه تیر و مود شکست کنده شدن پوشش بتنی (Delamination) به 4 مود شکست 1- گسیختگی ناشی از کنده شدن بتن 2- جداسازی بتن از سطح میلگرد 3- گسیختگی برشی موضعی 4- تکه تکه شدن پوشش بتنی و مودهای شکست ستونهای بتنی 1- شکست برشی (ترد و شکننده بوده) منجر به ترکهای قطری در بتن- شکست و از هم باز شدگی میلگردهای طولی، کمانش در میلگردهای طولی می گردد 2- شکست پوشش در ناحیه مفصل

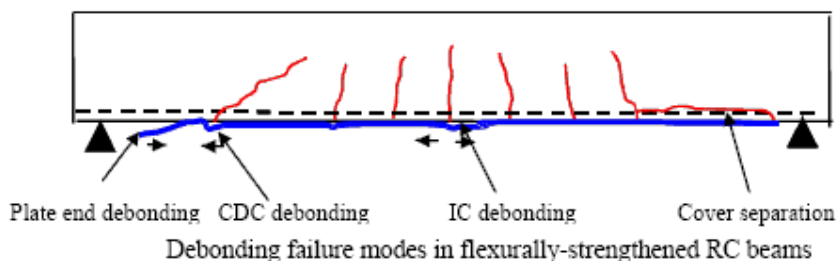
پلاستیک خمشی 3- شکست موضعی در امتداد میلگردهای طولی: در نقاط ماکزیمم لنگر به دلیل تمرکز آرمانتور و جدا شدن بتن و کاهش ظرفیت جذب انرژی و شکل پذیری 4-شکست برشی-خمشی ناشی از قطع میلگردهای طولی برای توضیحات بیشتر به منابع [2,3] مراجعه شود.



شکل مکانیزم مود شکست عدم چسبندگی [1]

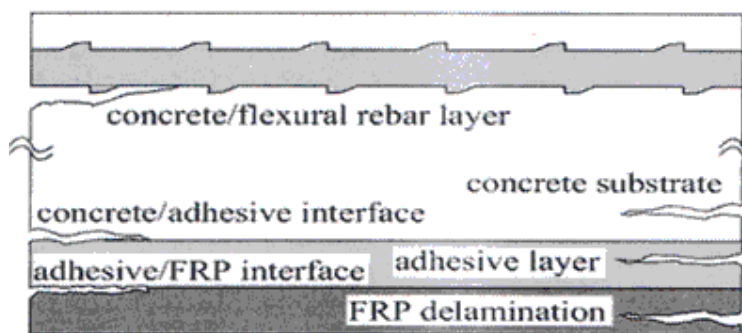
برای مدل کردن تئوری Debonding به روش اجزای محدود (FEM) تلاشهای زیادی صورت گرفته ولی به دلیل کافی نبودن اطلاعات و رفتار پیچیده این مود هنوز رویه علمی و مستدلی در این مورد ارائه نشده است. برای تعیین تنش برشی و نرمال در مقاطع بحرانی از تئوری دایره مور-کلمب در مقاومت مصالح استفاده می شود.

- 1) Plate end debonding/concrete cover separation;
- 2) Critical diagonal crack debonding (CDC debonding);
- 3) Intermediate crack induced debonding (IC debonding).

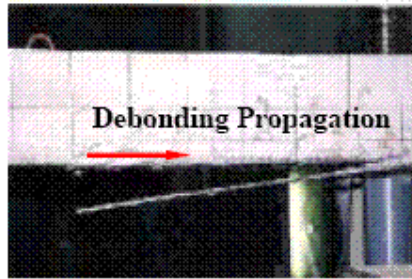


نمایش حالات مختلفی از مود گسیختگی [3] concrete cover delamination

برخی از دلایل ایجاد مود 1- گسیختگی کششی در پوسته بتنی 2- جدایش ورقه FRP در اثر باز شدن ترک برشی یا برشی - خمشی 3- جدایش درون وجهی و کشش خارج از صفحه Interfacial Shear and Peeling 4- نامنظمی در سطح مسطح [3] Planer Surface Irregularities

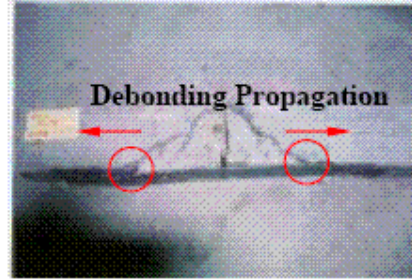


Types of debonding in FRP strengthened RC members



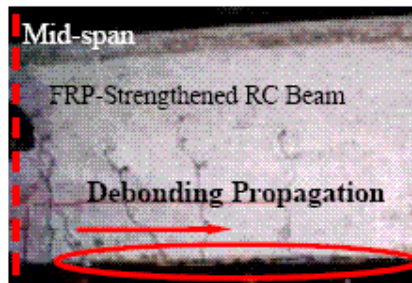
Delamination of FRP at FRP ends

جدایش ورقه FRP در انتهای ورقه



Peeling-off of FRP by Shear Cracks

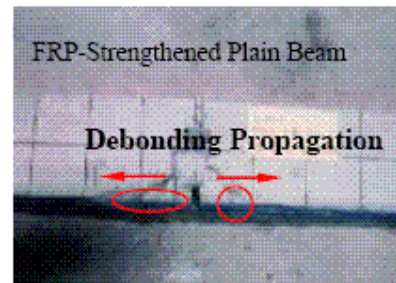
کنده شدن ورقه FRP در میانه ورقه در اثر ترک برشی



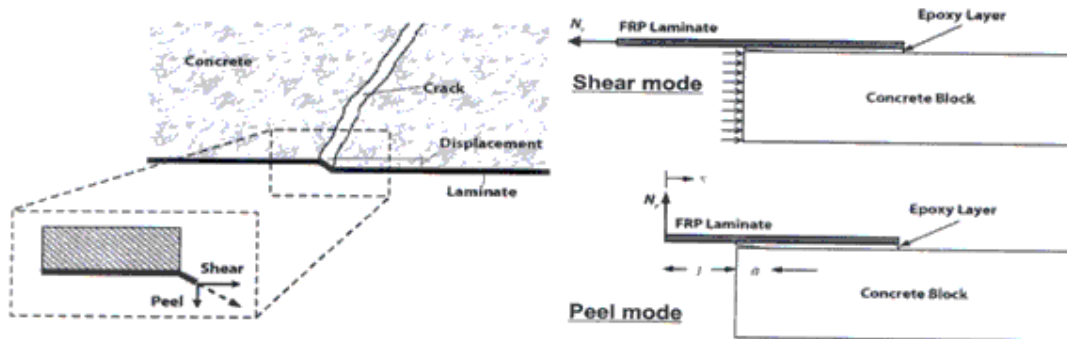
Debonding of FRP Caused by Intermediate Flexural Cracks

گسیختگی عدم پیوند ایجاد شده در ورقه FRP در اثر ترکهای خمشی متوسط

Failure Modes Observed in FRP-Strengthened Concrete Beams



شکل مکانیزم مود شکست عدم چسبندگی [2]

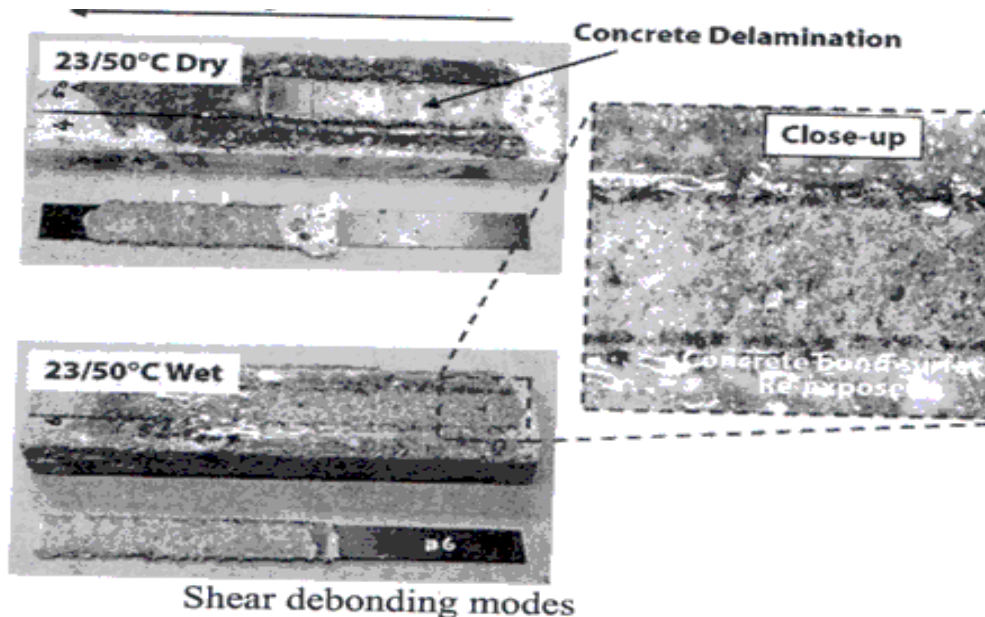


(a) Actual debonding configuration

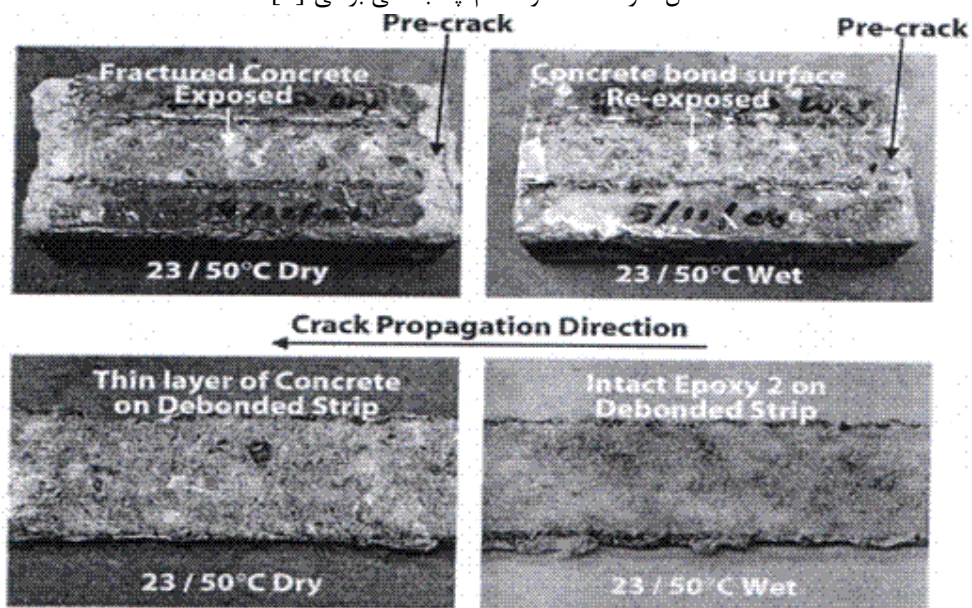
(b) limiting bound fracture models

Actual debonding configuration and limiting bound fracture models

(Au and Büyüköztürk, 2006a).



شکل نمونه تحت مود عدم چسبندگی برشی [1]



Peel debonding modes (Au and Büyüköztürk, 2006a).

شکل نمونه تحت مود عدم چسبندگی بر اثر جدایش [1]

برای جلوگیری از مود گسیختگی Delamination و Debonding به تعیین زبری بایستی از طریق نحوه سندبلاست و ماسه پاشی و دستورالعملهای رنگ آمیزی و طریقه نصب ورقه FRP توجه داشت [10]

به طور کلی آزمایشات بتن را به دو دسته کلی 1- در بتن تازه و 2- در بتن سخت شده تقسیم بندی می کنیم . آزمایشات روی بتن تازه عبارتند از 1- اسلامپ ( مخروط ناقص آبرام) 2- نمونه گیری ( استوانه ای و مکعبی) 3- تعیین حباب هوای بتن 4- درجه تراکم بتن



در مورد آزمایشات بتن سخت شده آنها را به 2 دسته کلی مخرب و غیر مخرب تقسیم بندی می کنیم 1- آزمایش مخرب ( کرگیری ) آزمایش نیمه مخرب نزدیک به سطح ( نفوذ و ینزور) 2- آزمایشات غیر مخرب شامل 1- چکش اشمیت (چکش بر جهندگی) 2- آرماتور یاب 3- اولتراسونیک 4- دیتا اسکن بتن سخت شده 1- آزمایشات مخرب (کرگیری)



آزمایش کرگیری

عوامل تأثیر گذار در تعیین مقاومت مغزه

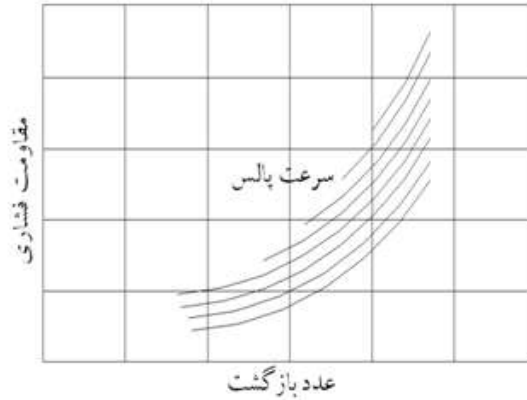
- 1- نوع دستگاه و مته 2- قطر مغزه 3- زاویه 4- نسبت طول به قطر 5- محل نمونه برداری و تاریخچه تنش 6- وجود آرماتور 7- کلاهدک گذاری 8- رطوبت حین شکست 9- افت مقاومت [8]
  - 2- آزمایشات نیمه مخرب نزدیک به سطح (نفوذ وینزور)
  - 3- آزمایشات غیر مخرب
  - 1- چکش اشمیت (معمولی و یجیتالی) 2- آرماتور یاب 3- اولتراسونیک 4- دیتا اسکن
  - 3- آزمایشات غیر مخرب 1- چکش اشمیت (چکش بر جهندگی)
- جهت کنترل یکنواختی بتن-تعیین زمان قالب برداری-تخمین مقاومت در سازه و مصالح ساختمانی



On concrete walls, decks and pillars

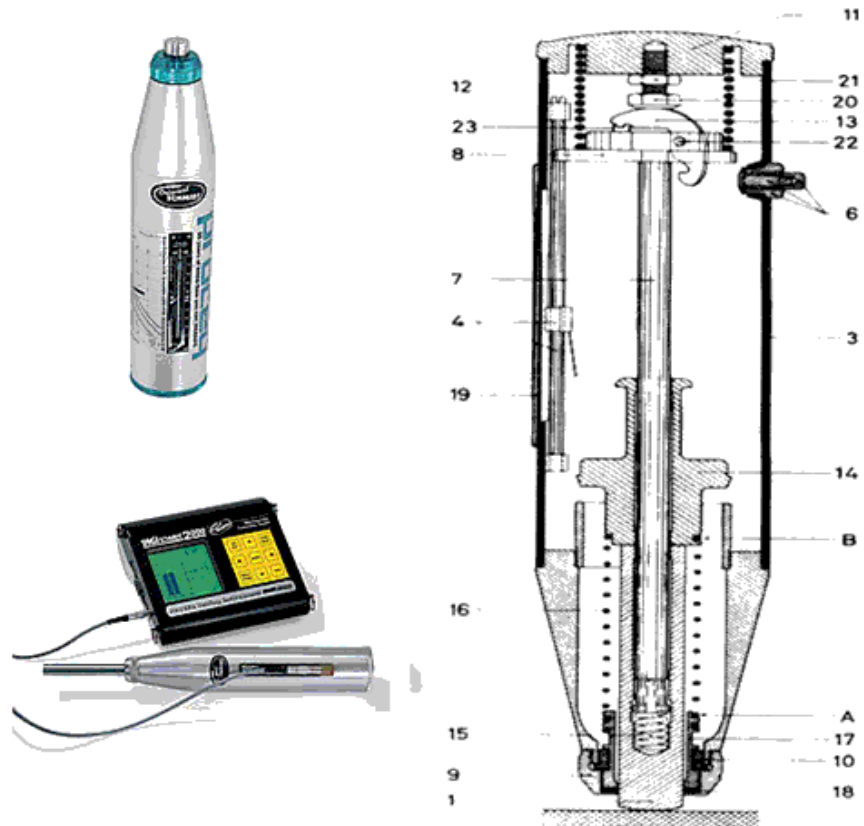


...at any angle



عوامل موثر در عدد بازگشت

- 1- ابعاد و جنس ریزدانه ها
  - 2- جنس سیمان
  - 3- رطوبت
  - 4- شرایط عمل آوری بتن
  - 5- سطح بتن
  - 6- حجم توده
  - 7- وجود آرماتور
  - 8- شرایط بتن سطحی
  - 9- جهت آزمون
  - 10- کالیبراسیون
- اجزای مختلف تشکیل دهنده چکش اشمیت در شکل زیر قابل مشاهده هستند.

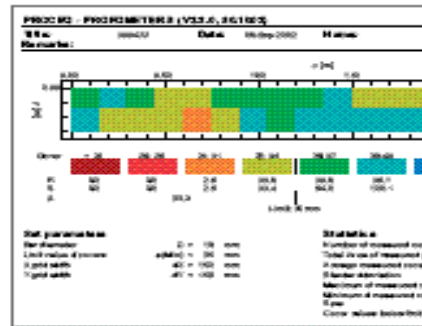
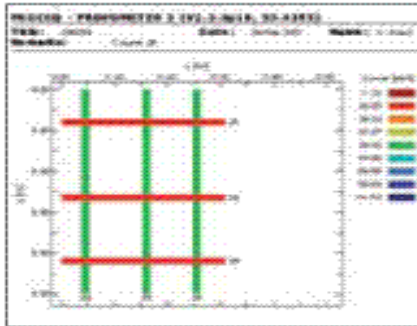


1-impact plunger 3-housing complete 4-sider with guide rod 6-push button,complete 7-hammer guide bar 8-Guide disk 9-Cap 10-two-part ring 11-read cover 12-comperession spring 13-pawl 14-hammer mass 15-Retaining spring 17-guide sleeve 18-felt washer 19-resistance element with input socket 20-trip screw 21-locknut 22-pin 23-pawl spring  
 2-ردیابی آرماتور(آرماتور یاب) (Rebar Detection)

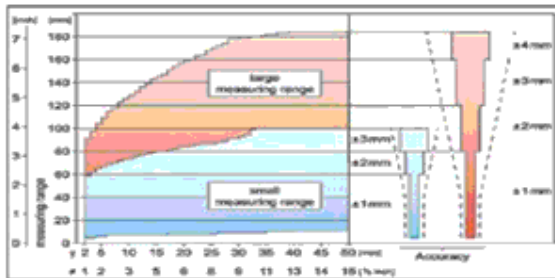




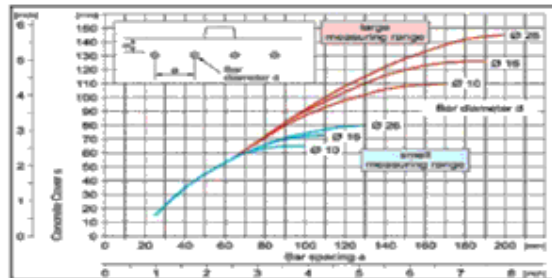
آرما توریاب - PROFOMETER



استفاده از نرم افزار مربوط دستگاه [4]



o bar diameter in mm  
# bar diameter in «Bar size»  
--- accuracy required by BS 1881: Part 204:  
± 2 mm or ± 5%

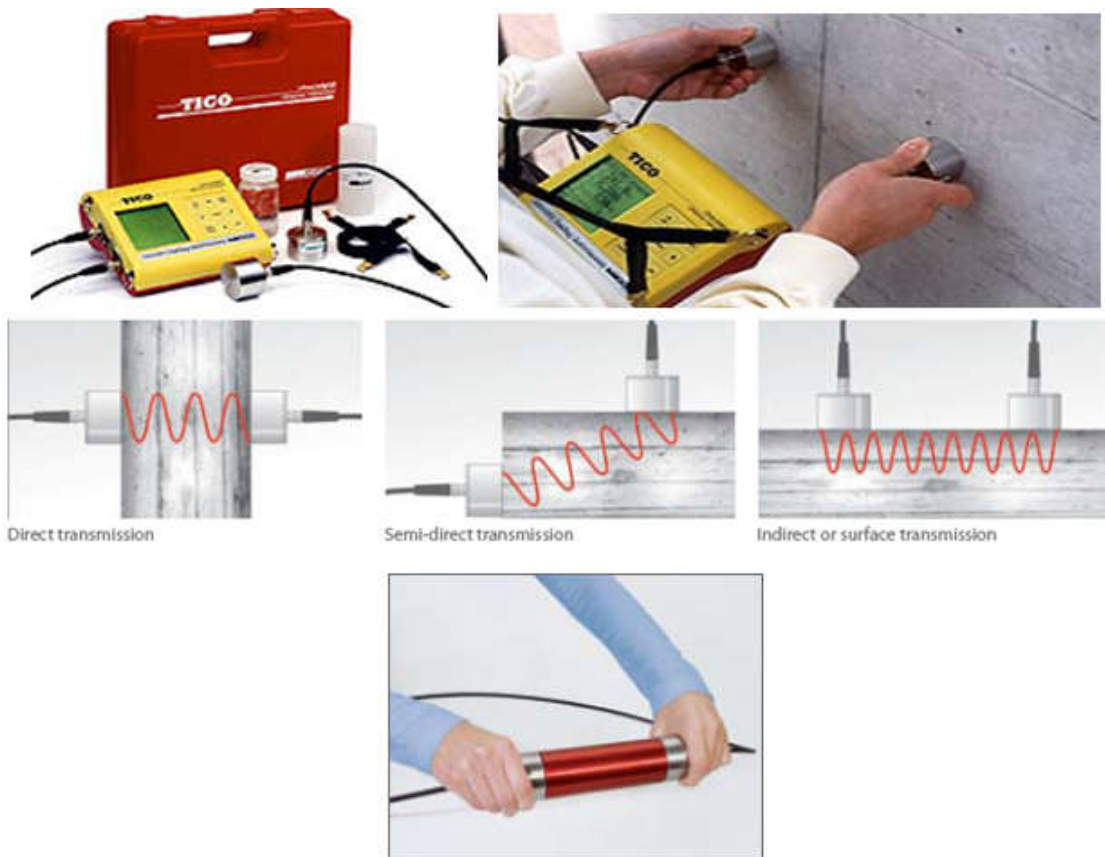


The diagram shows the minimum bar spacing (a) at which the bars can still be individually detected as a function of the concrete cover (s).

Example : Bar diameter d = 16 mm  
Concrete cover s = 55 mm  
Minimum bar spacing a = 70 mm

3- اولتراسونیک ( دامنه کاربرد جهت تعیین مقاومت بتن، بررسی خواص بتن و اندازه گیری تغییرات خواص بتن در طول زمان، تعیین یکنواختی بتن در یک عضو یا بین اعضای سازه، تشخیص عیوبی مانند ترکها، وجود منافذ و تخلخل در بتن و اندازه گیری آن، تعیین مدول لاستیسیتیته و ضریب پواسون دینامیکی [8] )

TICO



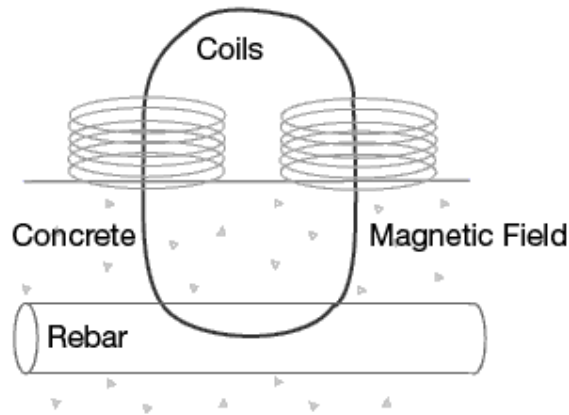
- نوعی دستگاه تراسونیک (ماورای صوت) برای تشخیص کیفیت بتن شامل یکنواختی ، پیدا کردن حفرات، ترکها و عیوب بتن ، مدول الاستیته و مقاومت فشاری بتن عوامل مؤثر در نتایج آزمایش اولتراسونیک
- 1- شکل و اندازه نونه 2- دمای بتن 3- مقدار رطوبت 4- وجود آرماتور در بتن 5- طول مسیر اندازه گیری سرعت پالس [ 8
  - [ عوامل مؤثر در اندازه گیری سرعت پالس
  - 1- نحوه انتقال 2- نحوه اتصال مولد 3- رطوبت 4- دما 5- طول مسیر 6- وجود آرماتور [9]
  - 4- دیتا اسکن ( دامنه کاربرد 1- جهت تعیین محل آرماتور 2- اندازه گیری قطر میلگرد 3- اندازه گیری پوشش بتن 4- ذخیره سازی مقادیر اندازه گیری شده پوشش بتن و ارزیابی آماری)
  - سایر آزمایشهای غیر مخرب
  - 1- پرتو نگاری با اشعه گاما و ایکس (به منظور پی بردن به منافذ)
  - 2- پرتو سنجی (برای سنجش چگالی)
  - 3- انتقال یا انعکاس نوترون (برای تخمین مقدار رطوبت)
  - 4- رادار با نفوذ سطحی (جهت پی بردن به منافذ ، ترکها و لایه-لایه شدن )
  - 5- پیزواک ضربه (تخلخل و خلل و فرج)
  - 6- تعیین انتشارات صوتی امواج ارتعاشی گذرا (تعیین توسعه ترک)
  - 7- فرکانس شدید (مدول الاستیسیته دینامیکی بتن)



DYNA - برای تشخیص مقاومت کششی و چسبندگی بتن



CANIN - برای تعیین خوردگی آرماتور در بتن از طریق تعیین مقاومت الکتریکی بتن Corrosion analysis

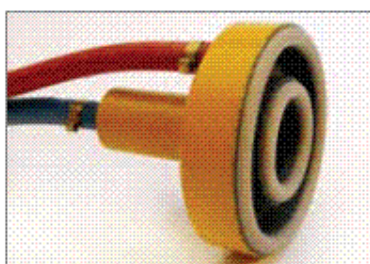


PROFOSCOPE - برای تعیین پوشش و کاور بتن

لستفاده از خاصیت میدلن مغناطیسی تعیین محل آرماتور - تعیین نقطه میانی آرماتور 3- تعیین پوشش 4- تعیین فطر آرماتور 5- تعیین جهت قرار گیری آرماتور



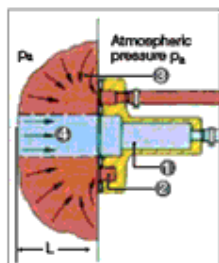
PAROTESTER- برای تعیین سختی ورق-Foil یا حتی قشرهای نازک film



Two-chamber vacuum cell with sealing rings

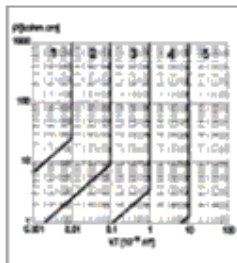


Peramability Analysis Torrent برای تعیین نفوذ پذیری



- ① Inner chamber, pressure  $p_i$
  - ② Outer chamber, pressure  $P_o$   
 $P_o = p_i$
  - ③ Air flow to the outer chamber
  - ④ Air flow to the inner chamber
- $L$  = Depth of penetration of the vacuum

Air flow to the two chambers of the vacuum cell

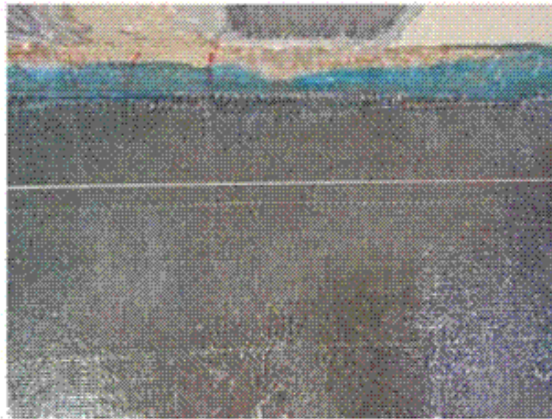


Nomogram for concrete quality class

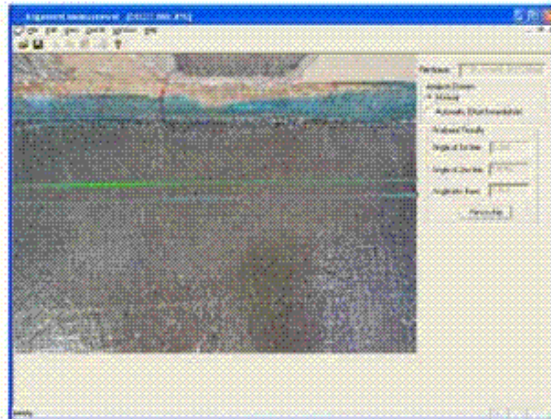
In the case of moist concrete, the measured permeability is lower, i.e. the concrete quality seems to be too good. This effect can be corrected using the electrical resistance  $\rho$  of the concrete. The concrete quality class is determined from  $kT$  and  $\rho$  in a nomogram.

نتایج استفاده از آزمونهای غیر مخرب در بتن  
 1- محدودیت و تأثیر پذیری از شرایط مختلف 2- نیاز به کالیبره 3- تخمین مقاومت نه تعیین آن 4- مقاومت واقعی نه بالقوه (تئوریک) 5- اجبار انجام آزمایشهای بتن سخت شده 6- ترکیب روشهای مختلف و مقایسه آنها 7- بررسی کلیه معایب بتن 8- عدم استفاده از نسخه از پیش تعیین شده دستور آزمونها 9- تصمیم نهایی باروشهای آماری و قضاوت مهندسی [9]

روشهای غیر مخرب در ارزیابی مود شکست Debonding  
 معمولاً برای این منظور یک پایش مستمر در طول 5 سال با بازرسی موردی در دوره 6 ماهه الزامی است

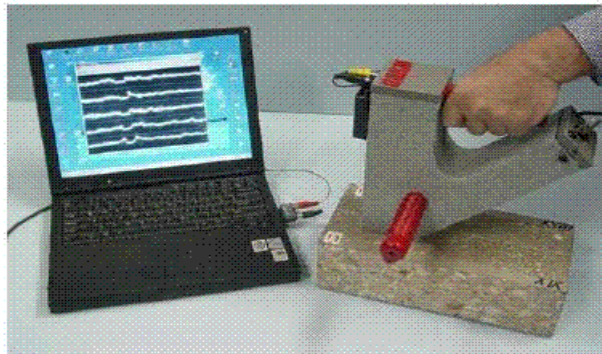


FRP sheets with yellow tracer and overlain by white chord.

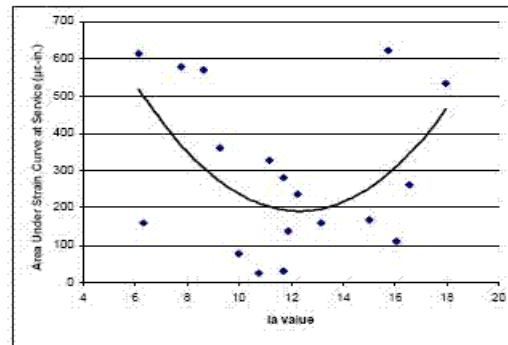


Measurement of angle between the tracer and the chord.

اختلاف راستای الیاف اصلی FRP با راستای افقی (تأثیرات آن در سختی مقطع، باربری و ایجاد مودهای شکست زود هنگام و ترد قابل اندازه گیری است)



New laser profilometer.



Relationship between roughness ( $I_a$ ) and stiffness (area under strain curve).

رسم کننده تراز لیزری برای تعیین تأثیرات زبری سطح و نقش آن در تقویت ورقه FRP



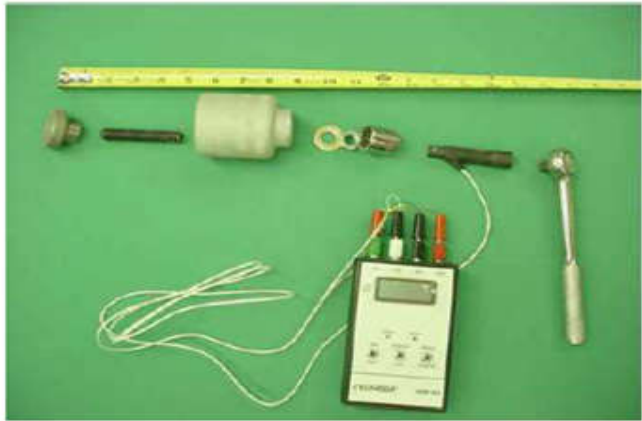
Olson Instruments impact echo tester.



Impact echo tester modified with air coupled receiver.

اولسون اندازه گیری امواج صوتی ضربه ای برای تشخیص احتمال Delamination



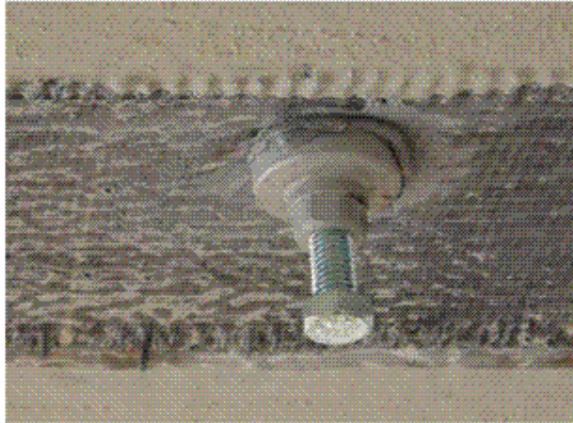


Components of the Pull-off tester.



Pull-off tester; destructive testing.

### تست بیرون کشیدگی ورقه های FRP



Pull-off plug installed on the bridge deck

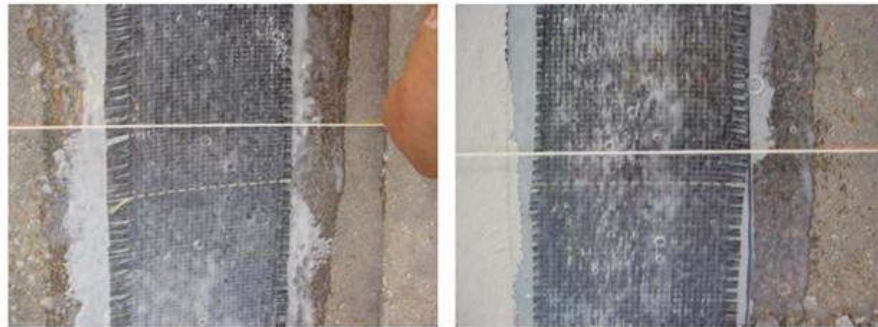


Pull-off testing.



Roughness measurements on the bridge deck

تست اندازه گیری زبری سطح با لیزر پروفایل متر برای بررسی چسبندگی مناسب ورقه FRP



Alignment errors of 7.2 and 0.9°, respectively.



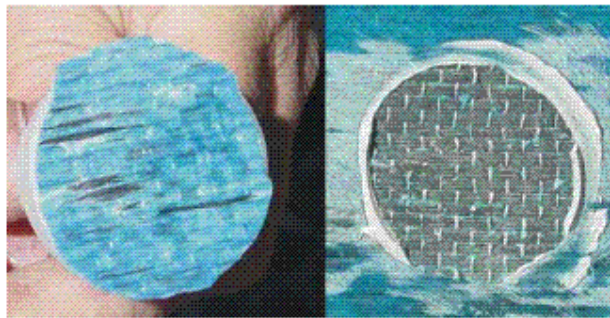
Surface preparation by sandblasting.

"Forced" delamination by air injection.

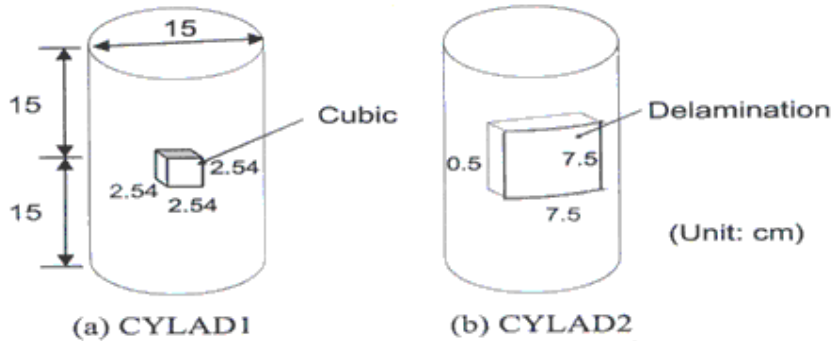
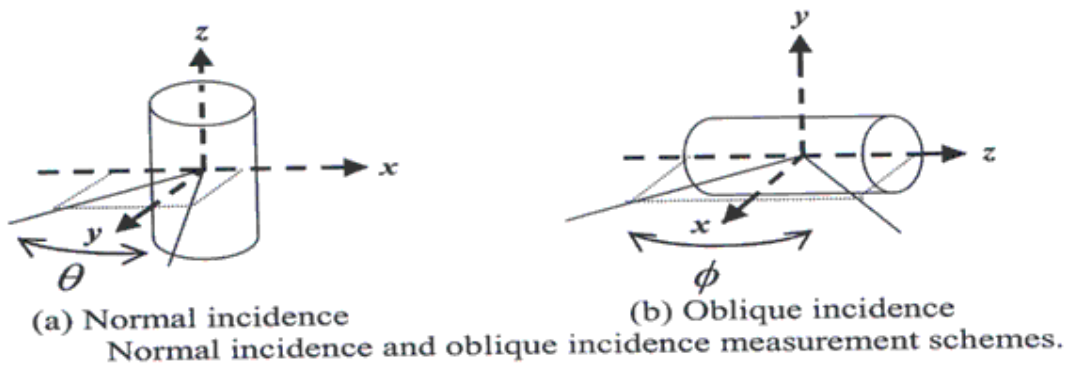
آماده سازی سطح با ماسه پاشی و Delamination در اثر تزریق هوا (هوای محبوس شده)

و در بتن آرمه برای تشخیص مدول الاستیسیته و مقاومت انجام می شود امروزه برای تشخیص مودهای شکست در اعضای بتن آرمه تقویت شده با FRP استفاده می شود روش امواج فرا صوتی ماورای بنفش (UT) و تست رادیوگرافی RT دارای محبوبیت بیشتری در بررسی و ارزیابی مود شکست Debonding در حال استفاده است. یکی از روشها که تحقیقات زیادی در این زمینه در دانشگاه MIT آمریکا درمورد آن انجام گرفته است ، استفاده از رادارهای میدان-دور (far-field airborne radar) است که در آن از تغییرات فرکانس پی به ضعف واحتمال شکست می برند.. [ 1 ]

روش مغزه گیری و کر گیری از نمونه تقویت شده با FRP Laminate نیز انجام می گیرد که به دلیل رفتار ارتوتروپیک FRP , مغزه یا نمونه را در 2 جهت عمودی و افقی مورد ارزیابی قرار می دهند و آزمایشات نشان می دهد تغییر درجه حرارت و رطوبت نقش بسزایی در مود شکست پیچیده Debonding در فصل مشترک بتن و ورقه FRP دارد .



Pull-off plugs separating at the FRP/epoxy interface.





آزمایش کشش خالص روی ورقه های FRP برای تعیین مقاومت کششی آنها در راستای الیاف

نتیجه گیری :

با توجه به پیچیدگی مود شکست Debonding چه از لحاظ تئوری برای مدل کردن ریاضی به روش اجزای محدود و تفاضل محدود چه از نظر آزمایشگاهی لزوم تحقیقات مفصل در این زمینه خصوصاً برای تشخیص تأثیرات پایایی و دوام سیستم تقویت شده با FRP در اثر تغییر رطوبت و درجه حرارت و ... این مود شکست در دراز مدت و ارائه روشهای بازرسی نوین در این زمینه ضروری است.

[1] Oral Buyukozturk, Tzu-Yang Yu, Understanding and Assessment of debonding failures in FRP-Concrete systems, Seventh international Congress on Advanced in Civil engineering October 11-13 2006 Yildiz Technical University Turkey-Istambul – Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Cambridge, U.S.A.

[2] ایمان الیاسیان، آشنایی با روشهای تقویت خمشی و برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP و مکانیزم گسیختگی محتمل، سایت نظام مهندسی (<http://www.maskan-sakhteman.ir>) پیام مهندس، سال هفتم، شماره 33 - شهریورماه 85 صفحه 43-48 - نما - ماهنامه فنی - تخصصی سازمان نظام مهندسی ساختمان استان اصفهان، سال 15 شماره 142-143 دی و بهمن 85 صفحه 114-121

[3] ایمان الیاسیان، بررسی مود شکست Delamination در تقویت خمشی تیر بتن آرمه، سایت نظام مهندسی و مرکز عمران ایران

(<http://www.Irancivilcenter.com>)

[4]- Gustavo Tumialan, Paola Serra, Antonio Nanni, Abdeldjelil Belarbi, "Concrete Cover Delamination in RC Beams Strengthened with FRP Sheets" SP 188 ACI Journal, 4<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforced Concrete Structures Nov 1999 pp725-735

[5]- Hedong Niu; Zhishen Wu, Ibaraki University, Hitachi, Japan "Analytical modeling failure of FRP-strengthened Flexural structures  
http://www.proceq.com سایت 6-

[7] N.Marez, G.Galecki, and A.Nanni "Experimental Non-Destructive Testing of FRP Materials, Instalation, and Performance, Dallas County Bridge, Missouri, USA" University of Missouri-Rolla, USA"

امیرمحمودزاده، محمود قربانی، بهرام نادى، آزمایشات غیر مخرب، مهندسین مشاور شاخص سازان [8]  
 [9] امیر علی ماهوتی، اولین کنفرانس بین المللی مقاوم سازی لرزه ای، تبریز- ایران، 29 مهر الی 1 آبان ماه  
 1387، تخمین مقاومت بتن سازه های تحت مقاوم سازی و بهسازی به کمک آزمونهای غیر مخرب و نیمه مخرب،  
 مهندسین مشاور تل تاو تبریز

[10] ایمان الیاسیان، تکنیکهای تسلیح سازه های بتن آرمه با FRP <http://www.Irancivilcenter.com>  
 [11] هنر بخش، روشهای آزمایش برای سازه های فولادی، بتنی و ساختمانهای مصالح بنایی، انجمن مهندسی  
 زلزله ایران، مهندسان مشاور سرزمین، خردادماه 1385

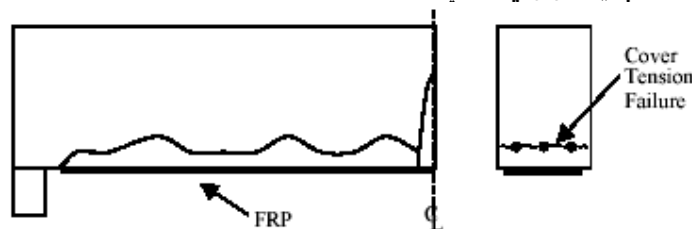
### Delamination in Flexural strengthening of beams with FRP

ظرفیت سازه ای کامل یک ورقه FRP بستگی به نحوه طراحی، نوع سازه و کیفیت اجرای لایه بتنی دارد.

**Bond and Delamination:** عدم چسبندگی و پوسته شدن یا جدایش ورقه FRP از سطح بتن: در مکانیزم انتقال برش و نواحی موضعی کشش در سطح بین بتن و لایه FRP، جدایش ورقه FRP از سطح بتن بخاطر ضعف در سطح مشترک بین لایه FRP و بتن رخ می دهد. دلیل این پدیده پیچیده است ولی آنچه مسلم است بایستی جلوی مکانیزم گسیختگی را گرفت.

### انواع Delamination در حالت تقویت خمشی : 1- گسیختگی کششی در پوشش بتنی : Cover tension

این مکانیزم گسیختگی در محل ترکهای خمشی رخ می دهد و به سمت انتهای ورقه FRP گسترش می یابد و پیش می رود. در ورقه های فولادی تقویتی گسیختگی بر عکس است. معمولاً Delamination در انتهای ورقه فولادی در اثر تمرکز تنش آغاز می شود و به سمت مرکز تیر پیش می رود ولی در ورقه FRP گسیختگی از نواحی لنگر خمشی حداکثر ( مرکز تیر در تیر دو سر مفصل ) شروع شده و به سمت انتهای ورقه پیشروی می کند.

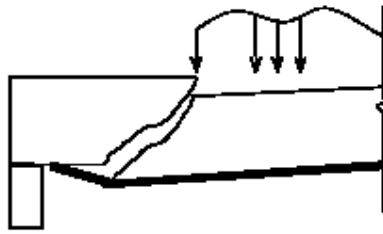


( ) delamination در اثر گسیختگی کششی در پوشش بتنی

### 2- جدایش ورقه FRP در اثر باز شدن ترک برشی یا برشی-خمشی : Shear beam

تیرهایی که بیش از حد برای خمش آرماتورگذاری شده اند بر اثر برش یا ترکیب خمش+ برش گسیخته می شوند، معمولاً در ناحیه برش حداکثر ترکهای برشی رخ می دهد.

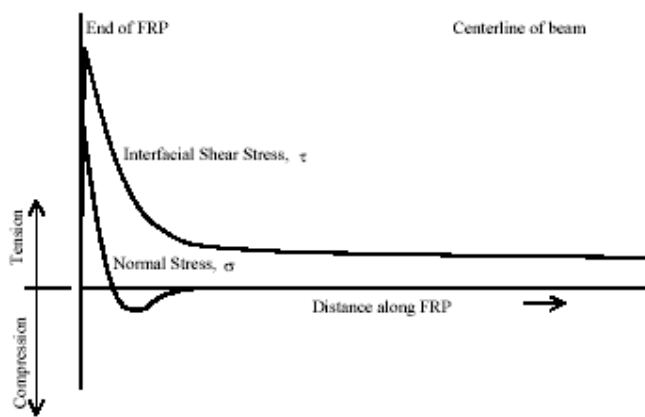
زمانی که ترکهای برشی باز می شوند جابجایی موضعی در وجه کششی منجر به جدایش ورقه FRP از سطح بتن می گردد .



( ) Delamination در اثر ترکهای برشی

### 3- جدایش درون وجهی و کشش خارج از صفحه : Interfacial shear and peeling

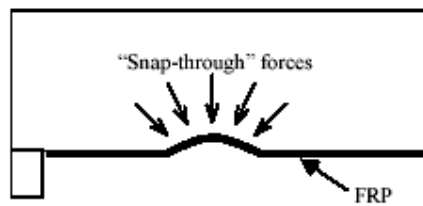
بر اثر توزیع تنش متفاوت از سایر نقاط در مجاورت انتهای ورقه FRP و تنش یکنواخت و متوسط در سایر نواحی منجر به جدایش ورقه FRP می گردد . به عبارت دیگر تفاوت بین تنش حداکثر و تنش متوسط منجر به جدایش ورقه می گردد . خصوصاً نواحی قطع ناگهانی FRP به دلیل ضخامت کم چسب و ورقه FRP مستعد برای جدایش است . لذا توصیه می شود قطع ورقه FRP به صورت پلکانی با رعایت طول قطع 6 اینچ یا 15 سانتیمتر برای هر لایه باشد



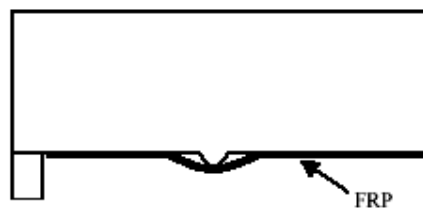
دیاگرام توزیع تنش برشی درون وجهی و نرمال در طول ورقه FRP چسبیده شده

4- نامنظمی در سطح مسطح : Planar surface Irregularities

اثرات انحنای تیر بتن آرمه بر اثر بار اعمالی و برآمدگی و فرورفتگی در سطح بتن منجر به جدایش ورقه FRP و Delamination می گردد .



*Snap-through behavior of FRP bonded to contour*



*FRP bridging over a protrusion*

## روشهاي جلوگيري از Delamination :

### 1- مهار مکانیکی Mechanical anchorage :

در این حالت از بست مکانیکی یا fastener استفاده می شود . در این روش انتهای ورقه را با دریل سوراخ کرده وبا بست مکانیکی آن را به تیر بتن آرمه متصل می کنند . عیب این روش در این است که تنش لهدگی در این حالت افزایش یافته ، هزینه نصب افزایش یافته و دوام FRP کاهش می یابد .



کاربرد بست مکانیکی برای اتصال ورقه FRP در تقویت خمشی به تیر بتن آرمه

### 2- رعایت طول گیرداری یا چسبندگی : Development Length

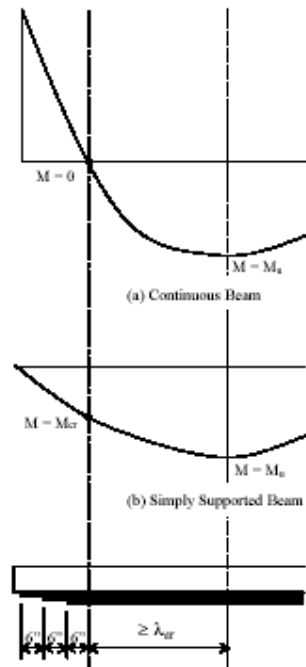
طول گیر داری بستگی به توزیع تنش چسبندگی ، ضخامت ، تعداد لایه های FRP و ماکزیمم تنش کششی در ورقه FRP دارد . معمولاً توزیع تنش چسبندگی FRP به صورت خطی و مثلثی شکل در نظر گرفته می شود که از تنش کششی موجود در FRP تا صفر کاهش می یابد سپس از صفر تا تنش کششی یک جهته بتن آرمه افزایش می یابد .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda_{df}}{n} = \frac{f_{fu} t_f}{3\sqrt{f'_c}} \\ \frac{\lambda_{df}}{n} = \frac{2f_{fu} t_f}{f_{ct}} \end{array} \right.$$



**3- وصله کردن :** Splices فرض بر این است که وصله پوششی ( همپوشانی یا Lap Splices ) در راستای الیاف FRP باشد و در روند طراحی فرض بر این است که نیروی انتقالی در جهت عمود بر الیاف FRP وجود ندارد ( بنابراین در این راستا همپوشانی و وصله پوششی نیاز نیست )

**پیدا کردن محل قطع :** (Cutoff point) قطع وصله ها مانند قطع آرماتور در تیر بتن آرمه به صورت یکجا و در یک محل انجام نشود ، بلکه با رعایت یک طول مشخص 6 اینچ یا 15 سانتیمتر به صورت پله ای صورت گیرد . (با توجه به شکل زیر )



فرض بر این است که لایه FRP 6 اینچ بعد از نقطه عطف ( محل ممان صفر ) (مانند فاصله بین قطع تئوری و قطع اجرایی آرماتور) به صورت پله ای صورت گیرد ( هر لایه با لایه قبلی 15 سانتیمتر فاصله داشته باشد . )

# کاربرد کامپوزیت‌های FRP در سازه‌های بتن آرمه در محیط‌های خوردنده و بررسی دوام آنها

مهدیس آباده زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه علم و

فرهنگ - تهران

حامد صالح فرد

کارشناس ارشد مهندسی عمران

## چکیده

خوردگی میلگردهای فولادی در سازه‌های بتن مسلح که در معرض محیط‌های خوردنده کلروری و کربناتی قرار دارند، یک مسأله بسیار اساسی تلقی می‌شود. وقتی که یک سازه بتن آرمه به صورت دراز مدت در معرض عناصر خوردنده نظیر نمک‌ها، اسیدها و کلروها قرار گیرد، میلگردها به دلیل خوردگی، قسمتی از ظرفیت خود را از دست خواهند داد. لذا تدابیر ویژه‌ای اتخاذ گردیده که از جمله می‌توان به حفاظت کاتدیک اشاره نمود. با این وجود برای حذف کامل این مسأله، توجه ویژه‌ای به جانشینی کامل میلگردهای فولادی با یک ماده جدید مقاوم معطوف گردیده است. در این مقاله، جهت حصول یک سازه مقاوم در مقابل خوردگی مروری بر خواص، مزایا و معایب مصالح کامپوزیت FRP عنوان جانشین کامل فولاد در سازه بتن، مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: الیاف FRP، سازه‌های بتن مسلح، خوردگی، مقاوم سازی

## مقدمه

بسیاری از سازه‌های بتن آرمه موجود در دنیا در اثر تماس با سولفات‌ها، کلریدها و سایر عوامل خوردنده، دچار آسیب‌های اساسی شده‌اند. این مسأله هزینه‌های زیادی را برای تعمیر، بازسازی و یا تعویض سازه‌های آسیب دیده در سراسر دنیا موجب شده است. این مسأله و عواقب آن گاهی نه تنها به عنوان یک مسأله مهندسی، بلکه به عنوان یک مسأله اجتماعی جدی تلقی شده است [1]. تعمیر و جایگزینی سازه‌های بتنی آسیب‌دیده میلیون‌ها دلار خسارت در دنیا به دنبال داشته است. در آمریکا، بیش از 40 درصد پلها در شاهراهها نیاز به تعویض و یا بازسازی دارند [2]. هزینه بازسازی و یا تعمیر سازه‌های پارکینگ در کانادا، 4 تا 6 میلیارد دلار کانادا تخمین زده شده است [3]. هزینه تعمیر پل‌های شاهراهها در امریکا در حدود 50 میلیارد دلار برآورد شده است؛ در حالیکه برای بازسازی کلیه سازه‌های بتن آرمه آسیب‌دیده در امریکا در اثر مسأله خوردگی میلگردها، پیش‌بینی شده که به بودجه نجومی 1 تا 3 تریلیون دلار نیاز است [3]! از مواردی که سازه‌های بتن آرمه به صورت سنتی مورد استفاده قرار می‌گرفته، کاربرد آن در مجاورت آب و نیز در محیط‌های دریایی بوده است. تاریخچه کاربرد بتن آرمه و بتن پیش‌تنیده در کارهای دریایی به سال 1896 بر می‌گردد [4]. دلیل عمده این مسأله، خواص ذاتی بتن و منجمله مقاومت خوب و سهولت در قابلیت کاربرد آن چه در بتن‌ریزی در جا و چه در بتن پیش‌تنیده بوده است. با این وجود شرایط آب و هوایی و محیطی خشن و خوردنده اطراف سازه‌های ساحلی و دریایی همواره به عنوان یک تهدید جدی برای اعضاء بتن آرمه محسوب گردیده است. در محیط‌های ساحلی و دریایی، خاک، آب زیرزمینی و هوا، اکثراً حاوی مقادیر زیادی از نمکها شامل ترکیبات سولفور و کلرید هستند. در یک محیط دریایی نظیر خلیج فارس، شرایط جغرافیایی و آب و هوایی نامناسب، که بسیاری از عوامل خوردنده را به دنبال دارد، با درجه حرارت‌های بالا و نیز رطوبت‌های بالا همراه شده که نتیجتاً خوردگی در

فولادهای به کار رفته در بتن آرمه کاملاً تشدید می‌شود. در مناطق ساحلی خلیج فارس، در تابستان درجه‌ی حرارت از 20 تا 50 درجه‌ی سانتیگراد تغییر می‌کند، در حالیکه گاه اختلاف دمای شب و روز، بیش از 30 درجه‌ی سانتیگراد متغیر است. این در حالی است که رطوبت نسبی اغلب بالای 60 درصد بوده و بعضاً نزدیک به 100 درصد است. به علاوه هوای مجاور تمرکز بالایی از دی‌اکسید گوگرد و ذرات نمک دارد [5]. به همین جهت است که از منطقه‌ی دریایی خلیج فارس به عنوان یکی از مخرب‌ترین محیط‌ها برای بتن در دنیا یاد شده است [6]. در چنین شرایط، ترک‌ها و ریزترک‌های متعددی در اثر انقباض و نیز تغییرات حرارتی و رطوبتی ایجاد شده، که این مساله به نوبه‌ی خود، نفوذ کلریدها و سولفات‌های مهاجم را به داخل بتن تشدید کرده، و شرایط مستعدی برای خوردگی فولاد فراهم می‌آورد [7-9]. به همین جهت بسیاری از سازه‌های بتن مسلح در نواحی ساحلی ایران نظیر سواحل بندرعباس، در کمتر از 5 سال از نظر سازه‌ای غیر قابل استفاده گردیده‌اند. نظیر این مساله برای بسیاری از سازه‌های در مجاورت آب، که در محیط دریایی و ساحلی قرار ندارند نیز وجود دارد. پایه‌های پل، آبگیرها، سدها و کانال‌های بتن آرمه نیز از این مورد مستثنی نبوده و اغلب به دلیل وجود یون سولفات و کلرید، از خوردگی فولاد رنج می‌برند.

### راه حل مساله

تکنیک‌هایی چند، جهت جلوگیری از خوردگی قطعات فولادی الحاقی به سازه و نیز فولاد در بتن مسلح توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است که از بین آنها می‌توان به پوشش اپوکسی بر قطعات فولادی و میلگردها، تزریق پلیمر به سطوح بتنی و حفاظت کاتدیک میلگردها اشاره نمود. با این وجود هر یک از این تکنیک‌ها فقط تا حدودی موفق بوده است [10]. برای حذف کامل مساله، توجه محققین به جانشین کردن قطعات فولادی و میلگردهای فولادی با مصالح جدید مقاوم در مقابل خوردگی، معطوف گردیده است.

مواد کامپوزیتی FRP (Fiber Reinforced Polymers/Plastics) مواد بسیار مقاوم در مقابل محیط‌های خورنده همچون محیط‌های نمکی و قلیایی هستند. به همین دلیل امروزه کامپوزیت‌های FRP، موضوع تحقیقات توسعه‌ای وسیعی به عنوان جانشین قطعات و میلگردهای فولادی و کابل‌های پیش‌تنیدگی شده‌اند. چنین تحقیقاتی به خصوص برای سازه‌های در مجاورت آب و بالاخص در محیط‌های دریایی و ساحلی، به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند.

### ساختار مصالح FRP

مواد FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ فایبر (الیاف) و رزین (ماده‌ی چسباننده). فایبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در ماده‌ی FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فایبر، قطر آن در محدوده‌ی 5 تا 25 میکرون می‌باشد [11].

رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند، که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود، ماتریس‌های با مقاومت کم به صورت چشمگیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آن اثر نمی‌گذارند. ماتریس (رزین) را می‌توان از مخلوط‌های ترموست و یا ترموپلاستیک انتخاب کرد. ماتریس‌های ترموست با اعمال حرارت سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند؛ در حالیکه رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت، مایع نموده و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. به عنوان رزین‌های ترموست می‌توان از پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی، و به عنوان رزین‌های ترموپلاستیک از پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن (PP)، نام برد [3].

فایبر ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشد که در اینصورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نامهای GFRP، CFRP، VFRP، AFRP، شناخته می‌شود. در ادامه شرح مختصری از بعضی از فایبرهای متداول ارائه خواهد شد.

### مقاومت در مقابل خوردگی

بدون شک برجسته‌ترین و اساسی‌ترین خاصیت محصولات کامپوزیتی FRP مقاومت آنها در مقابل خوردگی است. در حقیقت این خاصیت ماده FRP تنها دلیل نامزد کردن آنها به عنوان یک گزینه جانشین برای اجزاء فولادی و نیز میلگردهای فولادی است. به خصوص در سازه‌های بندری، ساحلی و دریایی، مقاومت خوب کامپوزیت FRP در مقابل خوردگی، سودمندترین مشخصه میلگردهای FRP است [12].

### مقاومت کششی و فشاری

مصالح FRP معمولاً مقاومت کششی بسیار بالایی دارند، که از مقاومت کششی فولاد به مراتب بیشتر است. مقاومت کششی بالای میلگردهای FRP کاربرد آنها را برای سازه‌های بتن آرمه، خصوصاً برای سازه‌های پیش‌تنیده بسیار مناسب نموده است. مقاومت کششی مصالح FRP اساساً به مقاومت کششی، نسبت حجمی، اندازه و سطح مقطع فایبرهای بکار رفته در آنها بستگی دارد. مقاومت کششی محصولات FRP برای میله‌های با الیاف کربن 1100 تا 2200MPa، برای میله‌های با الیاف شیشه 900 تا 1100MPa، و برای میله‌های با الیاف آرامید 1350 تا 1650 MPa گزارش شده است [13].

باین وجود، برای بعضی از این محصولات، حتی مقاومت‌های بالاتر از 3000 MPa نیز گزارش شده است. توجه شود که بطور کلی مقاومت فشاری میله‌های کامپوزیتی FRP از مقاومت کششی آنها کمتر است.

### مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته محصولات FRP اکثراً در محدوده قابل قبولی قرار دارد؛ اگر چه اصولاً کمتر از مدول الاستیسیته فولاد است. مدول الاستیسیته میله‌های کامپوزیتی FRP ساخته شده از الیاف کربن، شیشه و آرامید به ترتیب در محدوده 100 تا 150 GPa، 45 GPa و 60 GPa گزارش شده است [13].

### وزن مخصوص

وزن مخصوص محصولات کامپوزیتی FRP به مراتب کمتر از وزن مخصوص فولاد است؛ به عنوان نمونه وزن مخصوص کامپوزیت‌های CFRP یک سوم وزن مخصوص فولاد است. نسبت بالای مقاومت به وزن در کامپوزیت‌های FRP از مزایای عمده آنها در کاربردهای آنها به عنوان مسلح کننده بتن محسوب می‌شود [12].

### چسبندگی با بتن

خصوصیت چسبندگی، برای هر ماده‌ای که به عنوان مسلح کننده بتن بکار رود، بسیار مهم تلقی می‌شود. در مورد میله‌های کامپوزیتی FRP، اگر چه در بررسی بسیار اولیه، مقاومت چسبندگی ضعیفی برای کامپوزیت‌های از الیاف شیشه گزارش شده بود، تحقیقات اخیر در دنیا مقاومت چسبندگی خوب و قابل قبولی را برای میله‌های کامپوزیتی FRP گزارش می‌کند.

### دوام کامپوزیت‌های FRP

کامپوزیت‌های FRP شاخه جدیدی از مصالح محسوب می‌شوند که دوام آنها دلیل اصلی و اولیه برای کاربرد آنها در محدوده وسیعی از عناصر سازه‌ای شده است. به همین جهت است که از آنها نه تنها در صنعت ساختمان، بلکه در فضاپیما، بال هواپیما، درهای اتومبیل، مخازن محتوی گاز مایع، نردبان و حتی راکت تنیس نیز استفاده می‌شود. بنابراین از نقطه نظر مهندسی نه تنها مسأله مقاومت و سختی، بلکه مسأله دوام آنها تحت شرایط مورد انتظار، کاملاً مهم جلوه می‌کند.

مکانیزم‌هایی که دوام کامپوزیت‌ها را کنترل می‌کنند عبارتند از :

- 1) تغییرات شیمیایی یا فیزیکی ماتریس پلیمر
- 2) از دست رفتن چسبندگی بین فایبر و ماتریس
- 3) کاهش در مقاومت و سختی فایبر

محیط نقش کاملاً تعیین کننده‌ای در تغییر خواص پلیمرهای ماتریس کامپوزیت دارد. هر دوی ماتریس و فایبر ممکن است با رطوبت، درجه حرارت، نور خورشید و مشخصاً تشعشعات ماوراء بنفش (UV)، ازن و نیز حضور بعضی از مواد شیمیایی تجزیه کننده نظیر نمک‌ها و قلیایی‌ها تحت تأثیر قرار گیرند. همچنین تغییرات تکراری دما ممکن است به صورت سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن، تغییراتی را در ماتریس و فایبر باعث گردد. از طرفی تحت شرایط بارگذاری مکانیکی، بارهای تکراری ممکن است باعث خستگی (Fatigue) شوند. همچنین بارهای وارده در طول زمان مشخص به صورت ثابت، ممکن است مسأله خزش (Creep) را به دنبال داشته باشند. مجموعه‌ای از تمام مسائل مطرح شده در بالا، دوام کامپوزیت‌های FRP را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

### تأثیر رطوبت

بسیاری از کامپوزیت‌های با ماتریس پلیمری در مجاورت هوای مرطوب و یا محیط‌های مرطوب، با جذب سطحی سریع رطوبت و پخش آن، رطوبت را به خود می‌گیرند. معمولاً درصد رطوبت ابتدا با گذشت زمان افزایش یافته و نهایتاً پس از چندین روز تماس با محیط مرطوب، به نقطه اشباع (تعادل) می‌رسد. زمانی که طول می‌کشد تا کامپوزیت به نقطه اشباع برسد به ضخامت کامپوزیت و میزان رطوبت محیط بستگی دارد. خشک کردن کامپوزیت می‌تواند این روند را معکوس کند، اما ممکن است منجر به حصول کامل خواص اولیه نگردد. جذب آب به وسیله کامپوزیت از قانون عمومی انتشار فیک (Fick's Law) تبعیت کرده و با جذر زمان متناسب است. از طرفی سرعت دقیق جذب رطوبت به عواملی همچون میزان خلل و فرج، نوع فایبر، نوع رزین، جهت و ساختار فایبر، درجه حرارت، سطح تنش وارده، و حضور ریزترکها بستگی دارد. در ادامه تأثیر رطوبت را به صورت مجزا بر اجزاء کامپوزیت مورد بحث قرار می‌دهیم.

### تأثیر رطوبت بر ماتریس پلیمری

جذب آب توسط رزین ممکن است در مواردی بعضی از خصوصیات رزین را تغییر دهد. چنین تغییراتی عمدتاً در دمای بالای  $120^{\circ}\text{C}$  درجه ممکن است اتفاق بیفتد و در اثر آن سختی کامپوزیت به شدت کاهش یابد؛ اگر چه چنین وضعیتی عمدتاً در مصارف کامپوزیت‌ها در مهندسی عمران و به خصوص در سازه‌های در مجاورت آب، کمتر پیش می‌آید و مورد توجه نیست. از طرفی جذب رطوبت یک تأثیر سودمند نیز بر کامپوزیت دارد؛ جذب رطوبت باعث تورم رزین شده که این مساله به نوبه خود تنش‌های پس‌ماند بین ماتریس و فایبر را که در اثر انقباض ضمن عمل‌آوری کامپوزیت ایجاد شده، کاهش می‌دهد. این مساله باعث آزاد شدن تنش‌های بین ماتریس و فایبر شده و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. از طرفی گزارش شده است که در کامپوزیت‌هایی که به صورت نامناسب ساخته شده‌اند، در اثر وجود حفره‌ها در سطح بین فایبر و ماتریس و یا در لایه‌های کامپوزیت، نفوذ آب در داخل حفره‌ها و یا در سطح مشترک فایبر و ماتریس ممکن است به سیلان رزین منجر شود [14]. این مساله را می‌توان با انتخاب مناسب مواد رزین و یا آماده‌سازی مناسب سطح فایبرها و نیز بهبود تکنیک‌های ساخت، حذف نمود.

### تأثیر رطوبت بر فایبرها

اعتقاد عمومی بر آن است که فایبرهای شیشه چنانچه به صورت طولانی مدت در کنار آب قرار گیرند، آسیب می‌بینند. دلیل این مساله آن است که شیشه از سیلیکا ساخته شده که در آن اکسیدهای فلزات قلیایی منتشر شده‌اند. اکسیدهای فلزات قلیایی هم جاذب آب بوده و هم قابل هیدرولیز هستند. با این وجود، در اکثر موارد مصرف در مهندسی عمران، از E-glass و S-glass استفاده می‌شود که فقط مقادیر کمی از اکسیدهای فلزات قلیایی را داشته و بنابراین در مقابل خطرات ناشی از تماس با آب، مقاوم هستند. در هر حال کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف شیشه باید به خوبی ساخته شده باشند، بصورتیکه از نفوذ آب به مقدار زیاد جلوگیری کنند؛ زیرا حضور آب در سطح الیاف شیشه انرژی سطحی آنها را کاهش می‌دهد که می‌تواند رشد ترک خوردگی را افزایش دهد. از طرفی الیاف آرامید نیز می‌توانند مقادیر قابل توجهی از آب را جذب کنند که منجر به باد کردن و تورم آنها می‌شود.

با این وجود اکثر الیاف با پوششی محافظت می‌شوند، که پیوستگی خوب با ماتریس داشته و نیز حفاظت از جذب آب را به همراه دارد. لازم به ذکر است که تحقیقات متعدد، نشان می‌دهد که رطوبت هیچگونه تأثیرات سوء شناخته‌شده‌ای را بر الیاف کربن به دنبال ندارد [15].

### رفتار عمومی کامپوزیت‌های اشباع شده با آب

کامپوزیت‌های با آب اشباع شده معمولاً کمی افزایش شکل‌پذیری (Ductility) در اثر نرم‌شدگی (Softening) ماتریس از خود نشان می‌دهند. این مساله را می‌توان یک جنبه سودمند از جذب آب در کامپوزیت‌های پلیمری برشمرد. همچنین افت محدود مقاومت و مدول الاستیسیته می‌تواند در کامپوزیت‌های با آب اشباع شده اتفاق بیفتد. چنین تغییراتی معمولاً برگشت‌پذیر بوده و بنابراین به محض خشک شدن کامپوزیت، ممکن است اثر خواص از دست رفته مجدداً جبران شود. شایان توجه است که افزایش فشار هیدرواستاتیک (مثلاً در مواردی که کامپوزیت‌ها در مصارف زیر آب و یا در کف دریا به کار می‌روند)، لزوماً به جذب آب بیشتر توسط کامپوزیت و افت خواص مکانیکی آن منجر نمی‌شوند. بدین ترتیب انتظار می‌رود که اکثر سازه‌های پلیمری زیر آب، دوام بالایی داشته باشند. در حقیقت، تحت فشار هیدرواستاتیک، جذب آب به دلیل بسته شدن ریزترک‌ها و ضایعات بین سطحی، کمی کاهش می‌یابد [16]. لازم به ذکر است که جذب آب بر خواص عایق بودن کامپوزیت‌ها اثر می‌گذارد. حضور آب آزاد در ریزترک‌ها می‌تواند خاصیت عایق بودن کامپوزیت را به شدت کاهش دهد.

### تأثیرات حرارتی - رطوبتی بر کامپوزیت‌ها

درجه حرارت، نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم جذب آب کامپوزیت‌ها و تأثیرات متعاقب برگشت‌ناپذیر آن بازی می‌کند. درجه حرارت، بر توزیع آب، میزان آن و سرعت جذب آن، تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما، مقدار و سرعت جذب آب سریعاً افزایش می‌یابد [17]. تحقیقات نشان داده است که ضایعات ناشی از قرار دادن کامپوزیت، در آب جوش به مدت چند ساعت، معادل جداسدن اجزاء کامپوزیت، و ترک‌خوردگی آن در اثر قرار گرفتن آن در آب با دمای  $50^{\circ}C$  به مدت 200 روز می‌باشد. در دمای معمولی اطاق، نمونه‌های کامپوزیت هیچگونه خرابی و آسیبی را بروز نداده‌اند. چنین مشاهداتی به توسعه تکنیک‌هایی برای آزمایشات تسریع شده پیرشدگی کامپوزیت‌ها منجر شده است.

### استفاده از کامپوزیت‌ها در محیط قلیایی

در کاربرد کامپوزیت‌های با الیاف شیشه در محیط قلیایی، ضروری است که از الیاف شیشه با مقاومت بالای قلیایی استفاده نمود؛ زیرا محلول قلیایی با الیاف شیشه واکنش داده و ژل انبساطی سیلیکا تولید می‌کنند. این نکته به خصوص در کاربرد کامپوزیت‌های با الیاف شیشه به عنوان میلگردهای مسلح کننده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. امروزه علاقه به استفاده از میلگردهای FRP از جنس شیشه در رویه‌های بتنی، به عنوان جانشین میلگردهای فولادی که با نمک‌های یخزدا خورده می‌شوند، و نیز در سازه‌های در مجاورت آب افزایش یافته است. با این وجود در فرآیند هیدراسیون سیمان، محلول آب با قلیائیت بالا ( $pH > 12$ ) شده، ایجاد می‌شود. این محلول قلیایی شدید، می‌تواند بر الیاف شیشه تأثیر گذاشته و دوام میلگردهای FRP ساخته شده با الیاف شیشه را کاهش دهد. الیاف شیشه از جنس E-glass که اکثراً ارزان بوده و به کار گرفته می‌شوند، ممکن است مقاومت کافی در مقابل حمله قلیایی‌ها را نداشته باشند. استفاده از رزین وینیل استر با ایجاد یک مانع مؤثر، تا حدودی حمله قلیایی‌ها را کاهش می‌دهد. مقاومت در

مقابل حملهٔ قلیایی‌ها را می‌توان با طراحی عضو سازه‌ای برای تحمل سطح تنش‌های کمتر، بهبود داد. همچنین می‌توان برای بهبود دوام، از الیاف شیشه با مقاومت بسیار خوب در مقابل قلیا استفاده نمود. شایان ذکر است که FRP های ساخته شده از الیاف کربن و آرامید، مطلقاً در مقابل محیط‌های قلیایی از خود ضعفی نشان نمی‌دهند.

### استفاده از مواد FRP به عنوان مسلح کنندهٔ خارجی در سازه‌ها

به دنبال فرسوده شدن سازه‌های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه‌ها برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانهٔ طراحی، طی دو دههٔ اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه‌ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. از طرفی، بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در مناطق زلزله خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک‌های استفاده از مواد مرکب FRP به‌عنوان مسلح کنندهٔ خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم سازی و احیاء سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، این تکنیک‌ها به دلیل اجرای سریع و هزینه‌های کم جذابیت ویژه‌ای یافته‌اند.

مواد مرکب FRP در ابتدا به‌عنوان مواد مقاوم کنندهٔ خمشی برای پل‌های بتن‌آرمه و همچنین به‌عنوان محصور کننده در ستون‌های بتن آرمه مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ اما به دنبال تلاش‌های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دههٔ 1980 توسعهٔ بسیار زیادی در زمینهٔ استفاده از مواد FRP در مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ بطوری‌که دامنهٔ کاربردهای آن به سازه‌هایی با مصالح بنایی، چوبی و حتی فلزی نیز گسترش یافته است. تعداد موارد کاربرد مواد FRP در مقاوم سازی، تعمیر و یا بهسازی سازه‌ها از چند مورد در 10 سال پیش، به هزاران مورد در حال حاضر رسیده است. اجزاء سازه‌ای مختلفی شامل تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبد‌ها و خرپاها تا کنون توسط مواد FRP مقاوم شده‌اند.

مواد مرکب FRP، دامنهٔ وسیعی از کاربردها را برای مقاوم سازی سازه‌های بتن‌آرمه در مواردی که تکنیک‌های مرسوم مقاوم سازی ممکن است مسئله ساز باشند، به خود اختصاص داده‌اند. برای نمونه، یکی از معمول‌ترین تکنیک‌ها برای بهسازی اجزاء بتن آرمه، استفاده از ورق‌های فولادی است که از بیرون به این اجزاء چسبانده می‌شود. این روش، روشی ساده، مقرون به صرفه و کارا است؛ اما از جهات زیر مسئله ساز است:

1- زوال چسبندگی بین فولاد و بتن که از خوردگی فولاد ناشی می‌شود.

2- مشکلات ساخت صفحات فولادی سنگین در کارگاه ساختمان.

3- نیاز به نصب داربست.

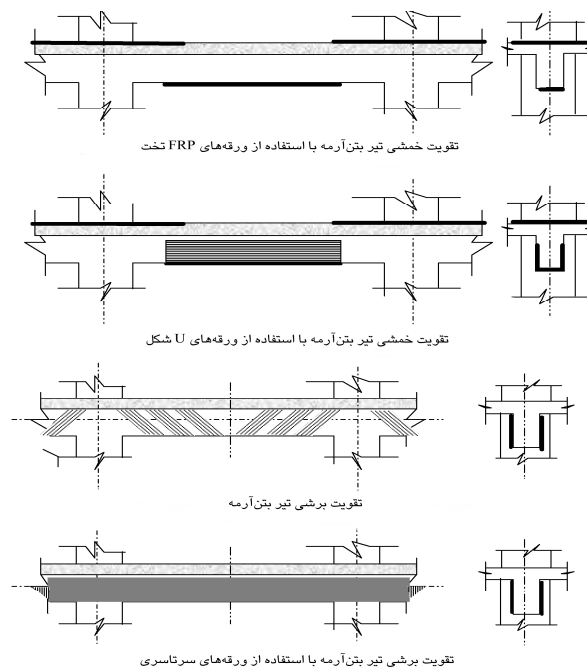
4- محدودیت طول در انتقال صفحات فولادی به کارگاه ساخت (در مورد مقاوم سازی خمشی اجزاء بلند).

نوارها یا صفحات می‌توانند جایگزینی برای صفحات فولادی باشند. مواد FRP برخلاف فولاد، تحت تأثیر زوال الکتروشیمیایی قرار نمی‌گیرند و می‌توانند در مقابل خوردگی اسیدها، بازها و نمک‌ها و مواد مهاجم مشابه در دامنهٔ وسیعی از دما مقاومت کنند. در نتیجه نیاز به سیستم‌های حفاظت از خوردگی نمی‌باشد و آماده کردن سطوح اعضاء قبل از چسباندن صفحات FRP و نگهداری از آن‌ها بعد از نصب، از صفحات فولادی آسان‌تر است.

علاوه بر این، الیاف مسلح‌کننده در FRP می‌توانند در موضع معین و در نسبت حجمی و جهت خاصی درون ماتریس قرارگیرند تا بیش‌ترین کارایی به‌دست آید. مواد حاصله تنها با درصدی از وزن فولاد، مقاومت و سختی بالایی در جهت الیاف دارند. آن‌ها همچنین حمل و نقل آسان‌تری داشته، نیازمند داربست کمتری برای نصب می‌باشند، و می‌توانند برای مکان‌هایی که دارای دسترسی محدود هستند، مورد استفاده قرار گیرند؛ و پس از نصب، بار اضافی قابل توجهی را به سازه تحمیل نمی‌کنند.

روش مرسوم دیگر در مقاوم سازی اعضای بتن آرمه، استفاده از پوشش‌هایی از نوع بتن آرمه، بتن پاشیدنی و یا فولاد می‌باشد. این روش تا جایی که مربوط به مقاومت، سختی و شکل پذیری می‌شود، کاملاً مؤثر است؛ اما باعث افزایش ابعاد مقاطع و بار مرده سازه می‌شود. همچنین این شیوه نیازمند عملیات پر دردسر و تخلیه ساکنین است و به صورت بالقوه باعث افزایش نامطلوب سختی اعضای بتن آرمه می‌شود. به‌عنوان یک جایگزین، صفحات FRP می‌توانند به دور اجزاء بتن آرمه پیچیده شوند و افزایش قابل توجه مقاومت و شکل پذیری را به دنبال داشته باشند؛ بدون آن‌که تغییر زیادی در سختی ایجاد نمایند. یک نکته مهم در ارتباط با مقاوم سازی اعضا با استفاده خارجی از FRP آن است که باید درجه مقاوم سازی (نسبت ظرفیت نهایی عضو مقاوم‌شده به ظرفیت نهایی عضو مقاوم نشده) را محدود کنیم تا حداقل سطح ایمنی در حوادثی مانند آتش سوزی که منجر به از دست رفتن کارایی FRP می‌شوند، حفظ گردد. امروزه مواد کامپوزیتی FRP به وفور جهت تقویت خمشی و برشی تیرهای بتن آرمه به کار می‌روند که نمونه‌ای از آن در شکل 1 نشان داده شده است.

شکل (1): نمونه‌هایی از تقویت خمشی و برشی تیر بتن آرمه با ورقه‌های کامپوزیتی



در این شکل ملاحظه می‌شود که با متصل کردن صفحات FRP به وجه پایینی تیر ظرفیت خمشی مثبت و با متصل کردن آن به وجه بالایی تیر ظرفیت خمشی منفی حاصل می‌شود. همچنین می‌توان با اتصال صفحات FRP به دو وجه کناری تیر، ظرفیت برشی مناسبی فراهم نمود.

در شکست تیرهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP مکانیزم‌های مختلف شکست، از جمله گسیختگی صفحات FRP، خرد شدگی بتن، شکست برشی بتن و ترک خوردگی در محل اتصال چسب با بتن، گزارش شده است. همچنین نشان داده شده است که نوع FRP، ضخامت و طول آن باعث ایجاد انواع مختلفی از شکست نرم یا ترد می‌شود. بخصوص خواص مکانیکی ناحیه اتصال FRP و بتن از اهمیت خاصی برخوردار است. در این میان جدا شدن صفحات FRP از بتن مسأله کاملاً حائز اهمیت است و امروزه توجه زیادی را در دنیا به خود جلب می‌نماید. در این ارتباط به



نظر می‌رسد که استفاده از تقویت‌کننده‌های خارجی حتی به میزان کم، می‌تواند ایمنی قابل ملاحظه‌ای در برابر جدا شدن صفحات FRP از بتن، و نیز شکست‌های برشی ترد فراهم آورد. از طرفی مواد کامپوزیتی FRP به وفور جهت تقویت خمشی و فشاری و نیز افزایش شکل پذیری ستون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین ارتباط محصور شدگی بتن مهم‌ترین خصوصیتی است که می‌توان آن را با چسباندن این مواد در اطراف ستون‌ها فراهم نمود. از طرفی استفاده از مواد کامپوزیتی FRP برای افزایش شکل پذیری اتصالات و رفتار مناسب‌تر آن در زلزله نیز بسیار مطلوب خواهد بود.

## نتیجه گیری

خوردگی اعضاء سازه‌ای بتنی که به صورت متداول با میلگردهای فولادی مسلح شده باشند، در محیط‌های خشن و خورنده یک معضل جدی محسوب می‌شود. این مساله برای اعضاء بتنی سازه‌ای در مجاورت آب و به خصوص در محیط‌های دریایی و ساحلی که در معرض عوامل نمکی و قلیایی، آب در تماس با خاک، هوا و آب‌های زیرزمینی قرار دارند، بسیار جدی‌تر خواهد بود. این مساله هر ساله میلیون‌ها دلار خسارت در سراسر دنیا به بار می‌آورد. اگر چه تا کنون روش‌های مختلفی نظیر حفاظت کاتدودیک و یا پوشش قطعات فولادی و میلگردها با اپوکسی جهت فائق آمدن بر این مشکل به کار گرفته شده است، به نظر می‌رسد که جانشینی کامل قطعات فولادی و میلگردهای فولادی با یک ماده مقاوم در مقابل خوردگی، یک راه حل بسیار اساسی و بدیع، در حذف کامل خوردگی اجزاء فولادی به شمار آید. محصولات کامپوزیتی FRP با مقاومت بسیار عالی، در مقابل خوردگی در محیط‌های خشن و خورنده، توجه بسیاری از محققین و مهندسين در سراسر دنیا را به عنوان یک جانشین مناسب قطعات فولادی و میلگردهای فولادی در سازه‌های مجاور آب به خود جلب نموده است. اگر چه مزیت اصلی محصولات FRP مقاومت آنها در مقابل خوردگی است، خواص دیگری از آنها، نظیر مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته قابل قبول، وزن کم، مقاومت خوب در مقابل خستگی و خزش، خاصیت عایق بودن و چسبندگی خوب با بتن و نیز دوام بسیار خوب از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بر جاذبه آنها افزوده است. با این وجود بعضی از اشکالات و معایب این ماده نظیر مشکلات مربوط به خم کردن میله‌های FRP در محل آرماتوربندی، تفاوت خواص حرارتی آنها با بتن و نیز رفتار الاستیک خطی آنها تا لحظه شکست را نباید از نظر دور داشت. در مجموع، توجه بیشتر به کاربرد محصولات کامپوزیتی FRP در سازه‌های بتنی که در محیط‌های خشن و خورنده ساخته می‌شوند، نظیر سازه‌های آبی، ساحلی و دریایی، مشخصاً از آسیب‌های زودرس و ناخواسته و شکست سازه‌های بتنی مسلح در اثر خوردگی میلگردها جلوگیری خواهد نمود.

## مراجع

- [1] Hamada, H., Fukute, T., Yamamoto, K., (1992), "Bending Behavior of Unbounded Prestressed Concrete Beams Prestressed with CFRP Rods," *Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, Sheffield*, pp. 1015-1026.
- [2] Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., (1991), "RC Beams Strengthened with GFRP Plates, I: Experimental Study," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 11, pp. 3417-3433.
- [3] Bedard, C., (1992), "Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Concrete," *Concrete International*, pp. 55-59.
- [4] Sharp, B. N., (1996), "Reinforced and Prestressed Concrete in Maritime Structures," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Building*, Vol. 116, No. 3, pp. 449-469.

- [5] Hamid, A. A., (1995), "Improving Structural Concrete Durability in the Arabian Gulf," Concrete International, July, pp. 32-35.
- [6] Mohammed Gholam, A., Abdulla,s., Al-Hussaini, A., (1996), "Strength and Durability of Concrete Structures in Bahrain," Concrete International, July, pp. 39-45.
- [7] Matta, Z., (1992), "Chlorides and Corrosion in the Arabian Gulf Environment," Concrete International, May, pp. 47-48.
- [8] Matta, Z., (1993), "Deterioration of Concrete Structures in the Arabian Gulf," Concrete International, July, pp. 33-36.
- [9] Matta, Z., (1993), "More Deterioration of Reinforced concrete in the Arabian Gulf," Concrete International, November, pp. 50-51.
- [10] Razaqpur, A. G., Kashef, A. H., (1993), "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Plastics for Buildings," Submitted to: Institute for Research in Construction – National Research Council of Canada, Carleton University, Ottawa.
- [11] Rostasy, F. S., (1993), "FRP Tensile Elements for Prestressed Concrete – State of the Art, Potentials and Limits," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 347-366.
- [12] Erki, M. A., and Rizkalla, S. H., (1993), "Anchorages for FRP Reinforcement," Concrete International, pp. 54-59.
- [13] Yamasaki, Y., Masuda, Y., Tanano, H., and Shimizu, A., (1993), "Fundamental Properties of Continuous Fiber Bars," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 715-730.
- [14] Hahn, H. T., and Kim, R. Y., (1978), "Swelling of Composite Laminates," Advanced Composite Materials-Environmental Effects, ASTM-STP 658, pp. 98-130.
- [15] Mallick, P. K., (1988 ), "Fiber Reinforced Composites, " Marcel Dekker, Inc., New York.
- [16] Burnsell, A. R.,(1989), "Long-Term Degredation of Polimeric Matrix Composites," Concise Encyclopedia of Composite Materials, Pergamon Press, pp. 165-173.
- [17] Dewimille, B., and Burnsell, A. R., (1983), "Accelerated Aging of a Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin in Water," Composites, pp. 14-35.

روشهای مقاوم سازی سازه های بتن آرمه  
و آشنایی با روش تقویت با ورقه **FRP**

نادر عبدلی ، حمیدرضا رونق ، اعضای هیأت علمی دانشکده عمران،  
دانشگاه یزد  
ایمان الیاسیان ، کارشناسی ارشد سازه، دانشکده عمران،  
دانشگاه یزد

[Iman.Elyasian@Gmail.com](mailto:Iman.Elyasian@Gmail.com)

## چکیده

بسیاری از ساختمانها و اعضای باربر سازه ای که قبل از دهه 90 میلادی در ایالت متحده ساخته شده بودند برای مقاومت لرزه ای طراحی نشده بودند تا این که اداره فدرال مدیریت شرایط اضطراری FEMA<sup>14</sup> اقدام به ارزیابی لرزه ای و روشهای بازسازی سازه های موجود<sup>2</sup> و ارائه روشهای مقاوم سازی نمود در این مقاله به بررسی تقویت قطعات سازه ای با ورقه FRP<sup>3</sup> می پردازیم

**کلید واژه ها :** مقاوم سازی - سازه بتن آرمه - FRP  
مقدمه

در سالهای اخیر پیشرفتهای زیادی در زمینه مهندسی زلزله و طراحی سازه ها انجام گرفته است بگونه ای که امروز با اعتماد و اطمینان بیشتری می توان سازه های مقاوم در برابر زلزله را طراحی نمود . بسیاری از سازه های بتنی به دلایل 1- خطا های محاسباتی 2- اشتباه در ساخت و اجرا 3- ضعف آیین نامه های قدیمی 4- تغییر کاربری سازه و بارهای بهره برداری وارد به سازه 5- خوردگی و زنگ زدگی آرماتورها و . . . ضوابط آیین نامه های جدید را ارضا نمی کند ، لذا ارائه روشهای مقاوم سازی ، بهسازی و تعمیر چنین سازه هایی لازم می باشد

### 1- باز سازی<sup>4</sup>

به طور کلی فرایند باز سازی کلی<sup>5</sup> یا محلی<sup>6</sup> سازه ای به 3 بخش اصلی 1- مقاوم سازی<sup>7</sup>  
2- بهسازی<sup>8</sup> 3- تعمیر<sup>9</sup> تقسیم می شود .  
در باز سازی سازه ها به طور عمده تغییر پارامترهای زیر مورد توجه قرار می گیرد که هر کدام از آنها نقش اساسی در بهبود شرایط عملکرد سازه ای خواهد داشت .

---

1-Federal Emergency Management Agency      2-Seismic Evaluation and Rehabilitation  
3- Fiber Reinforcement Polymer      4 - Rehabilitation      5- Global      6-Local  
7-Strengthening      8-Retrofitting      9-Repair

- 1- افزایش مقاومت<sup>15</sup> 2- افزایش سختی<sup>2</sup> 3- کاهش تغییر مکان<sup>3</sup> 4- افزایش شکل پذیری<sup>4</sup> 5- افزایش جذب انرژی<sup>5</sup>
- 2- مقاوم سازی

همانطوری که در چکیده و مقدمه بیان شد بسیاری از ساختمانها به دلایل مختلف نیاز به تقویت دارند مهمترین دلایل لزوم مقاوم سازی سازه ها 1- دلایل مالی Financial 2- دلایل اجتماعی Sociological می باشند .

- 3- عوامل مؤثر در انتخاب تکنیک مقاوم سازی  
عوامل متعددی در انتخاب تکنیک مقاوم سازی تأثیر دارند که در زیر به بخشی از آنها می پردازیم [2]
- 1- ارزش سازه در مقابل اهمیت سازه  
Cost versus importance of structures
- 2- نیروی انسانی موجود  
Available workmanship
- 3- طول مدت اجرا یا زمان عدم استفاده  
Duration of work / disruption of use
- 4- تکمیل و تقویت براساس عملکرد موردنظر کارفرما  
Fulfillment of the performance goals of owner
- 5- توجه به تناسب زیبا شناسی ( معماری ) و نقش سازه ای و تکمیل سازه موجود  
Functionally and aesthetically compatible and complementary to the existing structures
- 6- تداخل برگشت پذیری  
Reversibility of intervention
- 7- کنترل کیفی سطح عملکرد  
Performance level of quality control
- 8- اهمیت تاریخی و سیاسی سازه  
Political and historical significance
- 9- سازگاری روش مقاوم سازی با سیستم سازه ای موجود  
Structural compatibility with the existing structural system
- 10- نامنظمی در سختی ، مقاومت و شکل پذیری  
Irregularity of stiffness strength and ductility
- 11- کنترل آسیب وارده به اجزای غیر سازه ای  
Controlled damage to non-structural components
- 12- ظرفیت مناسب باربری سیستم فونداسیون  
Sufficient capacity of foundation system
- 13- مواد ترمیمی و روش موجود و ممکن مقاوم سازی  
Repair materials and technology available

---

1-Strength enhancement      2-Increase in stiffness      3-Reduce displacement  
4-Ductility enhancement      5-Increase in energy absorption

4- برخی از روشهای مقاوم سازی سازه های بتن آرمه روشهای زیادی برای مقاوم سازی ارائه شده اند که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره می کنیم [2]

1- استفاده از بادبندهای هم محور یا برون محور فولادی  
Concentric or existence steel braces

2- استفاده از کابلهای پس تنیده  
Post-tensioned cables

3- استفاده از دیوار برشی  
Shear walls

4- استفاده از میانقاب با مصالح بنایی  
Masonry infilled

5- استفاده از جدایشگر های پایه  
Base isolator

6- استفاده از پوشش و غلاف فولادی  
Steel jacketing

7- استفاده از ورقهای پوششی یا غلاف FRP  
FRP laminates or FRP wrapping

8- استفاده از لایه پوشش بتنی با ملات مسلح (زره پوش بتنی)

9- استفاده از میراگرهای اصطکاکی ، هیستریزیس و ویسکو الاستیک

Frictional-hysteretic and viscoelastic dampers

10- استفاده از روشهای ترکیبی فوق

بهسازی و تعمیر به شرح زیر تعریف می شوند و در این مقاله کمتر مورد بررسی قرار گرفته اند .

#### 5- بهسازی

فرایند تغییر و اصلاح پارمترهای طراحی با استفاده از مقطع موجود را بهسازی گویند.

#### 6- تعمیر

گاهی اوقات برخی از عناصر سازه ای یا غیر سازه ای بر اثر پدیده هایی چون آتش سوزی ، زلزله ، عبور وسایل سنگین ، خوردگی آرماتورها به مرور زمان ، ضربه و برخورد وسایط نقلیه و نظایر آن دچار تخریب شده و نیاز به تعمیر و مرمت برای بدست آوردن عملکرد اولیه خود دارند .

#### 7- FRP چیست

FRP نوعی ماده کامپوزیت متشکل از 2 بخش فیبریا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین ازجنس پلیمر احاطه شده اند .



شکل 2- اجزای تشکیل دهنده FRP [3]

فیبرهای تشکیل دهنده می توانند در یک راستا یا دو راستای عمود بر هم قرار داشته باشند. به طور کلی FRP ها به دو شکل وجود دارند 1- ورقه های FRP 2- میلگردهای FRP

رفتار ورقه های FRP به صورت ارتوتروپیک یا شبه ایزوتروپیک بوده یعنی مدول الاستیسیته آن در جهت قرارگیری فیبر با جهات عمود بر آن متفاوت می باشد در مورد مدول الاستیسیته در جهت اصلی داریم

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

در مورد جهت عمود بر جهت اصلی و مدول برشی نیز داریم

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad :$$

برای توضیح بیشتر به کتب مکانیک مواد مراجعه شود.

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_m G_f + V_f G_m}$$

به طور کلی FRP را بر اساس فیبر تشکیل دهنده آن به چندین دسته تقسیم می کنند که 3 نوع آن کاربرد بیشتری دارد 1- CFRP با الیاف از جنس کربن 2- GFRP با الیاف از جنس شیشه 3- AFRP با الیاف از جنس آرامید

به طور کلی عملکرد یک کامپوزیت بستگی به 1- به مواد سازنده آن 2- نسبت مواد سازنده آن 3- ظرفیت باربری فیبر یا الیاف تقویتی و نحوه قرار گیری آنها 4- رفتار توأم سازنده با یکدیگر و ... دارد. عملکرد فیبر تقویتی تحت تأثیر 1- جهت قرار گیری الیاف 2- طول فیبر 3- شکل آن 4- ترکیب آن با ماتریس و رزین و چسبندگی بین آن دو 5- جنس الیاف می باشد

نقش اصلی ماتریس عبارت است از

- 1- انتقال برش از فیبر تقویتی به ماده مجاور
- 2- محافظت از فیبر در برابر شرایط محیطی 3- جلوگیری از خسارات مکانیکی وارده
- 4- کنترل کمانش موضعی فیبر تحت فشار
- 8- دلایل استفاده روز افزون از FRP :
- 1- روشهای تولید حجیم و وسیع FRP 2- کاربرد در صنایع مختلف چون خودروسازی ، هوایی ، دفاعی و . . .
- 3- روشهای تولید اصلاح شده که منجر به تولید FRP با خواص مقاومتری بالاتر و کاهش هزینه تولید می گردد
- 4- بهینه کردن ترکیب فیبر با ماتریس چسب برای سازگاری مناسب تر با یکدیگر و بتن
- 9- مزایای استفاده از FRP در سازه های بتن آرمه :
- 1- دوام بالا 2- سبک وزن بودن <sup>16</sup> 3- مقاومت مشخصه ومدول بالای برخی از نمونه های آن
- 4- مقاومت در برابر خوردگی 5- مقاومت در برابر شرایط محیطی و ترکیبات شیمیایی
- 6- نفوذ ناپذیری مغناطیسی 7- مقاومت در برابر ضربه 8- ضخامت کم
- 9- حمل و نقل آسان به دلیل وزن کم 10- اجرای ساده ورقه ها
- 11- توجیه اقتصادی برای تقویت و ترمیم پروژه های سنگین به عنوان مثال پلها
- 12- سطح تمام شده تمیز
- 10- برخی از موارد کاربرد FRP :
- 1- افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ستونها ، تیرها ، دالها و اتصالات بتن آرمه
- 2- تقویت مخازن فولادی و بتنی 3- تقویت سازه های فراساحل و دریایی
- 4- تقویت سازه های مقاوم در برابر انفجار
- 5- تقویت تیر و ستونهای چوبی
- 6- تقویت دودکشهای بتن آرمه با مصالح بنایی
- 7- تقویت دیوارهای بتن آرمه
- 8- تقویت دیوار تونلها
- 9- تقویت لوله های بتنی یا فولادی
- 10- تقویت دیوارهای آجری و مصالح سنتی
- 11- ساخت دیوارهای ساحلی

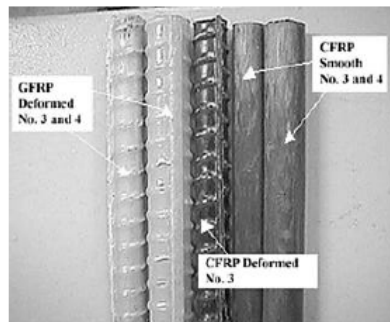
---

1- وزن آن در حدود 20 درصد فولاد می باشد

- 12- سقفهای پشست بامهای صنعتی
- 13- نشیمن گاه تجهیزات راکتورها
- 14- سیستم دال کف در محیط های خورنده شیمیایی
- 15- مرمت و تقویت سازه های مهمی چون بیمارستانها و آثار باستانی و . . . .

### 11- اشکال مختلف FRP در مهندسی عمران

- 1- میلگردهای FRP
  - 2- پوششهای FRP
- در شکل انواع میلگردهای ساخته شده از GFRP نمایش داده شده است .



شکل 3- انواع میلگردهای FRP [13]

### 12- انواع پوششهای FRP بر اساس نحوه تولید

- 1- پوشش دست ساز و درجا در محل Wet-Lay-Up
  - 2- ورقه های پیش ساخته کامپوزیتی
  - 3- ورقه های Pultrusion : در این فرایند ورقه های ساخته شده از محفظه حرارتی عبور داده شده و در این حین تحت کشش قرار می گیرند 2 کارخانه تولید کننده FRP به این روش یسکا و فرنیسه می باشند .
- #### 13- سیستمهای مرکب جدید

گاهی اوقات برای باز سازی یک سازه یا یک عضو از ترکیب چندین روش باز سازی یا ترکیب چند روش مقاوم سازی می پردازیم به عنوان مثال اخیراً پروفسور J.G.Teng مدل ستون FCSDS<sup>15</sup> را مطابق شکل 1 ارائه داده است که متشکل از یک لوله فولاد داخلی و یک غلاف خارجی FRP است که فضای بین آن دو با بتن پر شده است . با دقت به عملکرد چنین ستونی می بینیم که این ستون معایب لوله های فولادی چون کمزش تحت بار فشاری را به دلیل احاطه شدن با غلاف بتنی نداشته از طرفی بتن موجود به وسیله پوشش FRP



کاملاً محصور شده و ظرفیت بار برنهایی و کرنش نهایی آن تحت بار محوری به شدت افزایش می یابد .

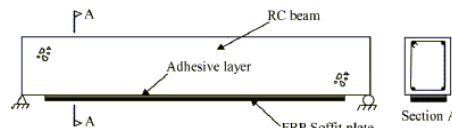


شکل 1- سیستم مرکب FCSDS [3]

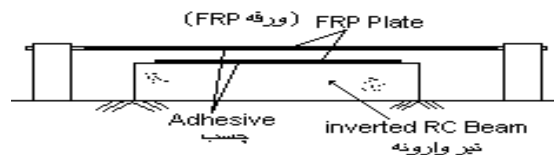
#### 14- مقاوم سازی اعضای باربر سازه ای با ورقه FRP

از ورقه های FRP برای تقویت خمشی ، برشی ، پیچشی و ترکیب آنها در اعضای باربر سازه چون تیرها ، ستونها ، اتصالات ، دیوارها و دالهای بتن آرمه وحتى عناصر غیر باربر استفاده می شود . اخیراً حتی برای تقویت پروفیل های فولادی ساختمانی از ورقه FRP استفاده شده و برای استفاده بهینه حتی ورقه ها را در حالت پس تنیده و یا پیش تنیده در سیستم تقویت بکار می برند . در اشکال زیر تقویت انواع مختلف اعضای باربر سازه ای با ورقه های FRP مشاهده می شود .

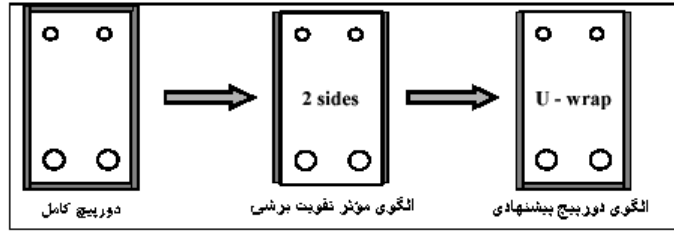
#### الف - تقویت خمشی و برشی تیرها



شکل 4- تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP



شکل 5- تقویت خمشی با ورقه FRP پیش تنیده [3]



شکل 6- الگوهای مختلف تقویت برشی [ 15 ]  
 برای کنترل گسیختگی های موضعی چون عدم پیوند و چسبندگی در انتهای تیر در حالت تقویت خمشی از باریکه ها (نوارها) یا ورقه پیوسته U شکل برای گیرداری مهار انتهایی تیر مطابق شکل 7 استفاده می شود

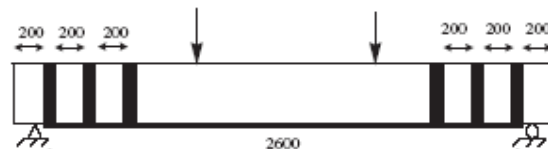


FIGURE 4. Lateral perpendicular CFRP strips, beam D.

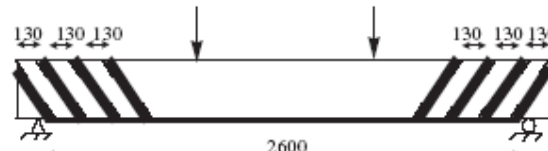


FIGURE 5. Lateral inclined CFRP strips, beam E.

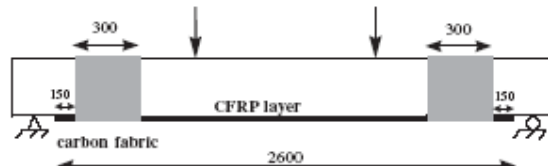
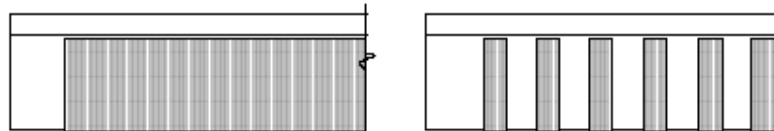


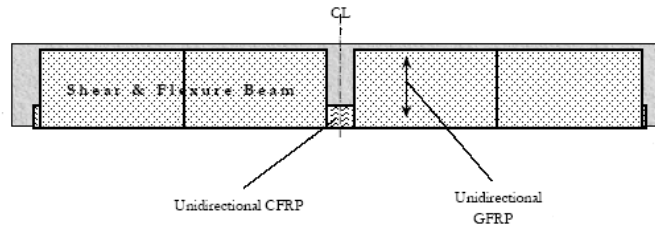
FIGURE 6. U-wrapping using a carbon fabric, beam F.

شکل 7- تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP و نوار انتهایی U شکل [ 9 ]



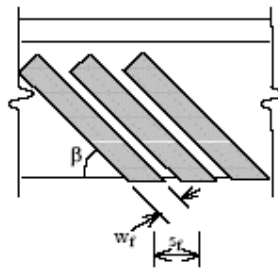
شکل 8- الگوی تقویتی یکپارچه و منقطع در حالت تقویت برشی می توان از الگوی یکپارچه ورقه یا Laminate و نوارهای منقطع یا Strips مطابق شکل 8 استفاده کرد. گاهی اوقات یک عضو بار بر سازه ای با ترکیب چند روش تقویت می کنیم . حتی با توجه به شکل 9 می بینید جنس ورقه ای که برای تقویت خمشی (CFRP laminate)

بکار می رود با جنس ورقه ای که برای تقویت برشی (GFRP laminate) بکار می روند متفاوت هستند.



شکل 9- ترکیب تقویت برشی و خمشی تیر بتن آرمه با FRP [14]

باریکه ها و نوارهای FRP یا حتی ورقه های آن می تواند در زوایای مختلف بخصوص 45 درجه برای کنترل ترکهای برشی و در تعداد لایه های مختلف و حتی دو لایه عمود بر هم با زوایای مختلف به عنوان مثال 0-90 درجه یا  $\pm 45$  درجه بکار برده شوند.

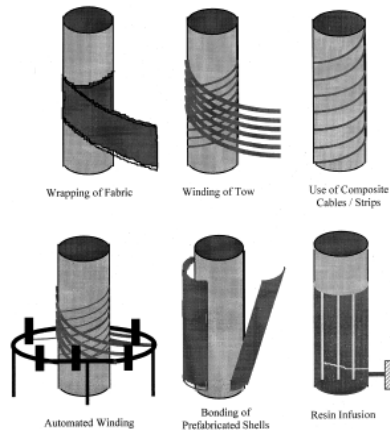


شکل 10- بکار بردن نوارهای مورب برای تقویت برشی تیر بتن آرمه

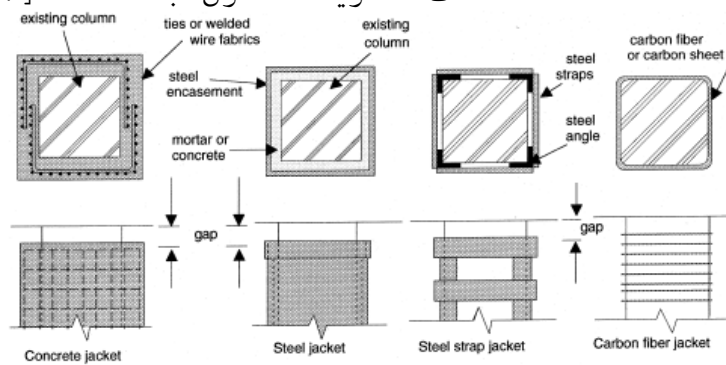
#### ب- تقویت ستونها

روشهای تقویت ستونها با ورقه FRP مطابق شکل 11 عبارتند از :

- 1- دور پیچ سراسری
- 2- پیچاندن و لفاف کردن به صورت دورانی
- 3- استفاده از نوارها / کابل های کامپوزیت
- 4- دورپیچ به صورت خودکار و اتوماتیک
- 5- چسباندن پوسته های پیش ساخته
- 6- تزریق چسب یا ماتریس



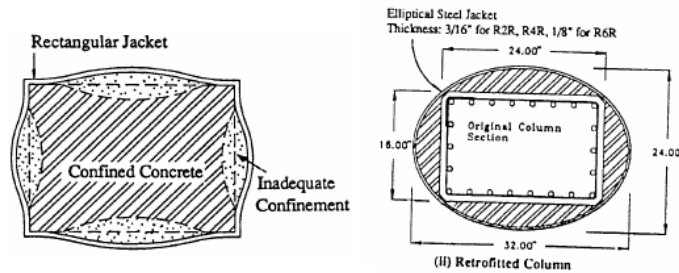
شکل 11- حالت مختلف تقویت ستون با FRP [7]



شکل 12- حالات مختلف تقویت ستون بتن آرمه مربعی شکل  
1- استفاده از ژاکت فولادی 2- استفاده از نوارها یا بستهای فولادی

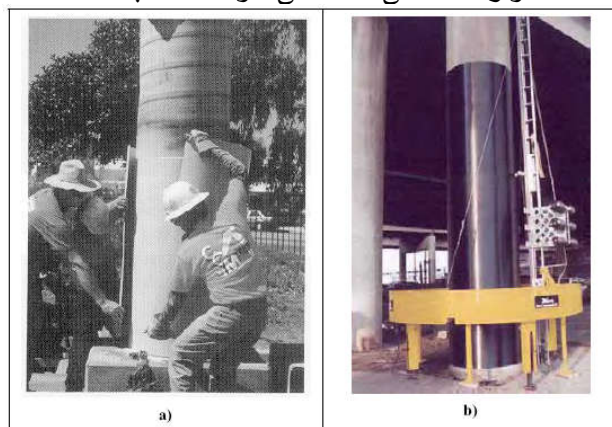
3- استفاده از غلاف یا دورپیچ FRP [8]

بایستی توجه داشت در مورد ستونهای مربع مستطیل شکل پوشش ورقه FRP محصوریت کمتری ایجاد می کند لذا معمولاً این ستونها را با گروت یا بتن پرکننده مطابق شکل 13 به صورت ستون بیضوی یا دایروی در آورده سپس با FRP دور پیچ می نمایند



شکل 13- عدم محصور شدگی مناسب برای ستون مربع مستطیل و

تبدیل آن به ستون بیضوی یا دایروی برای ایجاد  
محصور شدگی کافی و مناسب [11]

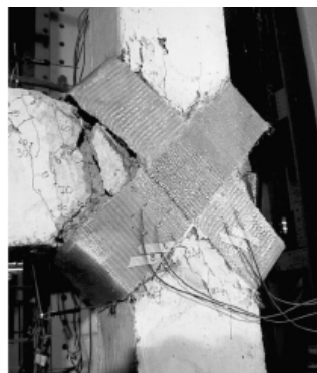
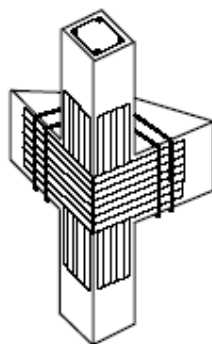


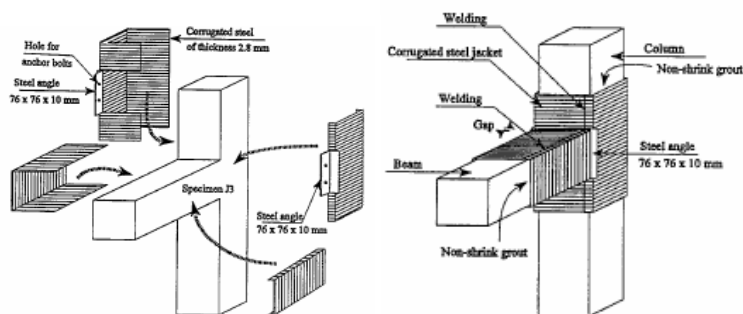
شکل 14- سیستم دورپیچی ستون با FRP به صورت دست ساز  
یا در محل و اتوماتیک یا خودکار



شکل 15- تقویت ستون یا پایه یک پل با ورقه FRP [12]  
ج- تقویت اتصال و سیستم دال یا عرشه پل

اتصالات بتن آرمه که از حساسیت زیادی برخوردار  
هستند و در مجموع تقویت آنها به دلایل اجرایی ساده  
نمی باشند ، را می توان به کمک ورقهای FRP تقویت  
نمود . اشکال زیر روشهای متداول تقویت اتصال و  
تابلیه پل را نشان می دهد .





شکل 16- اشکال مختلف تقویت اتصال با ورقه FRP [6]  
و 10 و 11]



شکل 17- تقویت عرشه پل با ورقه FRP [12]

#### نتیجه و ارائه پیشنهاد

1- استفاده از ورقه ها و میلگردهای FRP برای تقویت و بازسازی سازه های بتن آرمه با توجه به مزایای بی شمار و شناخته شده آن روز به روز در حال افزایش است لذا انجام تحقیقات بیشتر در مورد تقویت جزیی یا کلی با FRP به صورت تئوری و آزمایشگاهی ضروری می باشد

2- لزوم مقاوم سازی و طراحی لرزه ای سازه ها و آشنایی با نحوه عملکرد سازه ها در مقابل زلزله با توجه به این که کشور در محدوده گسله های با لرزه خیزی زیاد قرار دارد دارای اولویت می باشد که در این میان بررسی روشهای مختلف مقاوم سازی و مقایسه آنها با یکدیگر برای انتخاب روش مقاوم سازی مناسب و کارآمد با توجه به شرایط اقتصادی ، اجتماعی و پتانسیل یک منطقه ضروری است .

#### منابع :

- 1- ایمان الیاسیان - پایان نامه کارشناسی ارشد "بررسی مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه با ورقه های کامپوزیتی FRP با در نظر گرفتن پدیده جدایش ورقه های تقویتی" دانشگاه یزد بهار 1384

- 2–Jong Wha Bai " Seismic Retrofit for Reinforced Concrete Building Structures"  
Consequence-Based Engineering (CEB)-Institute Final Report –Texas University-August  
2003
- 3– J.G.Teng – J.F. Chen – S.T.Smith – L. Lam- " FRP Strengthened RC Structures "  
.Published by Wiley – 2002
- 4- "**ACI 440.2R-2002 Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems  
for Strengthening Concrete Structures "** – Reported by ACI committee 440
- 5- "ACI 440R-96 State-of-the-Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for  
Concrete Structures" - Reported by ACI committee 4
- 6-Ahmad Ghobarah, A. Said-"Shear strengthening of beam-column joints" department of civil  
engineering McMaster University, Hamilton-Ontario-Engineering structures  
24(2002) 881-888
- 7-Vistap M. Karbhari-Lei Zhao-"Use of composites for 21st century civil infrastructure  
University of California, San Diego, La Jolla Ca Computer methods in applied mechanics and  
engineering 185(2000) 433-454
- 8- Hiroshi Fukuyama, Shunsuke Sugano "Seismic rehabilitation of RC building"  
International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tatehara Ibaraki Japan  
Cement and Concrete Composites 22(2000) 59-79
- 9-Francois Buyle Bodin, Emmanuelle David "Use of Carbon Textile to control premature  
failure of Reinforced Concrete Beams Strengthened with bonded CFRP Plates" University  
of Lille, France –Owens Corning Journal of textiles, Vol.33 No.3  
January 2004
- 10- C.P.Antonopoulos, T.C.Triantafyllou "Analytical and experimental study of FRP  
strengthened RC Beam-Column Joints "University of Patras Greece ,Journal of Composites  
for Construction 2002
- 11-Simoon Foo, Nove Naumoski , Murat Saatsioglu " Seismic Hazard, Building Codes  
and Mitigation option for Canadian Buildings" office of Critical Infrastructure Protection  
and Emergency Preparedness University Ottawa Canada June 2001
- 12-Ardhana Ojha "The Execution of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthening  
work" master's Thesis Lulea university of Technology, Sweden -2001
- 13-Laura De Lorenzis, Antonio Nanni "Shear strengthening of Reinforced concrete beams  
with near-surface mounted Fiber Reinforced Polymer Rods" ACI Structural Journal  
Technical Paper January-February 2001
- 14- Damian Kuchlakev ; Thomas Miller ;Solomon Yim ;Kasidit Chansawat ;Tanarat Potisuk , "  
Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates  
Research Group May 2001 "-Final Report SPR316 – Oregon Department of Transportation
- 15- Ghassan K.Al. Chaar and Georgy E.Lamb "Design of Fiber-Reinforced Polymer Materials  
for Seismic Rehabilitation of Infilled Concrete Structures "- December 2002 - US Army Corps  
of Engineering-Research and Development Center

## آنالیز غیرخطی تیرهای بتن مسلح با مقاومت بالا مقاوم سازی شده با FRP

مهدیس آباده زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه علم و

فرهنگ - تهران

حامد صالح فرد

کارشناس ارشد مهندسی عمران

سید حمید هاشمی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و مهندسی اراک

### چکیده

به دنبال فرسوده شدن سازه ها و نیاز به تقویت آنها برای برآورده کردن شرایط سخت گیرانه طراحی، طی دو دهه اخیر تاکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه ها در سراسر جهان صورت گرفته است. از طرفی، بهسازی لرزه ای سازه ها بخصوص در مناطق زلزله خیز اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک استفاده از مواد مرکب (FRP) به عنوان مسلح کننده خارجی به دلیل اجرای سریع در مقاوم سازی و احیای سازه ها جذابیت ویژه ای یافته اند. در این مقاله به بررسی نتایج تحلیلی المان محدود 6 عدد تیر بتن مسلح با مقاومت بالا با درصد آرماتورهای متفاوت، ابعاد ثابت و میزان FRP متفاوت به صورت سه بعدی و غیر خطی پرداخته شده است. در طول گام های بارگذاری، رفتار بار- تغییرمکان نمونه ها اندازه گیری و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

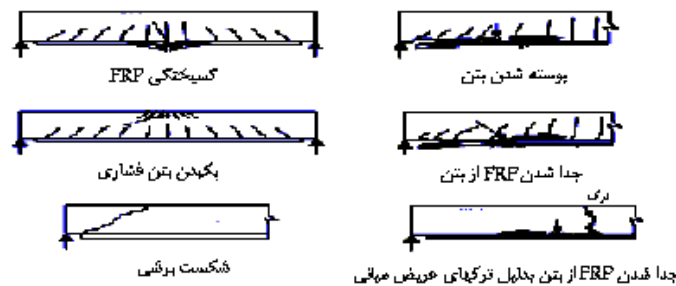
واژگان کلیدی: الیاف CFRP، تیر بتن مسلح با مقاومت بالا (HSC)، المان محدود، رفتار خمشی

### مقدمه

طبق تعریف، سیستم FRP (Fiber Reinforced Polymer)، شامل الیاف، رزین های تشکیل دهنده، ورق های کامپوزیت می باشد. رزین های به کار برده شده جهت اتصال ورق ها به بتن زیرین و روکش های حفاظتی می باشد [1]. تکنولوژی استفاده از ورق های FRP، اولین بار در سال 1984 در سوئیس مورد استفاده قرار گرفت که در آن ورق های کامپوزیتی جهت مقاوم سازی تیرهای بتنی آزمایش شد [2]. دلایل استفاده از FRP شامل نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی الکترو شیمیایی، جذب ارتعاشات، شکل پذیری بالا کرنش خزشی بزرگتر، مقاومت در برابر خستگی، کاهش هزینه نصب و تعمیر نسبت به فولاد و همچنین خواص غیر فلزی و غیر مغناطیسی FRP، باعث استفاده از آن به جای صفحات فلزی شده است. بدین ترتیب استفاده از CFRP به دلیل خواص فوق برای تعمیرات و بهسازی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [3]. اعضای سازه ای که با اتصال FRP تقویت شده اند شامل تیرها، دالها، ستونها، دیوارها، اتصالات، کوره ها، دودکشها، گنبدها، تونل ها، سیلوها، لوله ها، مخازن، خرپا ها و



غیره می باشند. با توجه به اصول مکانیک شکست، هر گونه ترک خوردگی را می توان به صورت ترکیبی از سه مود پایه ای شکست در نظر گرفت. مود اول: باز شدگی ناشی از کشش (Opening Mode)، مود دوم: لغزش ناشی از برش در صفحه (Mode Shearing) و مود سوم ناشی از پارگی (Tearing Mode) می باشد که در فولاد مود اول موثر است و در یک عنصر کامپوزیت مود دوم و سوم به ویژه در تورق لایه ها موثرند [4]. بر پایه مطالعات انجام گرفته توسط محققان مختلف، انواع شکست نمونه های تقویت شده با FRP عبارتند از: جاری شدن فولاد کششی و به دنبال آن گسیختگی FRP، جاری شدن فولاد کششی و به دنبال آن پکیدن بتن فشاری، پکیدن بتن فشاری و به دنبال آن جاری شدن فولاد کششی، شکست برشی، پوسته شدن پوشش بتن، جدا شدن FRP از لایه زیرین بتن، که در شکل 1 انواع آن نشان داده شده است [5]. در تحقیقاتی که در سال 2001 در دانشگاه سنگاپور توسط Maalej و همکارانش انجام شد نشان می دهد که مقاوم سازی توسط الیاف کربن باعث افزایش 22 تا 46 درصد ظرفیت خمشی در تیرها و کاهش 12 تا 57 درصدی در میزان خیز آنها شده است که این افزایش سختی برای تیرهایی که با تعداد لایه های زیاد مقاوم سازی شده اند زیادتر است [6].



شکل (1): حالات های مختلف شکست تیر بتن آرمه تقویت شده با FRP.

تحقیقات دیگری که توسط Philip و همکارانش انجام شد نشان می دهد که افزایش سختی در حدود 17 تا 99 درصد و افزایش مقاومت در حدود 60 تا 97 درصد بوده است [7]. البته به روش پیش تنیدگی می توان مقاومت تیرهای بتن مسلح را در حدود 15 درصد و سختی آنها را در حدود 7 درصد نسبت به تیرهایی که به طور معمول با الیاف FRP مسلح شده اند افزایش داد [8]. با توجه به مطالعات بررسی شده و اهمیت روزافزون موضوع به خوبی واضح است که نیاز به بررسی بیشتر بر روی اثر استفاده از این فیبرها در امر تقویت سازه احساس می گردد. خصوصاً آنکه مطالعات انجام گرفته محدود و غالباً آزمایشگاهی بوده است و یا تنها مدل خطی و یا حداکثر غیرخطی 2 بعدی بوده که به طبع از دقت کمتری برخوردار است. در این مقاله سعی شده است با ارائه مدل کاملاً غیر خطی 3 بعدی تیرها و با بررسی معیارهای شکست مناسب هر یک از اجزای تشکیل دهنده تیرها نقیصه موجود مرتفع گردد. ورقه های FRP، به سبب داشتن رفتار خطی تا لحظه شکست باعث ترد شکنی در تیر خواهد شد. در این تحقیق اثر ورقه های FRP در مقاوم سازی خمشی تیرهای بتن مسلح حاوی بتن با مقاومت بالا مورد بررسی قرار گرفته است. میزان آرماتورهای کششی و تعداد لایه های FRP در ساخت نمونه ها و تقویت آنها به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. تعداد شش عدد تیر بتنی دارای سطح مقطع، طول و میزان میلگرد فشاری و برشی یکسان حاوی بتن با مقاومت بالا دارای آرماتور کششی  $0.2\rho_b$  و  $0.4\rho_b$  مد نظر قرار گرفته است و تحت آزمایش خمش چهار نقطه ای قرار گرفته است

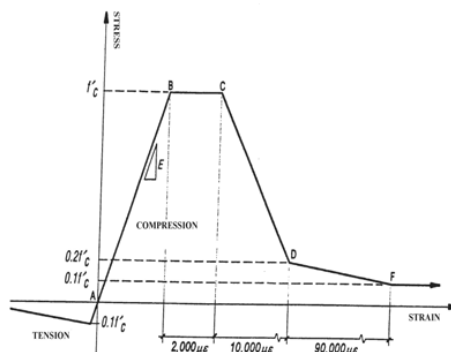
#### مدل سازی تیرها

جهت بررسی تیرها، دو گروه تیر که هر گروه شامل 2 نمونه تقویت شده و یک نمونه کنترل می باشد مدل سازی گردیدند. به سبب رفتار پیچیده بتن در فشار و کشش و حالت ارتوتروپیک فیبرهای کربن به علت برخورداری از دو فاز مختلف ماتریس و الیاف از نرم افزار ANSYS جهت مدل سازی کمک گرفته شد. بهره گیری از مدل های 3 بعدی و المان زیاد با ابعاد کم جهت بالا بردن دقت سبب افزایش گامهای اجرا و در نتیجه طولانی شدن زمان اجرا برنامه می شود [12].

در نرم افزار ANSYS جهت مدل سازی بتن از المان 8 گره ای Solid 65 که در هر گره دارای 3 درجه آزادی تغییر مکانی است، استفاده گردیده است. این المان قادر به مدل سازی خزش، تغییر شکل پلاستیک، ترک خوردگی در ناحیه کششی و خرد شدگی بتن در ناحیه کششی می باشد [9].

از المان Link8 برای مدل سازی فولادهای کششی، فشاری و خاموت ها استفاده شده است. المان مذکور المان 2 گره ای خریابی است که دارای 3 درجه آزادی انتقالی در هر گره می باشد [9].

جهت مدل سازی فیبرهای کامپوزیتی از المان لایه ای Solid 46 استفاده گردیده که المان فوق توانایی مدل سازی تا 250 لایه کامپوزیتی با ضخامت و زوایای مختلف را دارا می باشد. به جهت جلوگیری از تمرکز تنش بر روی تکیه گاه ها از ورق فولادی استفاده گردیده که ورق های فوق نیز با کمک المان Solid 45 و با بهره گیری از ضخامت ثابت 2 سانتی متر در هر 4 گوشه المان مدل سازی گردیدند. بتن از مصالح ترد شکن با رفتار متفاوت در فشار و کشش بوده که تا حدود 25 درصد از مقاومت نهایی، رفتاری الاستیک از خود نشان می دهد. پس از دست یابی به مقاومت نهایی همانطور که در شکل 2 ملاحظه می شود وارد مرحله سخت شدگی شده تا سرانجام با رسیدن به کرنش نهایی بتن خرد می شود.



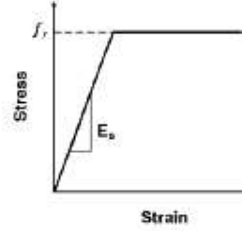
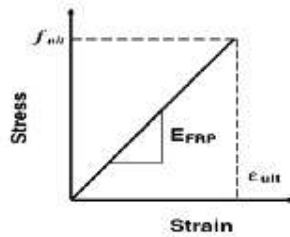
شکل (2): منحنی تنش - کرنش بتن [10]

جهت تعریف بتن از حالت Concrete با رفتار غیر خطی استفاده شده است که مشخصات مصالح (ضریب پواسون و مقاومت فشاری) مطابق با جدول 1 آورده شده است.

فولاد به صورت مصالح الاستو پلاستیک کامل در کشش و فشار فرض شده است یعنی فرض می کنیم که مدول الاستیسیته سخت شدگی آن صفر است. جهت مدل سازی فولاد از حالت Bilinear-Isotropic یا دو خطی استفاده شده است که مشخصات آن شامل تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در جدول 1 آورده شده است.

ورق FRP از جنس کامپوزیت می باشد و از دو فاز ماتریس و الیاف تشکیل شده است و دارای رفتار خطی تا لحظه شکست می باشد.

منحنی تنش - کرنش فولاد و FRP در شکل های 3 و 4 آورده شده است.



شکل (4): منحنی تنش- کرنش FRP [11]

شکل (3): منحنی تنش- کرنش فولاد [11]

مشخصات مصالح شامل تعداد و ضخامت لایه ها، مدول الاستیسیته، مقاومت و کرنش نهایی مطابق جدول 1 اعمال گردیده است.

جدول (1): مشخصات مصالح بتنی، فولادی و لایه های فیبر کربن

FRP			فولاد				بتن		گروه ها	
کرنش نهایی (%)	مقاومت نهایی (kg/cm <sup>2</sup> )	مدول الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )	ضخامت (cm)	تعداد لایه ها	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )	تنش تسلیم (kg/cm <sup>2</sup> )	مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> )		ضریب پواسون
1.7	38500	2.3E+06	0	0	0.3	2.1E+06	4200	770	0.2	AH0
1.7	38500	2.3E+06	0.0045	1	0.3	2.1E+06	4200	770	0.2	AH1
1.7	38500	2.3E+06	0.018	4	0.3	2.1E+06	4200	770	0.2	AH4
1.7	38500	2.3E+06	0	0	0.3	2.1E+06	4200	770	0.2	BH0
1.7	38500	2.3E+06	0.0045	1	0.3	2.1E+06	4200	770	0.2	BH1
1.7	38500	2.3E+06	0.018	4	0.3	2.1E+06	4200	770	0.2	BH4

مقدار مدول الاستیسیته بتن با مقاومت بالا را می توان طبق روابط 1 تا 4 پیشنهادی ACI بدست آورد:

(1)

$$E = 4730\sqrt{f'_c}$$

(2)

$$E = 3320\sqrt{f'_c} + 6900$$

(3)

$$E = 9500(f'_c)^{0.3}$$

(4)

$$E = 8800(f'_c)^{0.325}$$

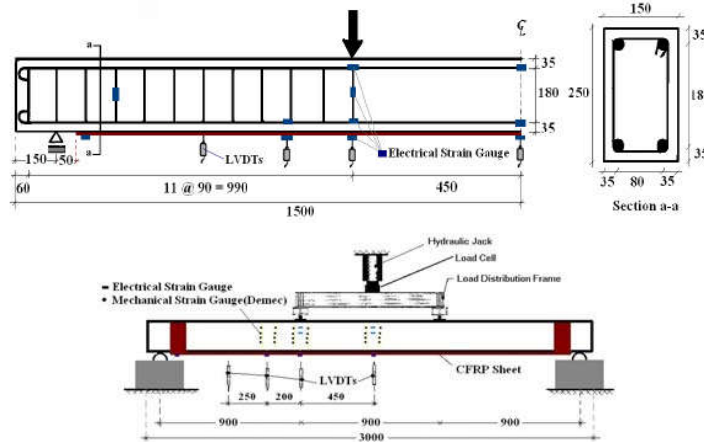
که در آن  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن بر حسب مگا پاسکال می باشد. ابعاد تیرها و آرایش لایه های فیبر کربن در جدول 2 آورده شده است.

جدول (2): ابعاد تیرها و آرایش لایه های فیبر کربن

FRP			فولاد			بتن			گروه ها
ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	خاموت	فشاری (cm <sup>2</sup> )	کششی (cm <sup>2</sup> )	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	
-	-	-	$\phi 10@9cm$	1.58	4.02	25	15	300	AH0
0.0045	15	260	$\phi 10@9cm$	1.58	4.02	25	15	300	AH1
0.018	15	260	$\phi 10@9cm$	1.58	4.02	25	15	300	AH4
-	-	-	$\phi 10@9cm$	1.58	7.6	25	15	300	BH0

0.004 5	15	260	$\phi 10@9cm$ $\phi 10@9cm$	1.58	7.6	25	15	300	BH1
0.018	15	260		1.58	7.6	25	15	300	BH4

تیرها به صورت تکیه گاه ساده مدل شده اند، جهت جلوگیری از تمرکز تنش در زیر بار و تکیه گاهها از صفحات فلزی استفاده شده است و وجود تنها یک ردیف تکیه گاه سبب می شود که ورقهای فلزی امکان چرخش داشته و بدین ترتیب بتن بالای تکیه گاه فاقد ترک زائد و اضافی گردد [12]. سیستم بارگذاری سیستم دو نقطه ای با کنترل بار بوده و در شکل 5 شمای کلی تیر و نقاط تکیه گاهی و بارگذاری نشان داده شده است.



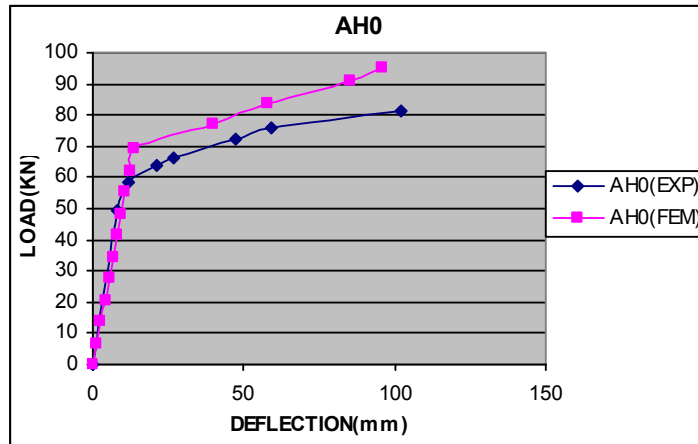
شکل (5): شمای کلی تیر بتنی و نقاط بارگذاری و تکیه گاهی [3]

### تحلیل غیر خطی

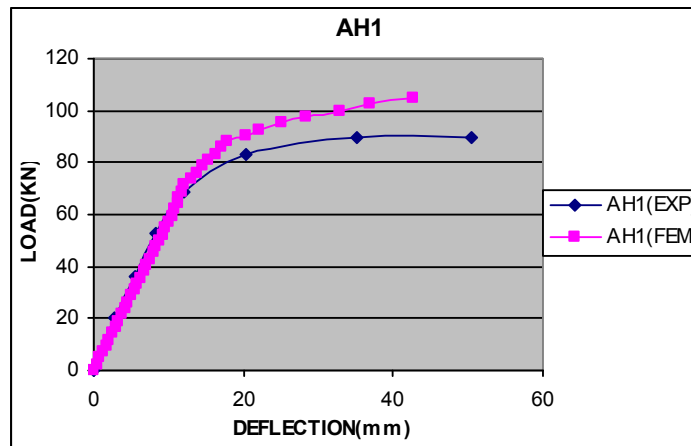
در روش تحلیل غیر خطی غالباً آنالیز با تقسیم بارهای اعمالی به قسمت هایی که هر قسمت یک گام بارگذاری نامیده می شود و اعمال گام های فوق به سازه انجام می گردد. در این مقاله از روش Newton-Raphson جهت آنالیز غیر خطی استفاده شده است. در این روش در پایان هر قسمت از بارگذاری ماتریس سختی سازه تشکیل یافته و تنش ها و کرنش ها محاسبه گردیده و با تنش های جدید، بارگذاری جدید مشخص می گردد. در این مرحله در صورت تامین شرایط همگرایی بین بارگذاری اعمالی و بارگذاری محاسباتی نرم افزار گام بعدی را اجرا و در غیر اینصورت با بارگذاری جدید، ماتریس سختی و سایر مراحل بازسازی شده و مراحل بالا تکرار می گردد [12].

### نتایج مدل سازی المان محدود

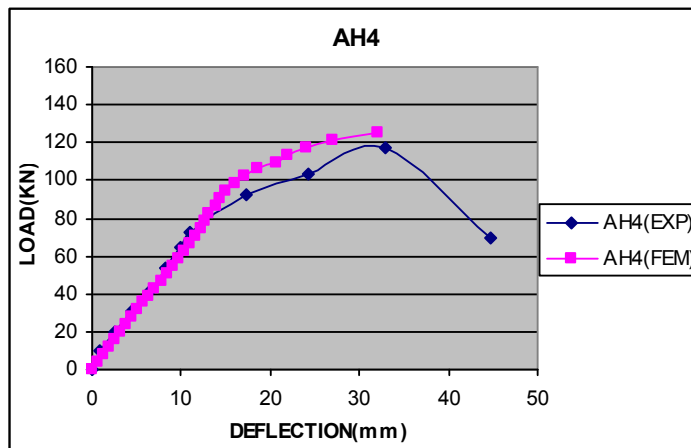
در این بخش، نتایج عددی برای تمامی نمونه ها آورده شده است و نمودارهای حاصله با مقادیر بار-خیز آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود، نتایج قابل توجیه می باشد. اشکال 6 تا 11 نمودارهای بار-خیز وسط دهانه را برای هر کدام از 6 نمونه نشان می دهد.



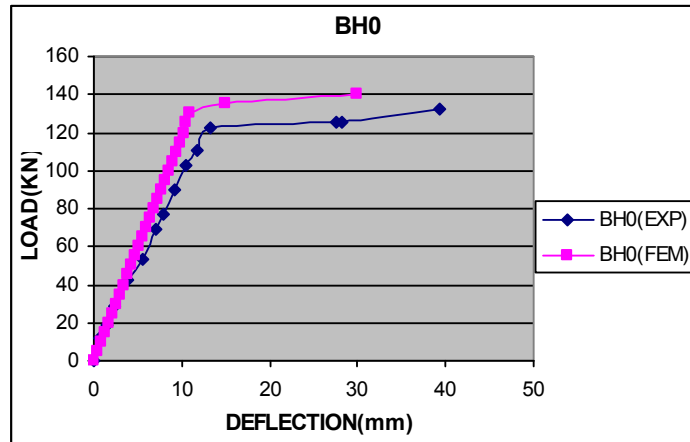
شکل (6): نمودار بار - تغییر مکان بر مبنای نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای تیر AH0



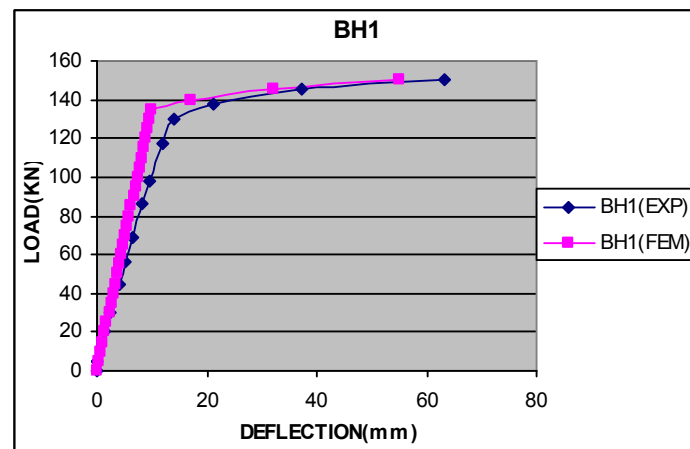
شکل (7): نمودار بار - تغییر مکان بر مبنای نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای تیر AH1



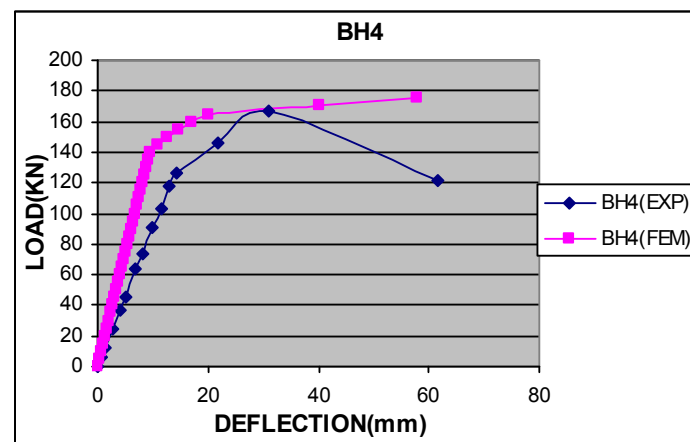
شکل (8): نمودار بار - تغییر مکان بر مبنای نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای تیر AH4



شکل(9): نمودار بار - تغییر مکان بر مبنای نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای تیر BH0



شکل(10): نمودار بار - تغییر مکان بر مبنای نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای تیر BH1



شکل(11): نمودار بار - تغییر مکان بر مبنای نتایج المان محدود و آزمایشگاهی برای تیر BH4

نتایج پیش بینی شده در وضعیت نهایی با بار و خیز نهایی بدست آمده در آزمایشگاه مطابق جدول 3 در زیرمقایسه شده است که نتیجتاً متوسط بار نهایی و خیز وسط دهانه بر اساس داده های آزمایشگاهی نسبت به داده های حاصل از المان محدود به ترتیب 0/4 درصد کمتر و 19/1 درصد بیشتر است.

جدول (3): نتایج بار- خیز آزمایشگاهی و المان محدود در حالت نهایی برای وسط دهانه

بار نهایی (KN)			تغییر مکان نهایی (mm)			گروه
EXP	FE	EXP/FE	EX	FE	EXP/FE	
81.3	95.0	0.86	102	96.12	1.06	AH0
90.0	105.0	0.86	50.42	42.75	1.18	AH1
117.3	125.0	0.94	44.73	32.31	1.38	AH4
132.2	140	0.94	39.4	30	1.31	BH0
150.0	105.0	1.43	63.24	55.14	1.15	BH1
167.0	175.0	0.95	61.56	58.11	1.06	BH4
میانگین		0.996	میانگین		1.191	

### نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی اثر لایه های نازک FRP به سطح کششی تیر، مقاومت در تیرها به نحو چشمگیری افزایش پیدا کرده است، نتایج حاصله از این آزمایش به شرح زیر است. نسبت به نمونه های کنترلی، بار نهایی تیرهای تقویت شده با FRP که با آرماتورهای به قطر 16 میلیمتر مسلح شده بودند بین 4 تا 26 درصد افزایش یافت، این نسبت برای تیرهای تقویت شده با FRP که با آرماتورهایی به قطر 22 میلیمتر مسلح شده بودند بین 7 تا 25 درصد بود با توجه به درصدهای حاصل شده می توان نتیجه گرفت که با کاهش درصد آرماتورها، تاثیر FRP ها از دیدگاه افزایش مقاوم، افزایش می یابد. در مراحل اولیه بارگذاری (قبل از ترک خوردگی خمشی بتن) نمودار بار- تغییر مکان نمونه ها تقریباً بر هم منطبق اند. به تدریج با افزایش بار، خیز نمونه های تقویت شده کاهش پیدا می کند که این امر بر کاهش شکل پذیری نمونه های مقاوم سازی شده نسبت به نمونه های کنترلی دلالت دارد. به طور کلی درصد خطای موجود بین دو روش آزمایشگاهی و المان محدود در بار جاری شدن کم می باشد ولی با افزایش بار، این مقدار افزایش یافته (در اکثر موارد) تا اینکه در بار شکست به حداکثر مقدار خود می رسد.

### منابع

1. ACI 440.2R-02 (2002), "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structure," ACI 440.2R-02.
2. Teng, J.F. and Chen, J.F. and Smith, S.T. and Lam, L., (1988), "FRP Strengthened RC structures," John Wiley & Sons, pp245.
3. Hashemi, S.H. and Rahgozar, R. and Maghsoudi, A.A., (2007), "Finite Element and Experimental Serviceability Analysis of HSC Beams Strengthened with FRP Sheets," American Journal of Applied Sciences, 4 (9), pp 725-735.
4. Master, J.E., (1987), "Basic Failure Modes of Continuous Fiber Composites," Eng. Material Handbook, Vol. 1, Composites. ASM International, USA
5. Smith, S.T. and Teng, J.G., (2002), "FRP Strengthened RC Beams. I: Review of Debonding Strength Models," Elsevier Engineering Structures (24), pp 385-395

6. Maalej, M. and Bian, Y., (2001), "Interfacial Shear Stress Concentration in RC Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded FRP," In FRP Composites in civil Engineering. Vol. I. Editor (Teng, J.G.). Elsevier Science Ltd, pp 519-526

7. Philip, A. and Ritchie David, A. and Thomas Le Wu Lu and Guy, M. Connely, (1991), "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics," ACI Structural Journal

8. Weight, R.G & El-Hacha, R. & Erki, M.A., (2001), "CFRP Sheet Strengthening Damaged Continuous Reinforced Concrete Beams," In FRP Composites in civil Engineering. Vol. I. Editor (Teng, J.G.). Elsevier Science Ltd, pp 433-440

9. ANSYS Manual Set., (2003), ANSYS, Inc., Canonsburg, PA 15317 USA.

10. Stephen p. Schneider (1998), "Axially Loaded Concrete- Filled Steel Tubes," Associate Member, ASCE J. Structural Engineering, October.

11. محمدی، ط. و اصفهانی، م. ر.، "بررسی رفتار خمشی بتن مسلح تقویت شده با ورقهای FRP با استفاده از مدل آسیب دیدگی پلاستیک"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران، اردیبهشت.

12. خالو، ع. و قراچورلو، ع.، (1384)، "مطالعه عددی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با لایه های فیبر کربن"، دومین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه، تهران، ایران، 12-10 اردیبهشت.

## افزایش مقاومت برشی تیرهای بتنی با استفاده از الیاف پلیمری مرکب FRP

محمد جواد فدایی	سعید سرفلاح	سعید علیزاده تقی آباد
استادیار بخش مهندسی عمران -	کارشناسی ارشد سازه - دانشگاه	دانشجوی کارشناسی ارشد سازه -
دانشگاه شهید باهنر کرمان	مازندران	دانشگاه شهید باهنر کرمان
E-mail:mjfadaee@yahoo.com	E-mail:ensaheed2007@gmail.com	E-mail:eng.s.alizadeh@gmail.com

چکیده - با توجه به هزینه قابل ملاحظه بازسازی مجدد سازه‌ها، در سال‌های اخیر مسئله تقویت و ترمیم سازه‌های ضعیف و خسارت دیده، بطور جدی مورد توجه قرار گرفته است. برحسب مقاومت مورد نظر، میزان آسیب وارده، نوع اعضاء، نحوه اتصال آن‌ها و همچنین امکان دسترسی به مصالح و مسائل اقتصادی طرح، روش‌های گوناگونی جهت مرمت و تقویت مطرح شده که می‌توان به استفاده از پیش تنیدگی خارجی، ژاکت فولادی یا بتنی، یا صفحات الیاف پلیمری مرکب FRP اشاره نمود. شکست‌های برشی و خمشی تیرها دو شکل اصلی و متداول شکست تیرهای بتنی می‌باشند. بدلیل شکل پذیری بیشتر تیرها در وضعیت شکست خمشی نسبت به شکست برشی، حالت شکست خمشی مطلوب می‌باشد. زیرا شکست شکل پذیر، هشدار دهنده بوده و اجازه باز توزیع تنشها را به سازه می‌دهد ولی شکست ترد، ناگهانی و فاجعه آمیز است. امروزه با توجه به جایگاه الیاف پلیمری مرکب FRP برای مقاوم سازی ساختمان‌های بتنی و بنایی استفاده از این مواد برای ترمیم و مقاوم سازی بشدت رو به افزایش است. روش‌های مقاوم سازی برشی تیرها متنوعند ولی استفاده از نوارها و ورق های FRP مورد توجه بیشتری هستند. در این تحقیق به مطالعه و رفتار برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP به روش اجزاء محدود پرداخته می‌شود که در آن مدل رفتاری FRP با اصلاح المان پوسته‌ای بتن مسلح تعریف می‌شود.

کلید واژه - مقاومت برشی، تیر بتن مسلح، روش اجزاء محدود، FRP

### 1- مقدمه

اعضای سازه ای بسته به مقاومت لرزه ای مورد نظر، میزان آسیب دیدگی و نوع اتصالات، با روش های مختلفی از قبیل تزریق رزین، جایگزینی قطعات جدا شده، بکارگیری پیش تنیدگی خارجی، بتن پاشی، چسباندن ورق های مخ تلف روی سطوح، ژاکتهای بتن مسلح ی ا قفسه ای فلزی، مرمت یا تقویت می شوند.

کلید موفقیت عملیات ترمیم و تقویت، ایجاد پیوستگی مطلوب بین بتن قدیمی و جدید است که با اعمال روش های



زیر تحقق می یابد.

1-زبرکردن سطوح بتنی قدیمی.

2-پوشاندن سطوح قدیمی با انواع رزین ها از جمله اپوکسی قبل از بتن ریزی جدید.

3-جوش دادن میلگردها.

4-استفاده از میلگردهای انتظار.

شکل پذیری عضو ترمیم شده با محصور کردن صحیح بتن توسط خاموتها و تنگهایی با فواصل محدود، ژاکتهای فولادی، کامپوزیت های پلیمری و نظایر آن بهبود می یابد. باید در نظر داشت که تغییر در سطح مقطع اعضای سازه ای، موجب تغییر در سختی اجزاء مختلف گردیده و منجر به باز توزیع تنشها می شود. قفسهای فلزی که از نبشی ها و بست های فولادی ساخته شده اند فقط برای مرمت ستونها به کار می روند، اما مرمت اتصالات بین ستونها و تیرها با این روش ممکن نیست. چسباندن ورقهای فلزی یا FRP روی بتن روش ساده ای است. در این روش بدون تغییر سختی سازه، ناحیه کششی تقویت می گردد.

مواد مرکب پلیمری از جمله مواد مهندسی و ساختمانی جدیدی هستند که در توسعه و کاربرد آنها متخصصان فراوانی از رشته های مختلف مانند: متالوژی، سرامیک، پلیمر، علوم مهندسی مواد، شیمی، مهندسی شیمی، مکانیک جامدات، مکانیک شکست مواد و غیره سهم بسزایی داشته اند. [1]

## 2- تاریخچه استفاده از مواد مرکب پلیمری:

با بسط و توسعه شیمی آلی در سال 1847، برزیلوس 1 شیمیدان سوئدی اولین رزینها را تهیه نمود و در سال 1909 توسط کبالت رزینی دیگر ساخته شد. در سال 1930 دانشمندان به فکر استفاده از مواد تقویت کننده افتاده و مفهوم جدید مواد مرکب را پایه گذاری کردند. در سال 1942 پلی استر تقویت شده با الیاف شیشه، 1946 مواد مرکب رزین اپوکسی، 1964 پلاستیکهای تقویت شده با الیاف کربن و شیشه و در سال 1975 مواد مرکبی از الیاف آرامید-گرافیت ساخته شده است. در حال حاضر نیز علاوه بر پیشرفتهای جدید و ساخت مواد مرکب متنوع، این مواد کاربردهای وسیعی در صنعت پیدا نموده و تدریجاً جایگزین مواد قدیمی شده اند. در مواد مرکب پلیمری عموماً سه ناحیه متمایز، شامل فاز پیوسته (ماتریس)، فاز ناپیوسته (تقویت کننده) و لایه مرزی بین این دو فاز وجود دارد که تعیین کننده خواص و مشخصه های ماده مرکب می باشد. الیاف، نقش اصلی در مقاومت و مشخصات مکانیکی ماده مرکب دارد و ماتریس، نقش توزیع بار بین الیاف و محافظت آن در برابر عوامل محیطی دارد. عوامل اصلی مؤثر در خواص فیزیکی کامپوزیتهای FRP عبارتند از:

1-خواص مکانیکی الیاف

2-آرایش الیاف

3-طول الیاف

4-شکل الیاف

5-درصد ترکیب الیاف

6-جنس الیاف

7-خواص مکانیکی ماتریس پلیمری

8-چسبندگی و پیوند الیاف و ماتریس

## 3- روش های گوناگون تقویت برشی و نحوه انتخاب آن:

به منظور افزایش مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح، روش های گوناگونی شامل چسباندن ورق به شکل به طرفین و وجه کششی تیر و دور پیچ نمودن آن مورد U طرفین تیر، چسباندن ژاکت های استفاده قرار می گیرد. در تمامی روش ها می توان از نوارها و یا ورق های FRP استفاده نمود. بدلیل اینکه ورق FRP تنها در جهت طولی الیاف

مقاومت دارند می توان ورق را در جهتی قرار داد که بیشترین تأثیر را در ک نترل ترک برشی داشته باشد . بعلاوه بدلیل امکان تغییر جهت نیروی برشی در بارگذاری های تکراری و زلزله، باید الیاف را در دو جهت قرارداد تا ظرفیت برشی در هر دو جهت افزایش یابد . مشاهده شده است که کاربرد الیاف در دو جهت در شرایط عادی نیز مفید است. ]

[1

#### 4- مودهای شکست تیرهای بتن مسلح

##### تقویت برشی شده با ورق های FRP:

در آزمایش های انجام شده روی تیرهای بتن مسلح تقویت برشی شده با ورق های FRP مودهای خرابی مختلفی مشاهده شده است که شامل شکست همراه با پارگی ورق FRP شکست برشی بدون پارگی ورق FRP، شکست برشی ناشی از جدایی ورق FRP و شکست های موضعی می باشد.

مودهای شکست در تیرهای تقویت برشی شده به شکل های کششی - برشی، خمشی - برشی، فشاری - برشی ، مشابه تیرهای بتن مسلح معمولی است . شکست های کششی - برشی و خمشی - برشی هنگامی رخ می دهند که نسبت اندازه دهانه به عمق تیر بزرگ باشد

جدول 1- شکل چسباندن ورق FRP

سیستم تقویتی علامت اختصاری	چسباندن به طرفین تیر S	زاکت U شکل	دورپیچی W
توضیحات	چسباندن FRP تنها به طرفین تیر	چسباندن سه قطعه به صورت خدای قابل قبول نیست و زاکت U شکل باید پیوسته باشد. زاکت U شکل متداول (طرفین - وجه کششی) ترجیح دارد اما زاکت معکوس (طرفین - وجه فشاری) را نیز می توان بکار برد.	ورق FRP باید دور تا دور مقطع با طول همپوشی کافی در وجه فشاری تیر، پیچانده شود. طول همپوشی بهتر است که در وجه فشاری مقطع صورت گیرد تا کرنش نسبی بین FRP و بتن در جهت الیاف کاهش یابد. در صورتیکه همپوشی در وجه فشاری همپوشی را در وجه کششی بکار برد.
	در صورت امکان انتهای آزاد توارها و یا ورق FRP باید به نحو مناسبی مهار گردد.		
	به منظور جلوگیری از شکست FRP ناشی از تنش های خمشی در گوشه ها و جدایی FRP از روی وجه کششی یا فشاری، گوشه های تیر باید به نحو مناسبی گره گردد.		

شکست فشاری برشی معمولاً در تیرهایی با نسبت دهانه به عمق کوچکتر اتفاق می افتد جزئیات بیشتر شکست تیرهای بتن مسلح معمولی در کتاب های طراحی سازه های بتن مسلح تشریح شده است. ممکن است ارتباط محدوده های ذکر شده در مورد نسبت دهانه به عمق تیرها و مودهای شکست تیرهای تقویت برشی شده با ورق های FRP با تیرهای معمولی متفاوت باشد . همچنین رفتار و مشارکت ورق های FRP در مقاومت برشی تیر در م ودهای مختلف متفاوت بوده و تاکنون چنین ابهاماتی با قاطعیت پاسخ داده نشده و نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه است . در ادامه این بخش مودهای شکست تیرهای تقویت برشی شده با ورق های FRP که در آزمایش های مختلف مشاهده شده است تشریح می گردد. [2]

#### 1-4- شکست برشی همراه با پارگی ورق

ابتدا ترک قائم - این شکست اغلب همراه با یک ترک قطری کششی - برشی رخ می دهد خمشی در وجه کششی ایجاد شده و سپس یک ترک در نزدیکی تکیه گاه ظاهر می شود و با گسترش بطرف نقطه بارگذاری بصورت قطری گسترش می یابد . در برخی شرایط ترک قطری دفعتاً ایجاد می گردد. با افزایش بازشدگی دهانه ترک در نهایت کرنش ورق FRP به مقدار نهایی خود می رسد و پاره می شود . بدلیل گسترش سریع پارگی ورق در امتداد ترک قطری، شکست تیر بسیار ترد است . در اغلب موارد قبل از شکست تیر، ورق FRP در طرفین آن بطور موضعی جدا می گردد ولی شکست نهایی ناشی از پارگی ورق می باشد. در نتیجه جدایی موضعی ورق FRP تأثیری در ظرفیت برشی این مود شکست ندارد . تحقیقات آزمایشگاهی نشان می دهد که اکثر تیرهای تقویت شده بصورت دورپیچ و نیمی از تیرهای تقویت شده با زاکت های U شکل در این مود می شکنند.

#### 2-4- شکست برشی بدون پارگی ورق FRP

در این حالت روند شکست، مشابه شکست در مود قبلی می باشد با این تفاوت که ورق FRP پاره نشده و بعد از شکست بتن، ورق بار زیادی را تحمل می کند . نمونه هایی از چنین شکستی در سال 1995 در تحقیقات چاجز روی تیرهای تقویت شده با ورق های AFRP با کرنش نهایی درصد مشاهده شده است . در این آزمایش ها ورق AFRP موجب افزایش بسیار زیاد بار نهایی تیر بعد از گسیختگی بتن گردیده است.

### 4-3- شکست برشی ناشی از جدایی ورق FRP

شکست تیر بتن مسلح تقویت برشی شده ممکن است، بدلیل جدایی ورق FRP از تیر رخ دهد. نحوه جدایی ورق را به ترتیب برای تیرهایی که بصورت U شکل و یا فقط در طرفین تیر تقویت شده اند نشان می دهد. هنگامیکه ورق FRP شروع به جدا شدن از بتن می نماید، شکست به سرعت اتفاق می افتد. شکل پذیری این مود شکست بسیار کم است.

تحقیقات آزمایشگاهی نشان می دهد که تقریباً تمامی تیرهای ی که در دو وجه (طرفین تیر) تقویت می شوند و بسیاری از تیرهای تقویت شده بصورت U شکل به این حالت می شکنند.

### 4-4- استفاده شکست در مجاورت بست های مکانیکی

چنانچه برای مهار ورق FRP در طرفین تیر، از بست های مکانیکی استفاده گردد ممکن است گسیختگی در مجاورت بست ها رخ دهد. بعنوان مثال هنگامیکه از بست های مکانیکی جهت اتصال ورق U شکل در زیر بال تیرهای T شکل استفاده می گردد، ممکن است جدایی در محل اتصال بال به جان رخ دهد. همچنین بتن و یا ورق FRP در مجاورت بست های مکانیکی بصورت موضعی امکان گسیختگی دارند. این م ودهای شکست در آزمایش های ساتو ارائه شده است. آزمایش های بیشتری در این مورد انجام نگرفته، لازم است دقت بیشتری در عمل صورت پذیرد.

### 5- نتیجه گیری ظرفیت برشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با FRP: [4]

روابط موجود در رابطه با ظرفیت برشی تیر های تقویت شده با FRP از سه بخش تشکیل شده اند که به صورت زیر بیان می شود:

$$V_r = V_c + V_s + V_{FRP} \quad (1)$$

در این رابطه :

$V_c$  = سهم برش مقاوم بتن

$V_s$  = سهم برش مقاوم فولاد عرضی

$V_{FRP}$  = سهم برش مقاوم ورق FRP در مقاومت برشی

سهم مقاومت برشی بتن در روابط و آیین نامه های مختلف عموماً شکل یکسانی را داراست که می توان به صورت زیر نشان داد:

$$V_c = \beta \sqrt{f_y} \frac{b_w d}{\tan \theta_c} \quad (2)$$

در این رابطه :

$\beta$  = ضریب کاهش به دلیل ترک خوردگی مقطع

$f_c$  = مقاومت فشاری بتن

$b_w$  = عرض جان تیر

$d$  = ارتفاع خاموت

$\theta_c$  = زاویه ترک مقطع نسبت به محور طولی تیر

با این توضیح که در بعضی آیین نامه ها در رابطه  $V_c$  به جای  $f_c^{1/2}$  مقدار  $f_c^{2/3}$  در نظر گرفته شده است.

سهم برش مقاوم فولاد عرضی از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$V_s = A_v f_y \frac{d}{s \tan \theta_c} \quad (3)$$

در این رابطه :

$A_v$  = سطح مقطع دو پای خاموت

$f_y$  = مقاومت تسلیم خاموتها

$S$  = فاصله مرکز به مرکز فولادهای عرضی

بطور مشابه سهم مشارکت ورق FRP از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{FRP} = A_{FRP} f_{FRP} \frac{d_{FRP} \sin \alpha}{S_{FRP} \tan \theta_c} (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \theta_c) \quad (4)$$

در این رابطه :

$\alpha$  = زاویه الیاف FRP نسبت به محور طولی تیر

$A_{FRP} = 2b_{FRP} t_{FRP}$

bFRP و tFRP پهنا و ضخامت یک نوار FRP

SFRP = فاصله نوارهای FRP

dFRP = ارتفاع مؤثر نوارهای FRP

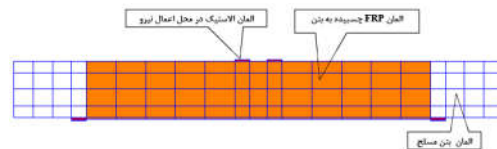
تفاوت روابط پیشنهادی توسط محققین مختلف عموماً در ضرایب روابط فوق همچون  $\beta$  و تنش محاسباتی  $f_{FRP}$  است.

### 6- مدل تحلیلی:

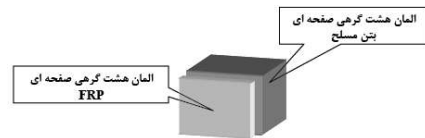
در مدل سازی از المان هشت گرهی صفحه ای استفاده شده است. به هر المان مشخصات مواد مورد استفاده در آزمایش تخصیص داده می شود. با توجه به این که برنامه WCOMD با روش ترک پخشی کار می کند با اصلاح نمودار تنش کرنش فولاد یک ضریب (C) که به ضریب سخت شدگی کششی معروف است به المان های بتن که با میلگرد کششی مسلح شده اند اختصاص می یابد. این ضریب برابر 0.2 یا 0.4 در ناحیه ای از عضو که تحت تاثیر چسبندگی بتن با فولاد یا FRP است و در آن می تواند ترک های گسترده ایجاد شود (ناحیه RC) بوده و برای مابقی المانها (ناحیه PL) برابر 1.4 است، که البته میزان دقیق آن وابسته به اندازه المان است. جزئیات مدل های رفتاری در فصل قبل بحث شده است. همه تیرها به ترتیبی که در شکل دیده می شود المان بندی شده اند، در ناحیه تقویت شده با FRP از المان مجزا که بر روی المان های اصلی تیر قرار داده شده اند (به صورت Overlap) جهت مدل سازی FRP استفاده شده است. در شکل نحوه مدل سازی المان بتن و ورق FRP به صورت شماتیک نشان داده شده است. پس از تحلیل می توان تغییر شکل تیر و ترک خوردگی آن را نیز بررسی نمود.

### 7- مشخصات تیرهای مدل سازی شده: [3]

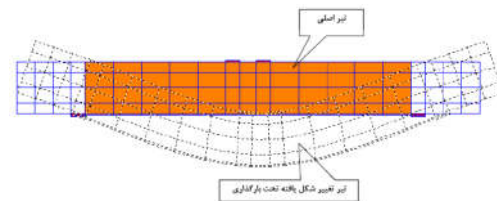
طبق آزمایشات خلیفه و همکاران در سال 2002 بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP دو مدل تیر طراحی شده و بر روی آنها آزمایشات مختلف برای بررسی ظرفیت برشی صورت گرفته است. در این آزمایش اختلاف تیرهای اصلی در نوع خاموتگذاری و نسبت دهانه برشی به عمق تیر است. تمام تیرها از نظر طول و عمق موثر و آرماتورهای طولی یکسانند و تفاوتی ندارند. طول تیرهای مورد آزمایش 3050 میلیمتر و عمق موثر آنها 305 میلیمتر و عرض آنها 105 میلیمتر است. چهار آرماتور طولی به قطر 32 میلیمتر، دو عدد در قسمت کششی و دو عدد در قسمت فشاری تیر قرار گرفته است. مود خرابی تیر مرجع گسیختگی برشی می باشد. پوشش آرماتور در تیرهای مورد آزمایش به مقدار 35 میلیمتر از مرکز میلگردهای طولی در نظر گرفته شده است. تیرها بوسیله خاموت هایی با قطر 10 میلیمتر مسلح شده اند. فاصله خاموتها و نوع قرارگیری آنها در هر سری از تیرها SW و SO متفاوت است که ظرفیت برشی متفاوتی نیز ایجاد می کند. با توجه به نوع قرارگیری خاموتها تیرها به دوسری SW و SO تقسیم می شوند.



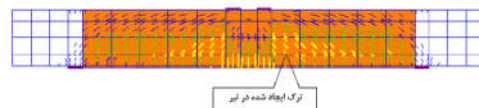
شکل 1- نحوه المان بندی تیرها



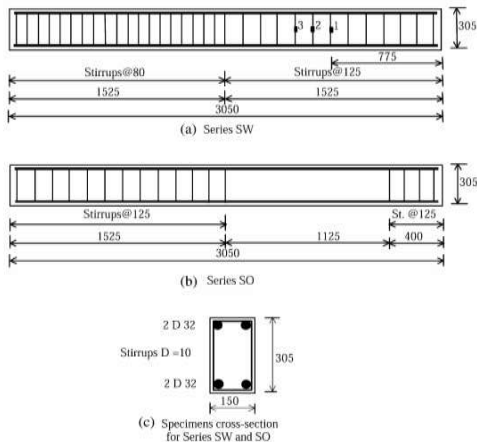
شکل 2- المان بتن تقویت شده با FRP



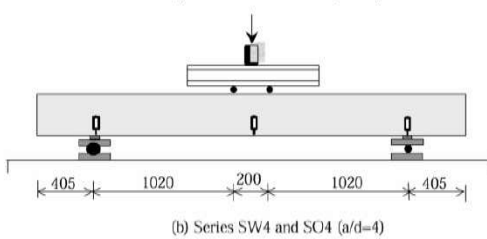
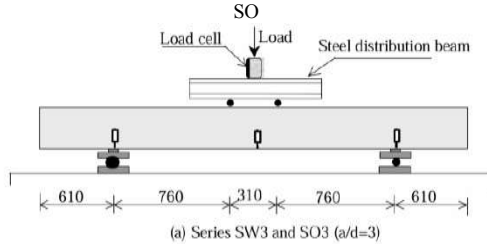
شکل 3- تغییر شکل تیر تحت بارگذاری



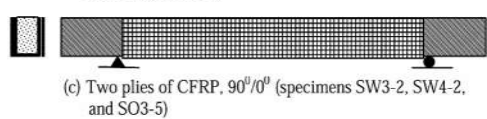
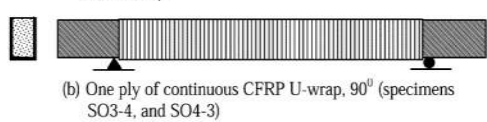
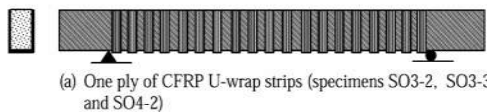
شکل 4- تیر ترک خورده تحت بارگذاری



شکل 5- شکل و نوع قرارگیری میلگردها در تیرهای SW و SO



شکل 6- نوع بارگذاری و شرایط تکیه گاهی تیرهای SW و SO



شکل 7- طرز تقویت تیرها با FRP

تمام تیرها با توجه به روش بیان شده در فصل قبل و مشخصات مصالح مورد استفاده در آزمایش و شرایط تکیه گاهی و بارگذاری بیان شده مدل شده اند. در مدل سازی با اصلاح نمودار سخت شدگی کششی فولاد به المان های بتن که با میلگرد مس لچ شده اند ضریب 0.4 المان های تقویت شده با FRP. ضریب 0.2 و به المان های غیر مس لچ و یا با درصد تسلیح کمتر از مقدار بحرانی ضریب 0.4 اختصاص می یابد.

جدول 2- مشخصات مصالح

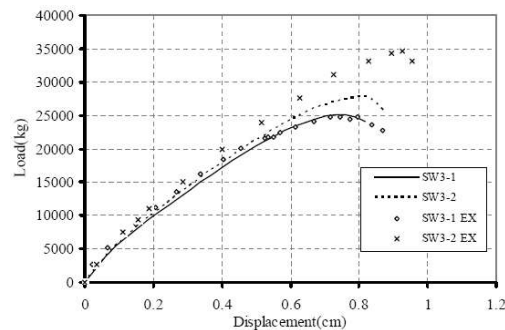
نوع	خصوصیات	مقاومت فشاری (MPa)	نقطه تسلیم (MPa)	مقاومت کششی ماکزیمم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
بتن	سری SW	19.3	--	--	20
	سری SO	27.5	--	--	25
فولاد	D=3mm	--	460	530	200
	D=10mm	--	350	530	200
CFRP	t=1.62mm	--	--	3790	228

## 8- نتایج عددی:

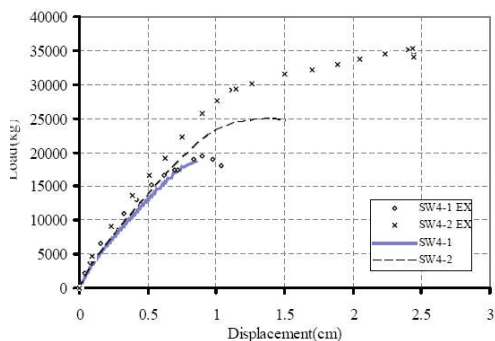
نتایج آزمایش و روابط تئوری که براساس روابط ACI بدست آمده است با نتایج بدست آمده از تحلیل با برنامه WCOMD در جدول زیر مقایسه شده است.

جدول 3- مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل ها [5] و [3]

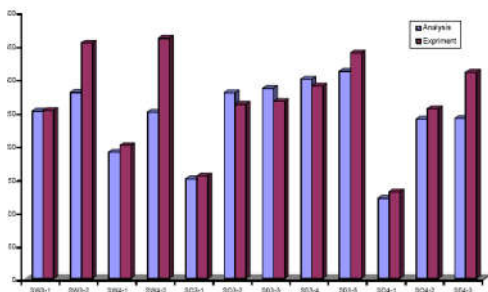
نمونه آزمایش	نتایج آزمایش	نیروی برش ماکزیمم بدست آمده از آزمایش	روابط طراحی بر اساس ACI	حد اکثر نیروی اضمالی بدست آمده از تحلیل با WCOMD				
—	$V_{exp}$ (KN)	$(V_c+V_f)_{exp}$ (KN)	$V_{exp}$ (KN)	$P_c$ (KN)	$(V_c+V_f)$ (KN)	$V_c$ (KN)	$V_u$ (KN)	KN
SW3-1	126	126	—	127	127	—	127	252
SW3-2	177	126	50	322	127	15	151	280
SW4-1	100	100	—	200	125	—	125	190
SW4-2	180	100	80	361	125	15	128	250
SO3-1	77	77	—	152	21	—	21	150
SO3-2	131	77	54	262	21	29	70	279
SO3-3	122	77	54	266	21	22	82	286
SO3-4	122	77	67	289	21	72	112	300
SO3-5	169	77	92	331	21	72	112	312
SO4-1	65	65	—	130	29	—	29	121
SO4-2	127	65	62	255	29	29	67	220
SO4-3	155	65	90	310	29	72	111	221



شکل 8- منحنی نیرو-جابجایی تیر SW3



شکل 9- منحنی نیرو- جابجایی تیر SW4



شکل 10- مقایسه ظرفیت برشی تیرهای مورد آزمایش خلیفه و همکاران با تیرهای مورد تحلیل با برنامه WCOMD

2002, p. 118.

## بررسی پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به روش اجزای محدود در برنامه ANSYS

ایمان الیاسیان\* - کارشناس ارشد سازه دانشگاه یزد

[iman.elyasian@gmail.com](mailto:iman.elyasian@gmail.com)

حمید رضا رونق\*\* - دکترای سازه دانشگاه کوئینزلند استرالیا

[h.ronagh@uq.edu.au](mailto:h.ronagh@uq.edu.au)

نادر عبدلی\*\* - استادیار سازه دانشگاه یزد

[n.abdoli@yazduni.ac.ir](mailto:n.abdoli@yazduni.ac.ir)

### چکیده :

همانطور که می دانیم یکی از روشهای تقویت اعضای سازه ای و بتنی استفاده از ورقه های FRP است که در این مقاله به بررسی برخی از پارامترهای مؤثر در تیر بتن آرمه تقویت برشی شده با ورقه FRP می پردازیم. برای این منظور از تیرهای آزمایشگاهی مرکز تحقیقات حمل و نقل دانشگاه کنتاکی با توجه به اعتبار و صحت نتایج آزمایشگاهی آن استفاده می کنیم. در نهایت با یک مدل اجزای محدود به کمک برنامه ANSYS تیرهای آزمایشگاهی را به صورت تئوری مدل کرده و پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیر بتن آرمه با FRP مربوط به خصوصیات FRP و چسب چون جهت قرارگیری الیاف و خصوصیات عضو بتنی چون تأثیر مقاومت فشاری بتن، سطح مقطع آرماتور طولی کششی و فشاری، مقدار و فاصله آرماتورهای عرضی و در نهایت نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر را بررسی می کنیم.

### کلید واژه :

بتن آرمه - مدل اجزای محدود- پارامترهای مؤثر در تقویت برشی - ورقه FRP - تغییر جهت الیاف - برنامه ANSYS

با توجه به شکل (10) می توان نتیجه گرفت نتایج تحلیلی با استفاده از برنامه تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و می توان با توجه به فرضیات به کار رفته در مدل سازی به شبیه سازی رفتار نمونه های بتنی تقویت شده با FRP پرداخت.

## 9- مراجع

- [1] رهایی، علیرضا، زمردیان، آرش، "ترمیم و تقویت سازه های بتن مسلح با الیاف پلیمری مرکب"، 1384، دانشگاه تفرش.
- [2] "مدل سازی گسترش ترک و رفتار سخت شدگی کششی در المان های بتن مسلح تقویت شده با FRP"، 1385، سارا راهنمای سپهر تحت راهنمایی دکتر مسعود سلطانی محمدی، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشگاه تربیت مدرس.
- [3] Khalifa A. Shear performance of beams strengthened with advanced composites. Ph.D. thesis, Alexandria University, Egypt: Structural Engineering Department, 1999.
- [4] Al-Sulaimani, K.A. & Wight, J.K., "Beam analysis using concrete tensile strength in truss models.", 1992, ACI Structural journal, 89:284-289.
- [5] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI, Technical Report;

## 1- مقدمه :

تحلیل مقاطع بتن آرمه با فرض رفتار غیرخطی بتن به کمک اجزای محدود کاری پیچیده و وقتگیر است. اما امروزه قادریم به کمک تلاش محققان دیگر برای شبیه سازی رفتار مقاطع بتن آرمه با ورقه کامپوزیتی FRP به روش اجزای محدود، در این مقاله رفتار تیر بتن آرمه تقویت برشی شده را به کمک برنامه ANSYS مدل کرده و پارامترهای مختلف اشاره شده در تقویت برشی را به روش اجزای محدود در مورد آنها بررسی می کنیم.

## 2- پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP

به طور کلی پارامترهای تقویت برشی را به موارد زیر تقسیم بندی می کنیم

الف) خصوصیات FRP و چسب : شامل موارد زیر

- 1- شکل و الگوی تقویت<sup>17</sup> 2- مقدار و نوع FRP<sup>2</sup>
- 3- جهت قرارگیری الیاف ورقه FRP با محور عضو<sup>3</sup>
- 4- تعداد لایه های ورقه FRP<sup>4</sup> 5- تنش و کرنش نهایی FRP<sup>5</sup>

6- تنش برشی چسب<sup>6</sup> 7- طول چسبندگی ورقه FRP<sup>7</sup>

8- ضخامت ورقه FRP<sup>8</sup>

ب) خصوصیات عضو بتنی : شامل موارد زیر

- 9- مقاومت موجود بتن<sup>9</sup> 10- طبیعت بارگذاری<sup>10</sup>
- 11- شرایط تکیه گاهی<sup>11</sup>
- 12- تأثیر دهانه برشی به عمق مؤثر (a/d)<sup>12</sup>
- 13- آرایش و نسبت آرماتور برشی<sup>13</sup>
- 14- آرایش و نسبت آرماتور طولی<sup>14</sup> 15- هندسه عضو و ابعاد آن<sup>15</sup>

## 3- مدلسازی در برنامه ANSYS

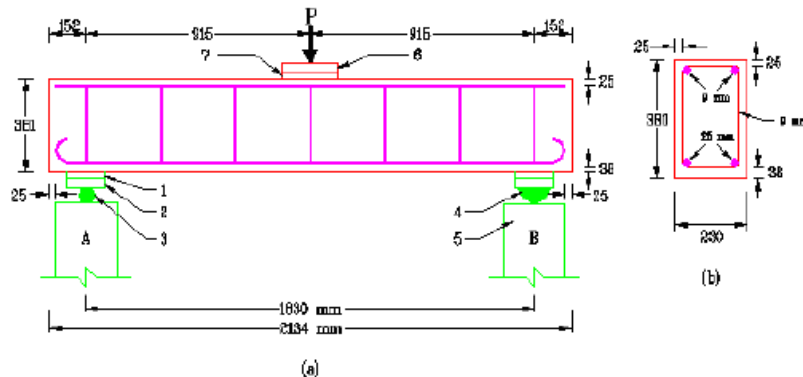
همانطوری که در چکیده بیان شد در این مقاله تیرهایی که توسط مرکز تحقیقات حمل و نقل دانشگاه کنتاکی مورد آزمایش قرار گرفته اند در برنامه ANSYS و به روش اجزای محدود با در نظر گیری تقارن به صورت 1/4 مدل شدند. در بخش اول با تغییر جهت قرارگیری الیاف FRP با محور عضو تیر تأثیر این

- 
- |  |  |                                   |
|--|--|-----------------------------------|
| -Wrapping scheme or contribution of externally FRP laminates | 2- Amount and type of FRP <sup>17</sup>  |                                   |
| 3- FRP Orientation   | 4- FRP Laminate plies                    | 5- Ultimate FRP stress and strain |
| 6- Adhesive shear stress                                     | 7- FRP Anchorage laminate length         | 8- FRP Laminate thickness         |
| 9- The existing concrete strength                            | 10- Nature of Loads                      | 11- Support Conditions            |
| 12- Shear spans to effective depth ratio                     | 13- Steel stirrup ratio and arrange      |                                   |
| 14- Longitudinal steel reinforcement ratio and arrange       | 15- Geometry and dimension of the member |                                   |
| 16- Full wrap  |  |                                   |

پارامتر را بررسی کردیم و در بخش دوم پارامترهای خصوصیات عضو بتنی چون مقاومت بتن، سطح مقطع آرماتورهای طولی کششی و فشاری، مقدار آرماتورهای عرضی و فواصل آنها، همچنین موقعیت بار و تأثیر نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر را با برنامه ANSYS بررسی می‌کنیم.

### 3-1. هندسه تیر بتن آرمه مورد آزمایش والگوهای تقویتی ورقه FRP بکار رفته:

تیر به طول 2.13 m و دهانه آزاد مؤثر 1.83 m، ارتفاع 38 cm، عرض 23 cm مطابق شکل-1 بوده که دارای 2 آرماتور فشاری فوقانی #3 با قطر معادل 9 mm و 2 آرماتور کششی تحتانی #8 با قطر معادل 25 mm و آرماتورهای عرضی @9  $\phi$  30 cm می‌باشد. تیرهای مورد آزمایش شامل 2 تیر کنترل - 4 تیر با الگوی جهت قرارگیری الیاف اصلی FRP در راستای عمود بر محور تیر یا 90 درجه - 2 تیر با الگوی یک لایه با الیاف 90 درجه در زیر و یک لایه با الیاف 45 درجه در رو - 4 تیر با الگوی یک لایه با الیاف 45 درجه در زیر و یک لایه با الیاف 0 درجه در رو و در مجموع 14 تیر که 2 تیر آن معمولی و تقویت نشده و 12 مورد آنها به صورت دورپیچ کامل<sup>16</sup> مطابق الگوهای گفته شده تقویت برشی شده اند.



1. ورقه فولادی به ابعاد 560 mm x 152 mm x 25 mm A36
2. ورقه لاستیکی 560 mm x 152 mm x 13 mm
3. ورقه فولادی صلب 64 mm dia. A36
4. ورقه فولادی صلب نیمه گرد 128 mm dia. A36
5. اعضای تکیه گاهی
6. ورقه فولادی به ابعاد 560 mm x 230 mm x 51 mm A36
7. ورقه لاستیکی 560 mm x 230 mm x 13 mm

### شکل 1- هندسه تیر و آرایش آرماتورها [2]

### 3-2. رفتار مواد:

مقاومت فشاری بتن 31 MPa و تنش تسلیم آرماتور 414 MPa بوده و مدول الاستیسیته بتن از رابطه  $E_c = 4750\sqrt{f'_c}$  و تنش ترک خوردگی بتن از رابطه  $f_t = 0.6\sqrt{f'_c}$  و ضریب پواسون بتن  $\nu = 0.2$  فرض شده است. مدول الاستیسیته فولاد نیز 200 GPa و ضریب پواسون  $\nu = 0.3$  در نظر گرفته شده است و فرض به



رفتار الاستوپلاستیک ایده آل یا کامل برای فولاد و صرفنظر کردن از سخت شدگی کرنشی آن بوده و منحنی تنش - کرنش بتن به صورت تک محوره و از رابطه هوگنستاد در برنامه ANSYS تعریف شده است .

$$E_c = 25000 \text{ MPa} \quad f_t = 3.35 \text{ MPa}$$

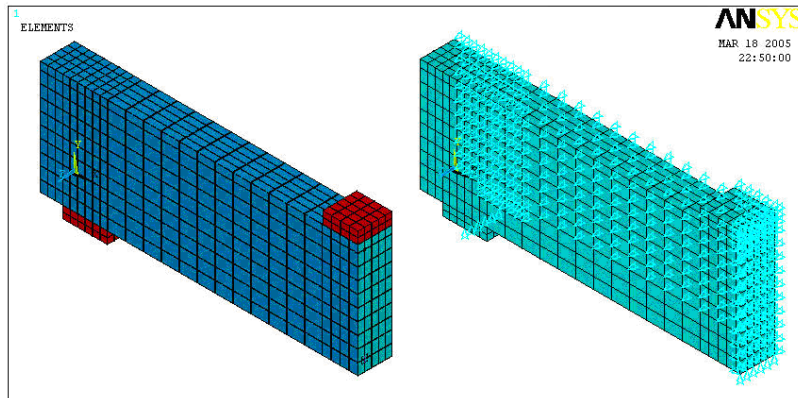
CFRP Fabric	ضخامت (mm)	تنش نهایی کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)
	0.18	490	228	1.8

مشخصات ورقه FRP درجهت الیاف اصلی مطابق جدول فوق ارائه شده است و فرض به رفتار ارتوتروپیک بوده از این رو مدول الاستیسیته حدود 10 الی 15 درصد جهت اصلی در نظر گرفته شد و در مورد مدول برشی مواد ارتوتروپیک نیز می توان گفت :

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2\nu_{xy} E_x} \quad \text{و} \quad \text{ANSYS} \quad \text{نحوه مدل کردن در برنامه} \quad \text{3-3.} \quad \text{المانهای بکاررفته :}$$

ابتدا نوع آنالیز را h-method انتخاب کرده و سیستم واحد نیوتن و میلیمتر را برگزیده و برای مدل کردن بتن از المان Solid65 که امکان مدل کردن ترک خوردگی و خردشدگی بتن در آن وجود دارد ، برای آرماتورهای طولی و عرضی از المان میله ای 3 بعدی Link8 و برای مدل کردن صفحات فولادی زیر تکیه گاه و محل اعمال بار متمرکز برای جلوگیری از خرد شدگی موضعی المانهای بتن در اثر تمرکز تنش از المان Solid45 و برای ورقه FRP از المان سطحی Shell43 استفاده شده است . برای هر المان مشخصات مربوطه و ثوابت حقیقی چون سطح مقطع المان آرماتورها ، ضخامت ورقه FRP ، جهت قرارگیری الیاف با محور عضو و . . . را انتخاب می کنیم ، سپس خواص مواد چون بتن ، فولاد و FRP را تعریف می کنیم پس از آن هندسه و ابعاد تیر رابه صورت 1/4 تیر آزمایشگاهی به دلیل تقارن را با ابعاد و سطوح تعریف کرده و پس از تخصیص نوع المان ، ثابت حقیقی و مشخصه ماده کاربردی برای هر بخش اقدام به شبکه بندی می کنیم و درمش بندی بایستی توجه داشت برای دقت مناسب در حل غیر خطی نسبت ابعاد هر مکعب مش 2 تا 3 بوده و زیر محل اعمال بار متمرکز و روی تکیه گاه از شبکه بندی ریزتر مطابق شکل نسبت به سایر نواحی استفاده کرده و پس از اعمال شرایط مرزی و قیود تکیه گاهی با در نظر گرفتن تقارن ، معیار همگرایی که در اینجا تغییر مکان بوده است و گامهای بارگذاری و زیر گامها را انتخاب می کنیم در

نهایت اقدام به حل مسأله غیر خطی ماده با بارگذاری استاتیکی منوتونیک می کنیم .

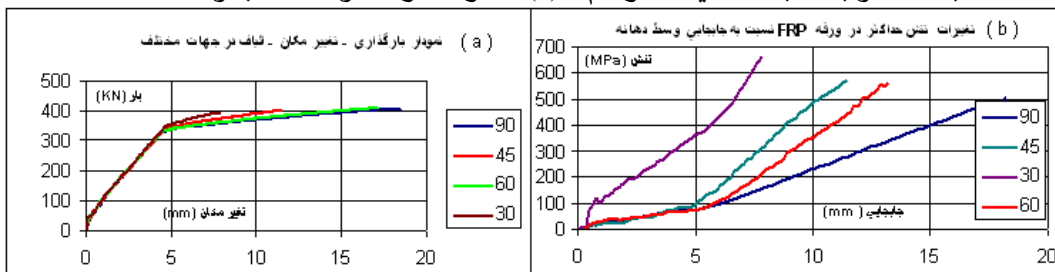


شکل 2- هندسه مدل در برنامه ANSYS و اعمال شرایط مرزی با در نظر گیری تقارن

#### 4- بررسی پارامترهای مؤثر در تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP

4-1. بررسی تأثیر جهت قرارگیری الیاف ورقه FRP نسبت به محور عضو تیر

با مشاهده شکل 3 به این نتیجه می رسیم هر چه جهت فیبر تقویتی به سمت محور تیر و افق تمایل پیدا کرده ترکهای برشی بیشتر شده و به سمت گسیختگی برشی تمایل پیدا می کند و استفاده از یک لایه افقی صفر درجه جلوی گسترش ترکهای برشی را می گیرد از اینرو همانطوری که خواهید دید بار نهایی در این حالت افزایش می یابد. از طرفی با مشاهده شکل 3- متوجه می شویم که روند افزایش تنش درون ورقه FRP با تمایل جهت الیاف به سمت افق در راستای اصلی سریعترافزایش می یابد لذا گسیختگی درون ورقه FRP زودتر رخ داده و شکست در این حالت با توجه به دیاگرام (a) تردتر خواهد بود .



شکل 3- (a) دیاگرام بار- تغییر مکان تیر تقویت شده با ورقه FRP (b) تغییرات تنش حداکثر در ورقه FRP نسبت به جابجایی وسط دهانه و جهت اصلی الیاف در راستاهای مختلف با محور تیر

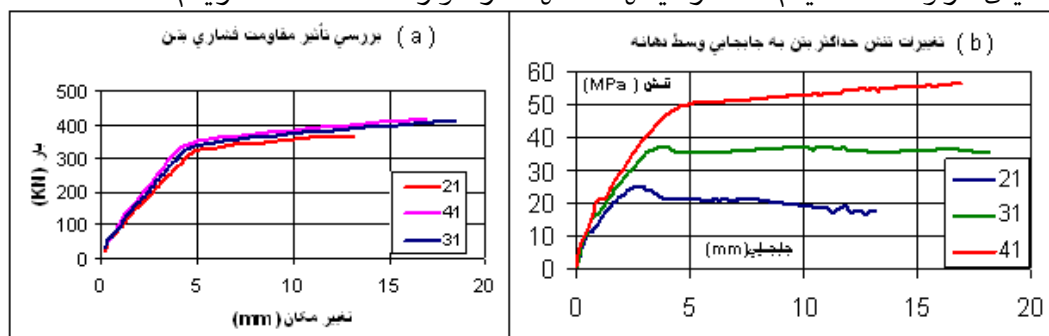
4-2. بررسی تأثیر مقاومت فشاری در تقویت برشی با ورقه FRP :

همانطور که می دانیم مقاومت فشاری تیر بتن آرمه 31 MPa بوده و آن را به 21 MPa و 41 MPa تغییر داده و تأثیر آن را در تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP بررسی می کنیم و طبق بخش اول با بررسی که انجام شد ، وقتی جهت الیاف ورقه FRP 90 درجه و در راستای عمود بر محور تیر بوده بیشترین تقویت را داشته ، لذا در همه موارد جهت الیاف را ثابت نگه داشته و تک تک پارامترها چون مقاومت فشاری بتن ، مقدار آرماتور طولی ، مقدار و فاصله آرماتور عرضی ، نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر را جداگانه تغییر داده و تأثیر آنها را در تقویت برشی بررسی می کنیم .

**جدول 1- مقایسه برای حالات مختلف مقاومت فشاری بتن**

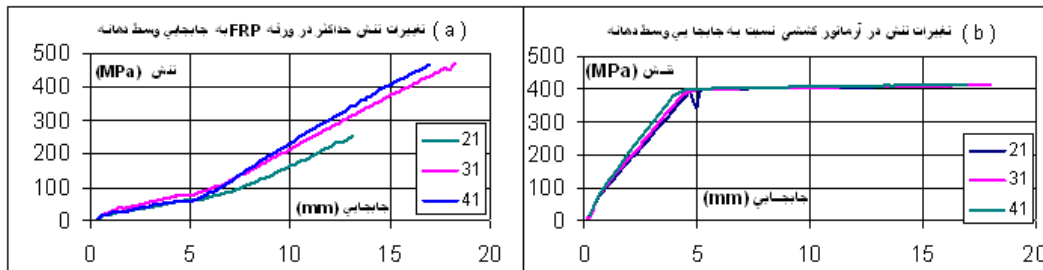
مقاومت فشاری بتن (MPa)	مدول الاستیسیته بتن (MPa)	مدول گسیختگی (MPa)	تغییر مکان نهایی وسط دهانه (mm)	بار نهایی در تیر کشش	بار نهایی در حالت تقویت (KN)		درصد تقویت
					روابط	ANSYS	
21	20500	2.9	13.1	318	348	365	15
31	25000	3.5	18.4	361	381	407	13
41	28750	4	16.9	371	409	416	12

با توجه به دیاگرامهای شکل 4 و 5 می بینیم که افزایش اندک مقاومت فشاری بتن ، خردشدگی نهایی را به تأخیر انداخته لذا مقاومت نهایی افزایش می یابد اما با مقایسه ای که با تیر کنترل و تقویت نشده هر یک از نمونه ها انجام شد طبق جدول می بینیم که در حالت مقاومت فشاری بتن کمتر بیشترین درصد تقویت را ورقه FRP داشته است به دلیل این که طبق روند تغییرات تنش در ورقه FRP در نمونه با مقاومت فشاری بتن ابتدا نرخ افزایش به صورت ملایم افزایش یافته و آرماتور کششی آن نیز زودتر تسلیم شده سپس روند افزایش تنش به شدت افزایش می یابد ، بنابراین می توان گفت در نمونه با مقاومت فشاری بتن کمتر بیشترین درصد تقویت را به دلیل روند ملایم افزایش تنش در ورقه FRP داریم .



**شکل 4- دیگرام بار- تغییر مکان وسط دهانه برای حالات مختلف مقاومت فشاری**

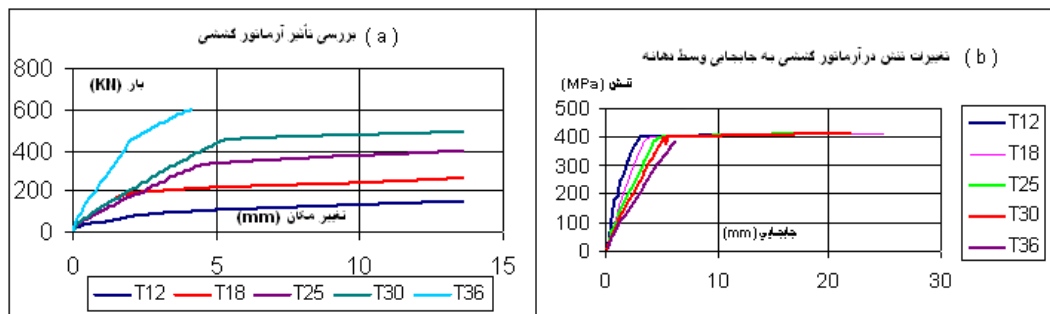
2- تغییرات تنش حداکثر بتن به جابجایی وسط دهانه



**شکل 5- a** - دیگرام تنش حداکثر در ورقه FRP به جابجایی وسط دهانه

**b** - دیگرام تنش در آرماتور کششی نسبت به جابجایی وسط دهانه  
**4-3** . بررسی تأثیر آرماتور طولی کششی در تقویت برشی با ورقه FRP

با توجه به دیگرامهای فوق و جدول زیر به این نتیجه می رسیم که با افزایش قطر آرماتور طولی کششی نقش ورقه FRP در تقویت کاهش می یابد و تسلیم در آرماتور کششی نیز دیرتر رخ می دهد ( انحنای مربوط به زمان تسلیم بیشتر شده و شکل پذیری کمتر می گردد ) دلیل آن را با تغییر مد شکست برشی به مد خمشی می توان توجیه کرد به بیانی دیگر با تقویتی که انجام دادیم انتظار شکست در مد خمشی را داریم و با افزایش قطر آرماتور در این حالت شکل پذیری کمتر می گردد و تغییر شکل لحظه نهایی کمتر می گردد در حالی که در مورد  $\phi 36$  حتی آرماتور کششی تسلیم نشده و شکست ترد داریم بنابراین انتظار داریم در حالت آرماتور کششی با سطح مقطع بیشتر کمترین تقویت را با ورقه FRP داریم



**شکل 6- a** - دیگرام بار- تغییر مکان وسط دهانه برای مقادیر آرماتور طولی کششی

**b** - دیگرام تغییرات تنش در آرماتور کششی به جابجایی وسط دهانه

**جدول 2- مقایسه برای حالات مختلف آرماتور کششی**

آرماتور کششی	نسبت آرماتور کششی	تنش در آرماتور فشاری تیر تقویت شده (MPa)	سهم در FRP بار نهایی	تغییر مکان نهایی mm	ممان	بار نهایی	ممان	بار نهایی	درصد تقویت	
					KN-m	KN	KN-m	KN		
قطر	سطح مقطع mm <sup>2</sup>	$\rho$			تیر کنترل		تیر تقویت شده			
2 $\phi$ 12	226.2	0.0031	137.5	25	13.6	53	116	70.5	154	33
2 $\phi$ 18	509	0.007	322	20	24.8	101	221	127	277	25
2 $\phi$ 25	981.8	0.0136	389	11	18.4	165	361	186	407	13
2 $\phi$ 30	1413.8	0.0195	Yield	10	21.8	224	489	249	545	11
2 $\phi$ 36	2035.8	0.0281	Yield	7.5	6.25	254	555	274	600	8

$\rho_{max} = 0.75\rho_g = 0.0234$      $\rho' = 0.00175$      $\bar{\rho}_{max} = \rho_{max} + \rho' = 0.02515$      $\bar{\rho}_{min} = 0.0211$   
**4-4. بررسی تأثیر آرماتور طولی فشاری در تقویت برشی با ورقه FRP**

**جدول 3- مقایسه برای حالات مختلف آرماتور فشاری**

آرماتور فشاری	نسبت آرماتور فشاری	تنش در آرماتور فشاری تیر تقویت شده (MPa)	$\bar{\rho}_{min}$	$\bar{\rho}_{max}$	سهم در FRP بار نهایی	تغییر مکان نهایی mm	ممان	بار نهایی	ممان	بار نهایی	درصد تقویت
							KN-m	KN	KN-m	KN	
قطر	سطح مقطع mm <sup>2</sup>	$\rho'$					تیر کنترل		تیر تقویت شده		
0	0	0	0.0193	0.0234	9	15.25	162	354	180	393	11
2 $\phi$ 9	127.2	0.00175	389	0.0211	0.0252	11	165	361	186	407	13
2 $\phi$ 12	226.2	0.0031	400	0.0224	0.0265	14	158	348	182	397	14
2 $\phi$ 16	402.2	0.0056	313	0.0249	0.0289	13	150	340	178	390	15
2 $\phi$ 20	628.4	0.0087	249	0.028	0.032	15	145	337	181	395	17
2 $\phi$ 25	981.8	0.0136	163	0.0329	0.0369	15	137	329	178	388	18

در مورد تأثیر آرماتور فشاری نتیجه ای معکوس می گیریم به عبارت دیگر با تغییر مد شکستی که از برش به خمش داشتیم با افزایش سطح مقطع آرماتور فشاری شکل پذیری نیز افزایش می یابد بنابراین انتظار درصد تقویت بیشتر با ورقه FRP را نیز داریم به بیان دیگر چون شکل پذیری افزایش می یابد تغییر شکل نهایی تیر افزایش یافته و روند افزایش تنش درون ورقه FRP ملایمتر افزایش می یابد.

**4-5. بررسی تأثیر آرماتور عرضی در تقویت برشی با ورقه FRP**

**جدول 4- مقایسه برای مقادیر فواصل مختلف آرماتور عرضی**

آرماتور عرضی (خاموت)	@15cm		@30 cm		@45 cm	
	جابجایی mm	بار نهایی KN	جابجایی mm	بار نهایی KN	جابجایی mm	بار نهایی KN
$\phi$ 6	22.8	424	24.1	423	26.3	430
$\phi$ 9	16	406	18.4	407	19.5	409

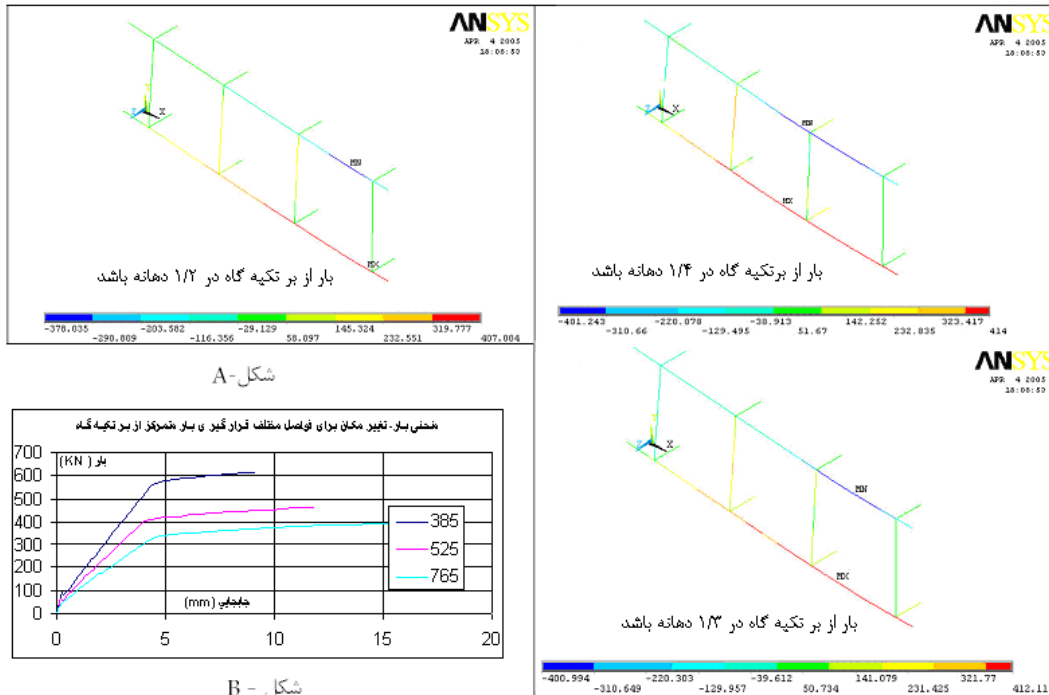
ϕ12	15.9	404	18.3	418	15.2	398
-----	------	-----	------	-----	------	-----

بین تقویت ورقه FRP و مقدار و فاصله آرماتور برشی اندرکنش و تأثیر متقابل پیچیده ای وجود دارد ولی در کل می توان گفت هرچه نقش آرماتور برشی داخلی در تقویت برشی تیر افزایش می یابد (فواصل خاموتها از هم کمتر و مقدار توصیه شده در آیین نامه را رعایت کند) نقش ورقه FRP در تقویت برشی کاهش می یابد و این طور می توان توجیه کرد که بعد از ظهور ترکهای برشی ورقه FRP بیشتر از آرماتورهای عرضی یا خاموت در جلوگیری از گسترش ترکها نقش دارند و روند افزایش کرنش درون ورقه FRP به سرعت تغییرات کرنش در آرماتور برشی افزایش نمی یابد و به بیان دیگر می توان گفت استفاده از ورقه FRP در تقویت برشی زمانی کارایی مناسب را خواهد داشت که تیر بتن آرمه واقعاً در برش ضعیف بیشتری داشته باشد و با افزایش تأثیر آرماتور برشی نقش ورقه FRP در تقویت برشی تیر بتن آرمه کاهش می یابد.

#### 4-6. بررسی تأثیر نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تقویت برشی

##### با ورقه FRP

همانطور که می دانیم تیر کنترل با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی که انجام شد به صورت ترد می شکنند که با نزدیک کردن بار به تکیه گاه و کاهش نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر احتمال شکست ترد برشی افزایش می یابد، اما با بکار بردن ورقه FRP جلوی این ترد شکنی برشی را گرفته و مد شکست از حالت برشی به خمشی تغییر می کنیم لذا با توجه به این که ظرفیت خمشی مقطع ثابت بوده و در این حالت صرفاً محل اعمال بار متمرکز را تغییر داده ایم لذا با کاهش بازوی لنگر، مقدار بار افزایش می دهیم پس با نزدیک شدن بار به تکیه گاه در تیر تقویتی بار نهایی افزایش می یابد از سوی دیگر بر اثر ثابت بودن انرژی مقطع با افزایش بار نهایی تغییر شکل نهایی کاهش می یابد و بالعکس (توجه به شکل B-7)



**شکل 7- B** - منحنی بار- تغییر مکان برای فواصل مختلف بار متمرکز از بر تکیه گاه در لحظه گسیختگی

- A** - کانتورتنش در آرماتورهای طولی و عرضی در لحظه گسیختگی
- 765 مربوط به بار در 1/2 دهانه از بر تکیه گاه -525
  - مربوط به بار در 1/3 از بر تکیه گاه
  - 385 مربوط به بار در 1/4 از بر تکیه گاه

## 5. نتیجه گیری :

- 1- تنش درون ورقه FRP همواره یکنواخت بوده تا زمانی که ترکهای بزرگ در بتن رخ می دهد و به صورت موضعی بتن خرد شده و تسلیم آرماتور کششی رخ داده و توزیع یکنواخت تنشها به هم می خورد و گرادیان تغییرات تنش درون ورقه FRP به شدت افزایش می یابد
- 2- استفاده از یک لایه اضافی با الیاف افقی صفر درجه در راستای محور تیر تأثیر محسوسی در افزایش مقاومت برشی داشته و جلوی باز شدن و گسترش ترکها به خصوص ترکهای برشی را می گیرد
- 3- هرچه جهت اصلی الیاف ورقه FRP در راستای قائم و تقویت برشی باشد روند افزایش تنش درون ورقه FRP به کندی و ملایمتر افزایش یافته و تقویت بیشتری با ورقه FRP انجام شده است
- 4- روابط ارائه شده برای تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به طور محافظه کارانه قابل قبول هستند و با مقایسه نتایج برنامه ANSYS صحت و اعتبار آنها تأیید می شود .

- 5- با افزایش مقاومت فشاری بتن روند افزایش تنش درون ورقه FRP ملایمتر افزایش یافته و می توان انتظار تقویت بیشتری با ورقه FRP داشته باشیم
- 6- با افزایش سطح مقطع آرماتور طولی کششی نقش ورقه FRP در تقویت برشی تیر بتن آرمه کاهش می یابد
- 7- با افزایش مقدار آرماتور طولی فشاری بر عکس آرماتور کششی نقش ورقه FRP در تقویت برشی تیر بتن آرمه نیز افزایش می یابد
- 8- با افزایش تأثیر آرماتور عرضی در تقویت برشی تیر بتن آرمه نقش ورقه FRP در تقویت کاسته می شود
- 9- با کاهش نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر نقش ورقه FRP در تقویت برشی افزایش می یابد .

## 6. مراجع :

- 1- ایمان الیاسیان - پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشگاه یزد بهار 1384 - " بررسی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به روش اجزای محدود وبه صورت پارامتریک "

- 2-P.Alagusundaramoorthy; I.E. Harik; C.C.Choo "Shear strengthening of R/C beams wrapped with CFRP fabric" Research report KTC-02-14/SPR 200-99-2F; University of Kentucky – August 2002 ; Kentucky Transportation Center
- 3- R.Santhakumar and E.Chandrasekaran; R.Dhanaraj "Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear beams using Carbon Fiber Composites"-eJSE International - Electronic Journal of Structural Engineering-April 2004
- 4-Damian Kuchlakev; Thomas Miller; Solomon Yim; Kasidit Chansawat; Tanrat Postisuk "Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP Laminates " - Final Report SPR316-Oregon department of transportation research group-May 2001
- 5-Ahmed Khalifa; William J.Gold; Antonio Nanni; Abdel Aziz M.I "Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of flexural members-ASCE –Journal of composites for construction, Vol2, No4, Nov 1998 pp.195-203
- 6-Amir Malek, M; Hamid Saadatmanesh "Ultimate shear capacity of reinforced concrete beams strengthened with web-bonded fiber-reinforced plastic plates" ACI Journal, Vol.95, No.4, 1998, pp.391-399
- 7- ANSYS Help-Version6.1

## Genetic algorithm model for shear capacity of RC beams reinforced with externally bonded FRP

مدل الگوریتم ژنتیک برای ظرفیت برشی تیر بتن آرمه با ورقه های خارجی چسبانده شده

FRP

قیود وتابع هدف

Proposed design equation based on GAs model



$$V_{f,exp} = V_{u,exp} - V_{u,base} \quad (1)$$

$$V_n = \left( C_1 \sqrt{f'_c} + C_2 \frac{\rho_l}{a/d} \right) b_w d + \frac{A_v f_{steel} d}{s} + \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} d_f}{s_f} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fe} = C_3 \Gamma_f^{C_4} \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

$$\Gamma_f = \frac{E_f \rho_f}{f'_c{}^{2/3} (a/d)} \quad (4)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b s_f} \quad (5)$$

$$\rho_f = t_f / b.$$

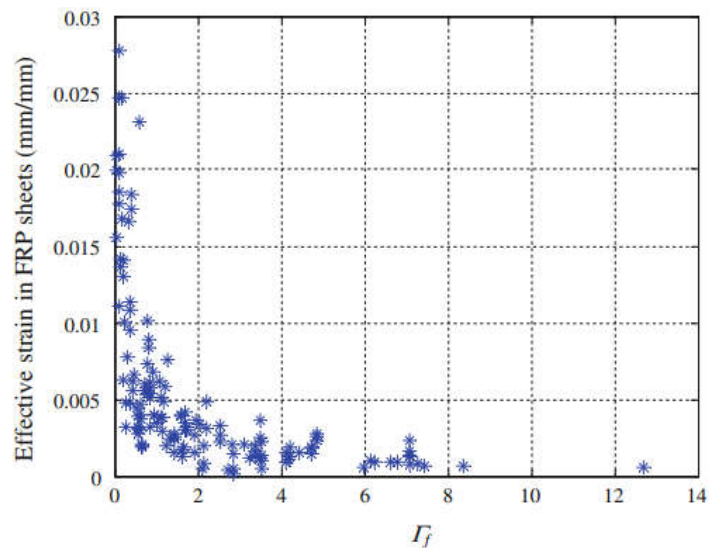
$$f_{steel} = \min(\varepsilon_{fe} E_s; f_y) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{fe} = \frac{V_f s_f}{A_f E_f d_f} \quad (7)$$

**Table 1** Statistical data of design parameters used in experimental database

	$a/d$	$f'_c$	$b_w$	$d$	$\varepsilon_{fu}$	$\Gamma_f$	$V_n$
Minimum	1.1	13.3	64	100	0.0095	0.05	18.75
Maximum	4.0	71.9	600	499	0.0370	12.69	662.00
Average	2.6	39.2	171	254	0.0174	2.16	205.83
COV (%)	25.0	37.0	50.0	46.0	39.4	103.2	77.3

در این مقاله به دنبال بدست آوردن ضرایب C1 to C4 می باشیم  
در شکل 1- کرنش موثر در ورقه FRP ارائه شده است



**Fig. 1** Effective strain in FRP in terms of  $\Gamma_f$ , an exponential function fits this data very well

$$AAE = \frac{1}{n} \sum \frac{|V_{exp} - V_{cal}|}{V_{cal}} \times 100 \quad (8)$$

Average absolute error(AAE)

**Table 2** Parameters used in GAs model setting

Parameter	Setting
Variable format	Real value
Number of variables	4
Max. number of generations	4,000
Selection method	Stochastic universal sampling
Selection pressure	1.7
Recombination method	Extended line
Recombination rate	0.5
Mutation rate	0.005

پارامترهای مدل الگوریتم ژنتیک

**Table 3**  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  and  $C_4$  coefficients estimated by the GA model

Coefficient	FRP type	Two or three sides bonded	Completely wrapped
$C_1$	CFRP	0.24	0.28
	GFRP	0.20	0.26
	AFRP	–	0.23
$C_2$	CFRP	12	14
	GFRP	11	12
	AFRP	–	15
$C_3$	CFRP	0.23	0.32
	GFRP	0.15	0.27
	AFRP	–	0.15
$C_4$	CFRP	0.66	0.17
	GFRP	0.92	0.39
	AFRP	–	0.44

–, No sufficient data were available for two or three sides AFRP bonded concrete beams in shear testing

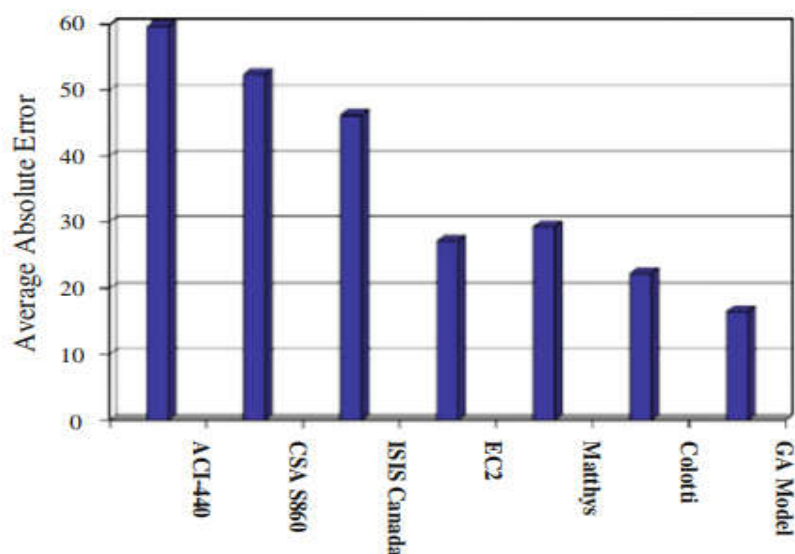
پارامترهای  $C_1$  to  $C_4$  بامدل الگوریتم ژنتیک تخمین شده اند

**Table 4** Performance of shear design equations

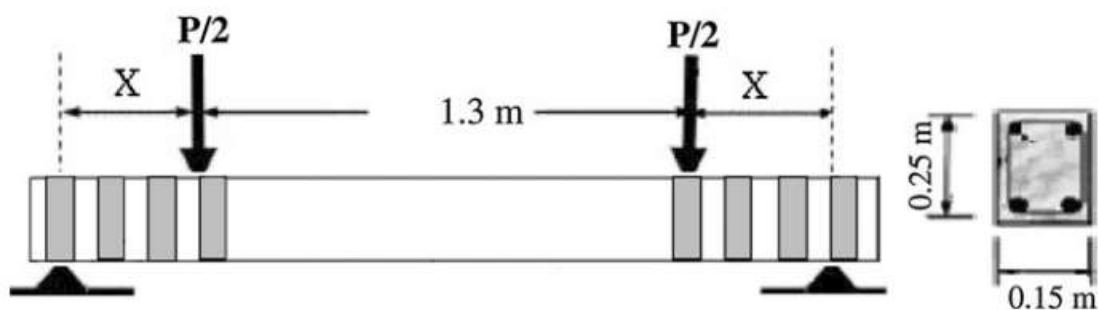
Method	AAE (%)	$V_{exp}/V_{cal}$		
		Average	SD	COV (%)
ACI-440. 2R-02	59.8	1.62	0.52	33.0
CSA S806-02	52.5	1.56	0.43	27.0
ISIS Canada	46.3	1.43	0.38	27.0
Eurocode (EC2)	27.2	0.91	0.20	22.4
Matthys	29.3	0.94	0.24	26.2
Colotti	22.3	1.08	0.18	17.0
Proposed equation	16.5	1.00	0.15	15.0

مقایسه آیین نامه های مختلف طراحی برشی

مقایسه خطای مطلق متوسط براساس آیین نامه های مختلف طراحی



**Fig. 2** Average absolute error for shear capacity predictions of RC beams reinforced with externally bonded FRP by design provisions (ACI 440, CSA S860, ISIS Canada and EC2) and empirical models (Matthys, Colotti and GA)

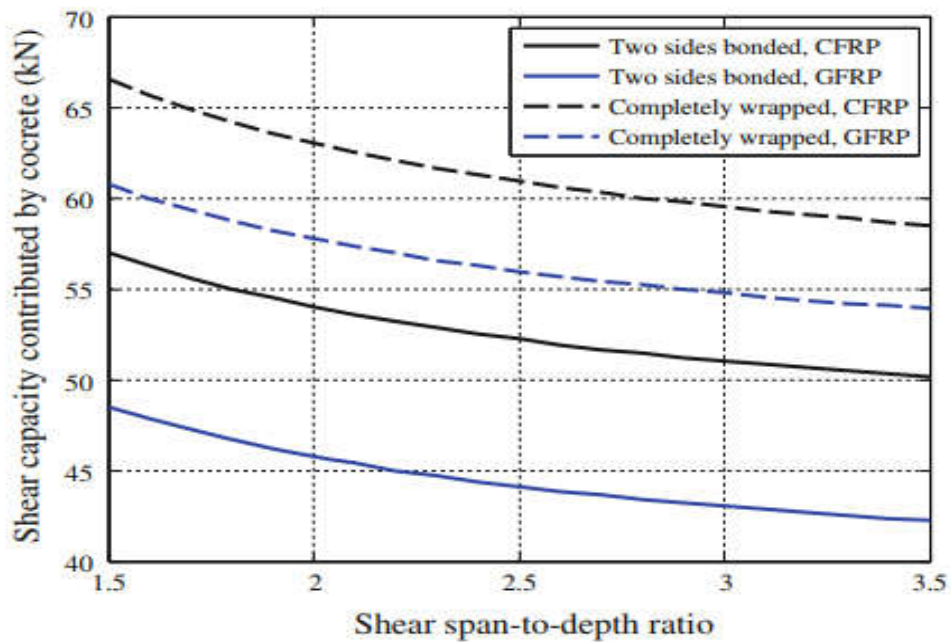


**Fig. 3** Geometrical characteristics of the selected beam

**Table 5** Properties of FRP sheets selected to investigate the effect of shear span-to-depth ratio

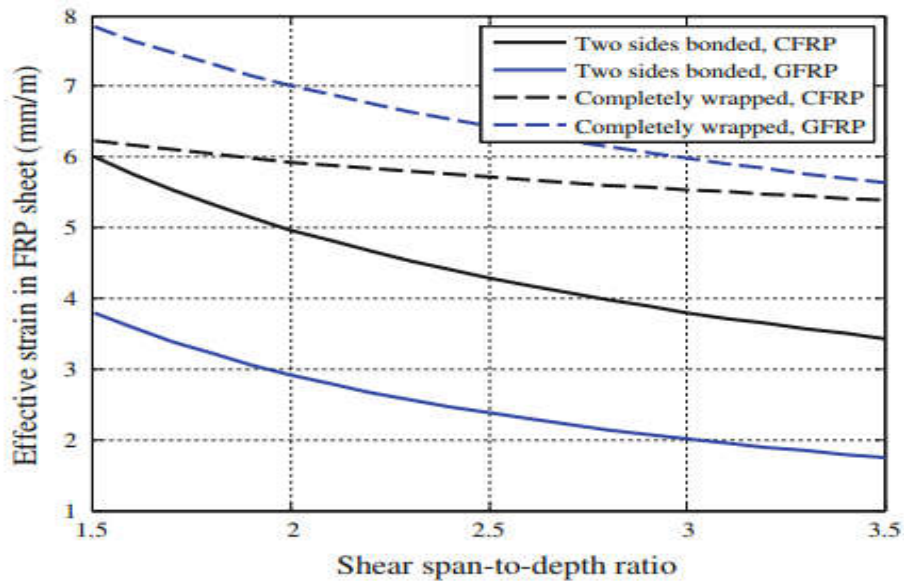
Material	Thickness $t_f$ (mm)	Major modulus of elasticity $E_f$ (MPa)	Design rupture strain $\varepsilon_{fu}$ (mm/mm)
CFRP	0.10	90	0.015
GFRP	0.25	20	0.020

مشخصات ورقه های FRP برای بررسی تاثیر نسبت دهانه به عمق برشی



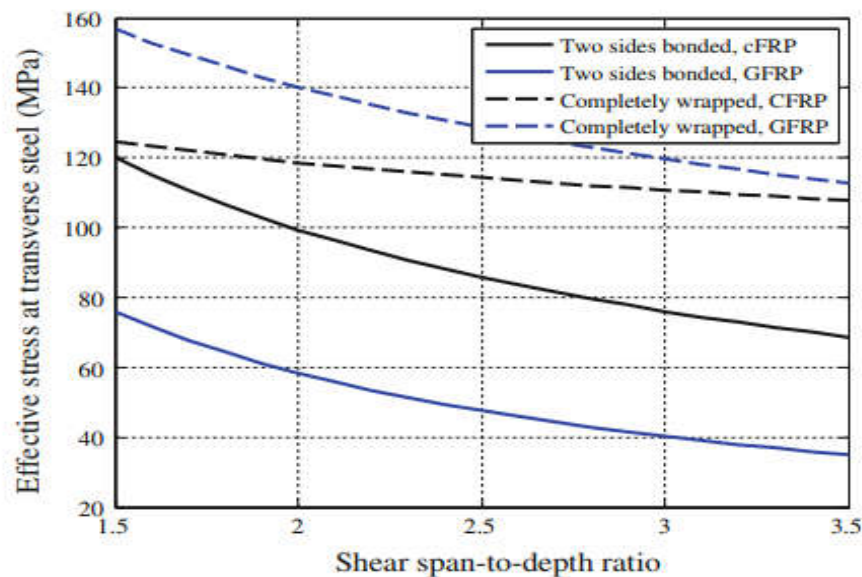
**Fig. 4** Effect of shear span-to-depth ratio on shear capacity provided by concrete

ظرفیت برشی بتن



**Fig. 5** Effect of shear span-to-depth ratio on effective ultimate strain in FRP sheets

کرنش در ورقه FRP



**Fig. 6** Effect of shear span-to-depth ratio on effective ultimate stress in transverse steel

تنش نهایی در میلگرد برشی

**Table 6** Performance of shear design equations for new independent set of 21 RC beams

Method	AAE (%)	$V_{exp}/V_{cal}$		
		Average	SD	COV (%)
ACI-440, 2R-02	58.6	1.64	0.49	29.9
CSA S806-02	55.3	1.59	0.45	28.3
ISIS Canada	52.2	1.53	0.39	25.5
Eurocode (EC2)	24.2	0.92	0.21	22.8
Matthys	23.3	0.94	0.25	26.6
Colotti	22.7	1.06	0.19	17.9
Proposed equation	18.9	1.05	0.17	16.1

مقایسه معادلات طراحی برشی برای 21 نمونه مستقل

### نتیجه گیری

1- الگوریتم ژنتیک ابزاری موثر برای معادلات بهینه سازی در طراحی برشی تیر بتن آرمه با ورقه چسبانده شده FRP می باشد 2- تنش در خاموتهای برشی کمتر از تنش تسلیم می باشد 3- در آیین نامه ACI440 تاثیر نسبت دهانه به عمق برش روی کرنش برشی موثر ورقه FRP در نظر نگرفته و فرض بر رابطه خطی بین ضخامت ورقه FRP و ظرفیت برشی درست نمی باشد و فاکتور

اصلاح k2 برمنای آیین نامه ACI منفی شده است که معنای فیزیکی ندارد 4- در مدل Matthy نسبت دهانه به عمق برشی روی کرنش موثر ورقه FRP لحاظ شده است و مکانیزم اندرکنش بتن ، میلگرد و ورقه CFRP در نظر گرفته نشده است 5- مدل colotti کاربرد ساده دارد 6- مدل دورپیچ کامل در تقویت برشی به دلیل لحاظ نمودن تاثیرات محصور شدگی و قفل و بست دانه های بتن نسبت به سایر روشهای تقویت موثرتر میباشد و CFRP ظرفیت برشی بهتری نسبت به GFRP و AFRP دارد 7- در تیر بتن آرمه هرچه نسبت دهانه به عمق برشی کمتر باشد احتمال پارگی و گسیختگی ورقه FRP بیشتر است و بتن و میلگرد برشی بیشتر در ظرفیت برشی مشارکت دارد

امروزه استفاده از مصالح کامپوزیت پلیمری در صنعت ساخت و ساز به دلیل وزن سبک، نصب آسان، مقاومت بالا (5 برابر فولاد)، تنوع در محصول و کاربرد، مقاومت در برابر خوردگی و دوام بالا بسیار متداول شده است. استفاده از این مصالح بصورت پس کشیده علاوه بر موارد فوق افزایش مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و برشی و سختی المان سازه ای را به همراه خواهد داشت. تکنیک های پس کششی FRP عمر بهره برداری المان سازه ای و ظرفیت کرنش نهایی آن را افزایش داده و ضریب ایمنی در مقابل مدهای گسیختگی را بالا می برد. نیروهای پس کشی توسط تاندون های پس کشیده استاندارد یا میلگردهای مقاومت بالا تامین می شود.

## مراحل اجرای سیستم پس کششی FRP :

- در صورت ناصاف بودن سطوح قبل از اجرای پس کشی باید سطح صاف و آماده شود تا از توزیع یکنواخت نیروهای پس کشی در مقطع عضو اطمینان حاصل شود.
- ترک های موجود با تزریق اپوکسی یا روش های دیگر برطرف شود.
- تاندون ها در نقاط مهاری (معمولا انتهای عضو) نصب شوند.



## سیستم های پیش تنیده مقاوم سازی با FRP

در حالت کلی، تنها بخشی از مقاومت کششی ورق های FRP در حالت غیر پیش تنیدگی مورد استفاده قرار می گیرد. با القای پیش تنیدگی به ورق های FRP می توان به شکل بهتری از ظرفیت این ورق ها استفاده نمود. در واقع پیش تنیدگی مزایایی چون دوام عالی، بهبود سرویس دهی و ظرفیت نهایی را با هم ترکیب می کند. با استفاده از پیش تنیدگی در عین حال که ظرفیت باربری مقطع افزایش پیدا می کند، شکل پذیری آن نیز افزایش می یابد.

### مزایای استفاده از FRP پیش تنیده

- افزایش قابلیت سرویس دهی سازه و کاهش تغییر شکل ها
- موثر در کاهش عرض ترک و تاخیر در ایجاد ترک ها
- از بین بردن کرنش های داخلی آرماتور
- افزایش مقاومت در برابر شکست ناشی از خستگی
- جاری شدن میلگرد های داخلی در نیرو های بالاتر
- کاهش تنش های ناشی از بار های مرده و زنده بر روی سازه
- افزایش ظرفیت نهایی مقطع
- افزایش ظرفیت برشی به وسیله افزایش تنش های طولی پیش تنیدگی

### روش ایجاد پیش تنیدگی در ورق های FRP

- روش سیستم های تیر منحنی (Cambered Beam System)
- روش سیستم های کشش برخلاف تیر مستقل (Tensioning Against an Independent Beam System)
- روش سیستم های کشش بر خلاف تیر اصلی (Tension Against the Strengthened Beam)



سیستم FRP پیش تنیده

محدودیت های پیش تنیدگی و تنش لایه لایه شدن بتن



ورق های پیش تنیده با نیروی زیاد تمایل به ایجاد تنش برشی بالا در ابتدا و انتهای ورق FRP را دارند. این تنش برشی میتواند منجر به از بین رفتن کاور بتن حتی در تنش های پیش تنیدگی پایین گردد. برای جلوگیری از چنین اتفاقی، مباحثات اقدامات لازم در زمان طراحی مورد توجه قرار گیرد. مقاومت برشی بتن را می توان با تقویت عرضی بتن بهبود داد. هم چنین اضافه کردن **انکر** در انتهای ورق FRP نیز میتواند تغییر شکل برشی را کاهش دهد.

### روش سیستم های تیر منحنی

در این روش ورق های FRP به صورت غیر مستقیم و با بالابردن و خم کردن تیر اصلی با استفاده از جک های هیدرولیک در وسط دهانه تیر، پیش تنیده می گردند. در این روش تیر در حالت تغییر شکل داده شده، به وسیله جک ها نگهداری می شود. سپس ورق های FRP به سطح زیرین تیر چسبانده می شود و در نهایت زمانی که ماده اپوکسی کاملا عمل آوری شد، جک ها برداشته می شوند. در این روش پیش تنیدگی پس از برداشتن جک ها و فقط در سطح پایین تیر صورت می پذیرد. عیب این روش آن است که سبب استفاده ناکارآمد از مصالح گردیده و می تواند منجر به آسیب به بتن گردد.

### روش سیستم های کشش برخلاف تیر مستقل

این روش که مراحل آن در شکل زیر نمایش داده شده است، شامل کشش ورق های FRP بر خلاف یک سیستم و تیری مستقل از تیر اصلی که می خواهیم آن را تقویت نماییم است. در این روش دو انتهای ورق FRP به ورق های فولادی بسته شده و توسط جک هایی بر روی یک تخت تنش و برخلاف عکس العمل چهارچوب فولادی کشیده می شود (مستقل از تیر اصلی). در حالی که ورق FRP کشیده شده است، سطح پایینی تیر و سطح بالایی ورق FRP که بر روی تخت تنش قرار دارد، به یکدیگر متصل شده و به وسیله چسب اپوکسی به یکدیگر می چسبند. وقتی که چسب اپوکسی کاملا عمل آوری شد، سیستم پیش تنیدگی آزاد می گردد و نیروی پیش تنیدگی به تیر بتنی منتقل می گردد و سپس دو سر ابتدا و انتهای ورق FRP که به وسیله ورق های فولادی نگهداری می شد، بریده می شود. این روش در مقیاس آزمایشگاهی و برای تیر های کوچک بسیار مناسب بوده اما برای استفاده و کاربرد در مقیاس بزرگ و تیر های واقعی، نیاز به تجهیزات ویژه دارد.

### روش سیستم های کشش بر خلاف تیر اصلی

این روش انکر های مجزایی به تیر بتنی متصل می شوند، ورق های FRP پیش تنیده به صورت مستقیم کشیده شده و به انکر های روی تیر متصل می گردد. لیزومو رفتار تیر T شکل را که به وسیله صفحه FRP از جنس کربن پیش تنیده شده بود را بررسی نمود. نتایج نشان داد که با پیش تنیده کردن ورق های FRP به این روش و با نیروی پیشتنیدگی 23 درصد ظرفیت نهایی کششی FRP از جنس کربن، می توان مقاومت خمشی تیر را تا 11 درصد بهبود داد.

تحقیقات دیگر بسیار زیاد و متنوعی در این زمینه انجام شده است که نشان می دهد استفاده از این روش برای تقویت تیر های بتنی به وسیله FRP های پیش تنیده، سبب افزایش کارایی و مقاومت تیر می گردد.

### مقایسه روش های پیش تنیدگی در کاربرد های عملی و میدانی

از بین سه روش اشاره شده در این گزارش، باید گفت که هر روش مزایا و معایب مربوط به خود را دارد. وقتی که ورقه FRP برخلاف تیر اصلی یا برخلاف یک تیر خارجی کشیده میشود، یک سطح قابل قبولی از پیش تنیدگی را در خود ایجاد می نماید. مزیت کشیده شدن بر خلاف تیر اصلی این است که نیاز به تجهیزات سبک دارد و این روش را میتوان در بسیاری از موقعیت ها از جمله محل هایی که دسترسی به سازه با محدودیت مواجه است، به کار برد. مزیت پیش تنیدگی بر خلاف تیر خارجی این است که انکر های پیش تنیدگی در این روش سبب ایجاد ناهمواری روی تیر نمیگردد و در عین حال این روش به نیروی کار کمتری برای اجرا و پیاده سازی نیازمند است. باید به این موضوع نیز

توجه داشت که استفاده از FRP پیش تنیده مستقل از نوع روش مورد استفاده برای پیش تنیدگی به نیروی کار بیشتری نیاز است. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از **کامپوزیت های FRP** در مقاوم سازی، بهسازی و ترمیم سازه ها نحوه اجرای این مصالح نیز مورد توجه قرار گرفته است. دو شیوه مطرح در اجرای کامپوزیت های FRP روش تسلیح با اتصال خارجی EBR و روش NSM است که بر اساس ایده کار گذاشتن مصالح مقاوم کننده در شیارهای تعبیه شده در سطح شکل گرفته است. با گسترش علم و صنعت **مقاوم سازی** مشخص شد که روش رایج EBR دارای کاستی هایی مثل جدا شدن ورق FRP، نداشتن مقاومت و عملکرد مناسب در مقابل حرارت است. بنابراین روش نصب در نزدیک سطح NSM مورد قبول واقع شد. مبنای روش NSM قرار دادن میله یا ورقه های FRP در شیارهای تعبیه شده در سطح بتن و ایجاد پیوستگی لازم با اپوکسی است.

**تقویت تیر بتن آرمه** با استفاده از میله دست ساز FRP به روش نصب در نزدیک سطح ( NSM (Near Surface Mounted از طریق مدفون ساختن کامپوزیت FRP در داخل عضو بتنی با هدف کاهش اثرات محیطی و کنترل پدیده جدایشی صورت می گیرد. در سالیان اخیر پژوهش های زیادی بر روی توسعه و کاربرد آرماتورهای FRP در روش NSM صورت گرفته است. با این حال این شیوه به دلایل مختلفی به اندازه ی روش EBR مورد توجه مجریان FRP و پیمانکاران FRP قرار نگرفته است؛ که از جمله ی این دلایل می توان به **قیمت بالاتر آرماتورهای FRP** نسبت به نوع ورقه ای آن و فراوانی بیش تر پوشش های FRP در کشور ایران اشاره نمود. اخیراً استفاده از یک نوع آرماتور دست ساز که از چسباندن ورقه های FRP حول یک میله ی چوبی به دست می آید در تقویت برشی سازه ها به روش NSM گزارش شده است. این میله ها که روش ساخت ساده ای نیز دارند امکان تعبیه ی نوعی سیستم های مهاری بر روی آن ها فراهم می باشد که می تواند پدیده ی جدایشی را به تعویق بیندازد.

همانگونه که اشاره شد، روش مرسوم **تقویت تیرهای بتن آرمه با FRP، روش تسلیح با اتصال خارجی (EBR)** می باشد. در این روش به علت جدایشی پیش از موعد ورقه FRP امکان استفاده ی کامل از **ظرفیت کششی مصالح FRP** وجود ندارد. برای برطرف کردن این نقیصه، اصلاحاتی بر روی این روش صورت گرفته است که منجر به پیدایش روش های کارآمدتری نظیر EBROG، EBRIG و MF-EBR شد. این روش ها علی رغم آن که پدیده ی جدایشی ورقه ی FRP از سطح بتن را به تعویق می اندازند و با حتی در بعضی موارد به طور کامل از بین می برند همه دچار یک مشکل اساسی می باشند و آن قرار گرفتن مصالح تقویت در خارج از عضو بتنی است که این سیستم ها را در مقابل تأثیرات ناشی از تغییرات شدید دمایی نظیر چرخه های یخ زدن و ذوب شدن، ضربه، آتش سوزی و حرکات خراب کارانه آسیب پذیر می کند.

برای غلبه بر ضعف های یاد شده، تلاش های متعددی صورت گرفته است که از موفق ترین آن ها می بایست به روش نصب در نزدیک سطح (NSM) اشاره نمود. این روش بر مبنای کار گذاشتن مصالح مقاوم کننده در شیارهایی از پیش تعبیه شده در پوشش اعضای بتنی استوار است و قدمت آن در مورد میله های ضد زنگ فولادی به دهه 1950 بر می گردد. اخیراً موارد جدید دیگری نیز از کاربرد این روش در مورد میله های ضد زنگ فولادی به عنوان مقاوم کننده در تقویت سازه های بنایی و پل های قوسی گزارش شده است.

**استفاده از مصالح FRP** به عنوان مقاوم کننده در روش NSM دارای مزایای متعددی نسبت به فولاد می باشد که از جمله می توان به مقاومت در برابر خوردگی، راحتی و سرعت نصب بالاتر به دلیل وزن کم و کاهش اندازه ی شیارها به دلیل نسبت بالای مقاومت کششی به سطح مقطع در مصالح FRP اشاره نمود.

### 1-1-1- مقایسه روش EBR و NSM

در مقایسه با کاربرد مصالح FRP به روش EBR، روش NSM دارای مزایای زیر می باشد:

- به علت عدم نیاز به عملیات آماده سازی سطحی، حجم عملیات مقاوم سازی کاهش می یابد.
- مسلح کننده های NSM به مراتب کم تر در معرض جدایشی قرار دارند.

- مسلح کننده های NSM را می توان به راحتی در سطوح جنبی قطعات مهار نمود تا مانع از جداشدگی آن ها گردید؛ این مزیت به خصوص در مقاوم سازی خمشی اجزای قاب های خمشی در نواحی لنگر منفی مورد توجه می باشد.
- مسلح کننده های NSM راحت تر پیش تنیده می گردند.
- مسلح کننده های NSM به وسیله پوشش بتنی محافظت شده و در نتیجه کم تر در معرض ضربه ها و آسیب های مکانیکی، آتش سوزی و حرکات خراب کارانه قرار دارند.
- ظاهر سازه پس از مقاوم سازی بدون تغییر می ماند.

## 2-1-1-1-2 مراحل اجرای روش NSM

مراحل انجام روش NSM به این ترتیب است که ابتدا شیاری در راستای مورد نظر در سطح بتن ایجاد می گردد. اندازه ی شیار طوری انتخاب می شود که فضای کافی برای نفوذ چسب به اطراف مقاوم کننده وجود داشته باشد. داخل شیار با فشار متوسط آب یا هوا از ذرات گرد و غبار تمیز شده و سپس شیار تا نیمه از چسب پر می شود. مصالح FRP درون شیار قرار گرفته و برای اطمینان از نفوذ چسب به تمامی فضاهای اطراف آن، به آرامی فشار داده می شود. در انتها شیار با چسب اضافه پر شده و سطح تراز می گردد.

الف) استفاده از [تسمه های FRP](#) در روش NSM

در روش تقویت به روش NSM با تسمه های کربن Strips CFRP، سختی تیر به میزان قابل توجهی افزایش یافته و تغییر شکل ها مشخصاً کم می گردد.

ب) استفاده از میله های FRP در روش NSM

تقویت خمشی تیرها و اعضای بتن آرمه به کمک روش NSM-GFRP bars یکی دیگر از روشهای مقاوم سازی با FRP است. در روش تقویت با استفاده از NSM پارامترهایی نظیر نوع بتن، نوع آرماتورها (GFRP و فولادی) و نوع چسبها تاثیر گذارند. تیرهای مقاوم سازی شده با میله های NSM-GFRP خیز نهایی کم تر و سختی و ظرفیت بیش تری دارند. همچنین باعث افزایش لنگر نهایی در تیرها نسبت به نمونه های بدون تقویت می گردد. در روش تقویت با آرماتورهای NSM-FRP، افزایش اندازه ی شیار برای نمونه های با چسب اپوکسی تأثیر قابل ملاحظه ای بر بار گسیختگی ندارد در حالی که در نمونه های با چسب سیمانی، افزایش اندازه ی شیار موجب کاهش بار گسیختگی می گردد. دلیل این امر، افزایش هر چه بیش تر افت یا Shrinkage در بتن با افزایش اندازه ی شیار می باشد.

تکنیک NSM-CFRP پاسخ بار - تغییر مکان تیرهای خسارت دیده را بهبود می بخشد و سختی و ظرفیت آن ها را افزایش می دهد. همچنین مود شکست حاکم بر همه ی تیرها، شکست بتن فشاری و لایه لایه شدن پوشش بتن در وجه دیگر، بدون جدا شدن میله های CFRP بود.

ج) استفاده از میله های دست ساز MM FRP در روش NSM

استفاده از میله های دست ساز MM FRP – Manually Made Fiber Reinforced Polymers در تقویت خمشی تیرها یکی دیگر از روشهای مقاوم سازی FRP به روش NSM می باشد.

میله های MM FRP از ورقه های FRP پیچیده شده حول یک میله ی چوبی ساخته می شوند. این میله ها نسبت به آرماتورهای FRP معمولی به ازای مقدار الیاف برابر، محیط بزرگتری را فراهم می آورند؛ زیرا هسته ی میله ی MM FRP شامل یک میله ی چوبی کم مقاومت می باشد که محیط پیوستگی بزرگتر و به دنبال آن مقاومت پیوستگی بزرگتری را مهیا می کند. مزیت کلیدی این نوع میله ها این است که اجازه ی ساخت سیستم مهارهایی را می دهند که می توان با استفاده از آن ها عملکرد مسلح کننده های NSM-MM FRP را در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه بهبود بخشید. این مسئله با استفاده از آرماتورهای معمولی FRP به سادگی قابل دست یابی نیست

## 2-1-1-3 روش ساخت میله های MM FRP

روش ساخت این میله‌ها بر مبنای تکنیک چسباندن تر (Wet-Lay Up) می‌باشد که در آن ورقه‌ی الیاف کربن به رزین اپوکسی آغشته شده و حول یک میله‌ی چوبی چسبانده می‌شود. در ابتدا عرض مورد نیاز ورقه‌ی FRP بر مبنای سطح مقطع طراحی، محاسبه می‌شود. طول نوار FRP نیز برابر با طول میله‌ی چوبی می‌باشد که همان طول پیوستگی مورد نیاز است. سپس یک نوار با طول و عرض محاسبه شده از رول FRP بریده می‌شود (شکل الف). با استفاده از رزین اپوکسی میله‌ی چوبی به نوار FRP چسبانده می‌شود (شکل ب). به منظور آسان کردن فرآیند ساخت، یک میله‌ی چوبی دیگر به لبه‌ی دیگر ورقه‌ی FRP چسبانده می‌شود. در مرحله‌ی بعدی نوار FRP به طور یکنواخت به رزین آغشته شده (شکل ج) و به دور میله‌ی FRP پیچانده می‌شود (شکل د). به منظور آسان‌تر کردن فرآیند ساخت میله‌های MM FRP از یک رزین با ویسکوزیته‌ی پایین استفاده می‌شود. پس از آن هر گونه هوای محبوس بین لایه‌های FRP با دست خارج می‌شود (شکل ه) و میله‌های ساخته شده حداقل به مدت پنج روز عمل آوری می‌شوند. در نهایت، میله‌ی چوبی دوم با استفاده از تیغه‌ی برنده جدا می‌شود. حذف میله‌ی چوبی دوم، اندکی از عرض ورقه‌ی FRP می‌کاهد. این امر می‌بایست در محاسبه‌ی عرض ورقه‌ی FRP در نظر گرفته شود.

#### ویژگی‌های مکانیکی میله‌های MMFRP

ویژگی‌های مکانیکی میله‌های MMFRP از طریق تست کششی به روش مشخص شده در بر مبنای استاندارد CSA S806 تعیین می‌گردد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که رابطه‌ی تنش- کرنش میله‌ی MMFRP تا زمان شکست، الاستیک خطی است و مدول الاستیسیته‌ی با مقدار میانگین 225 گیگا پاسکال بر مبنای سطح مقطع اسمی الیاف بدست آمده است.

#### سیستم مهار میله‌های MMFRP

در تقویت خمشی تیرهای بتن‌آرمه، مهار عامل تقویت کننده به منظور کنترل پدیده‌ی جداشدگی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. فرآیند ساخت میله‌های MMFRP به گونه‌ای است که امکان تعبیه‌ی مهارهایی در دو انتهای آن وجود دارد. شکل زیر روش ساخت این مهار را نشان می‌دهد. برای این منظور ابتدا میله‌ی MMFRP با الیاف کربن خشک اضافی در هر دو انتها ساخته می‌شوند. سپس الیاف خشک دو انتها به رزین اپوکسی آغشته شده و دور یک میله‌ی چوبی عمود بر میله‌ی اصلی پیچانده می‌شود.

#### مزایا و معایب تقویت خمشی با تکنیک NSM-MMFRP Rods

مشابه روش به کار رفته در تقویت برشی تیرها با تکنیک NSM-MMFRP، از این میله‌ها و سیستم مهار آن‌ها می‌توان در تقویت خمشی تیرهای بتنی استفاده کرد. تفاوت این شیوه با تکنیک تقویت NSM-FRP در فرآیند ساخت میله‌ی تقویت، تعبیه‌ی سیستم مهار برای آن و ایجاد شیارهای عرضی بر روی تیر به منظور جاسازی سیستم مهار می‌باشد. جدول زیر مزایا و معایب روش NSM-MMFRP Rods را بیان می‌کند:

#### مزایا و معایب تقویت به روش NSM-MMFRP

##### مزایا

امکان تعبیه‌ی سیستم‌های مهار جهت به تعویق انداختن و یا جلوگیری از پدیده‌ی جداشدگی امکان تولید میله‌ها با قطرهای مختلف

امکان تعبیه‌ی آج‌های مختلف بر روی هسته‌ی میله به منظور افزایش مقاومت پیوستگی

هزینه‌ی تمام شده کم‌تر در مقایسه با آرماتورهای رایج FRP به دلیل فراوانی بیش‌تر ورقه‌های FRP محافظت از عامل تقویت‌کننده در مقابل شرایط محیطی از قبیل تغییرات شدید درجه حرارت، خرابکاری، ضربه و محیط‌های شیمیایی به واسطه‌ی مدفون ساختن آن در بتن

امکان استفاده از ظرفیت خمشی هسته علاوه بر ظرفیت الیاف در صورت استفاده از هسته‌های فولادی

##### معایب

فرآیند ساخت زمان بر میله‌ها  
کنترل کیفیت پایین‌تر نسبت به آرماتورهای تولیدی کارخانه  
وجود معضل خوردگی یا پوسیدگی هسته

Sena-Cruz et al کارایی روش‌های تقویت MF-EBR، EBR و NSM را مورد بررسی قرار دادند. این برنامه شامل دو دسته تیر بود که یک دسته تحت بارهای یکنواخت (Monotonic Loading) و دسته‌ی دیگر تحت بارهای خستگی (Fatigue Loading) قرار گرفتند. هر دسته شامل چهار تیر می‌شد: یک تیر مرجع و سه تیر دیگر که هر کدام با یکی از روش‌های مذکور تقویت شده بودند. در تست‌های مونوتونیک، ظرفیت تحمل بار تیرهای تقویت شده به روش‌های EBR، MF-EBR و NSM در مقایسه با تیر مرجع به ترتیب 37، 87 و 86 درصد افزایش یافت. مطلوب‌ترین جنبه روش MF-EBR، شاخص شکل‌پذیری بالای آن در مقایسه با دو روش دیگر می‌باشد. در آزمایش‌های مونوتونیک پس از خستگی، تیر NSM بیش‌ترین افزایش را در بار نهایی ایجاد می‌کند

**FRP Spike** از جمله روش‌های کاربردی در نصب و استفاده از الیاف‌های **FRP** بوده که موجب افزایش قابل‌توجه فشار محوری و چسبندگی بالاتر سطح و فیبر کامپوزیت (FRP) می‌شود. انکرهای کربن از رشته‌های کربن تک‌جهته تشکیل شده‌اند. استفاده از اسپایک و انکر کربن موجب افزایش کارایی فیبر کامپوزیت (FRP) لذا استفاده وسیعی در **مقاوم‌سازی، ترمیم و بهسازی** انواع مختلف سازه‌ها دارد و همچنین ضمن افزایش مقاومت برشی و کششی مطلوب در سازه‌هایی که نیاز به تقویت‌سازی دارند، در مواردی که تغییر کاربری انجام می‌شود نیز کاربرد دارند. از دیگر مزایای انکر کربن می‌توان به جلوگیری از **جداشدگی** و دیباندینگ (debonding) بین الیاف و سطح اشاره نمود

## ویژگی‌ها

- مدول و استحکام کششی بالا
- مقاومت مکانیکی و شیمیایی بالا
- مقاومت مناسب در دمای بالا و پایین
- دارای ویژگی خود عمل‌آوری
- دوام عالی
- وزن سبک
- مقاوم در برابر نیروی الکتروسیسته
- دوره بهره‌برداری طولانی مدت
- نصب و اجرای آسان
- کاهش هزینه‌های تقویت با **FRP**
- پایین آمدن قیمت مقاوم‌سازی سازه

## موارد کاربرد

- افزایش قدرت باربری سازه‌های مختلف
- بهسازی لرزه‌ای سازه و افزایش مقاومت در برابر افزایش بار و یا نیروی زلزله
- کاهش وزن سازه نسبت به سایر روش‌های مقاوم‌سازی
- جهت تقویت الیاف FRP در نواحی انتهایی و نقاط مرزی (نواحی قطع الیاف)
- استفاده در مواردی که امکان جداشدگی الیاف از سطح سازه وجود دارد.
- استفاده در مواردی که نیاز به تعداد بالای لایه‌های الیاف در سازه می‌باشد.
- جهت کاهش مصرف الیاف در مقاوم‌سازی با سیستم‌های FRP

## مشخصات فنی

مقاومت کششی	4900 مگاپاسکال
مدول کششی	230 گیگاپاسکال
رزین های سازگار	Epoxy, Polyester, Phenolic, Polyurethane, Vinylester
دمای نگهداری	40 تا 038

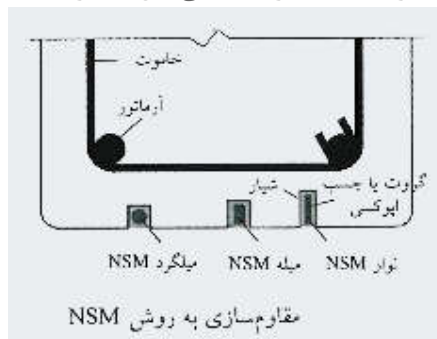
آماده سازی بستر می تواند بر کیفیت عملکرد سیستم تأثیر بسزایی داشته باشد.

- تمام سطوح باید از خاک، گردوغبار، ترکیبات درمان، روغن، گریس، واکس و سایر مواد آلوده تمیز شود.
- در صورت وجود ناهمواری یا آلودگی سطوح نیاز به سنگ زنی، ماسه شویی، شستشوی فشار و یا دیگر روش های مکانیکی معمول دارند.
- برای پاک کردن گردوغبار و گردوخاک باید از پاک کننده صنعتی استفاده کرد.
- توجه داشته باشید که سطوح بتونی باید کاملاً خشک شوند یا خالص شوند تا چسب بتواند خشک شود
- طراحی و محاسبات مربوط به روش Spike و FRP های مورد استفاده بر طبق آئین نامه و مشخصات استاندارد و توسط مهندسین طراح انجام می شود.
- محل مورد نظر جهت اجرای انکرها را با دایره مشخص کرده و سوراخ هایی با قطر 12 میلی متر ایجاد می کنیم. برای اطمینان از فرو رفتن کامل انکرها در داخل سوراخ ها، عمق سوراخ ها را از ارتفاع انکرها 3 میلی متر بزرگ تر در نظر گرفته شده است. پس از آن روی سطح بتن و داخل سوراخ ها با وسیله های موجود باد انداخته، تا گردوغبارها از بین روند و سطح و سوراخ تمیز باشد. از رزین یا انواع دیگر چسب های سازگار با این سیستم جهت اشباع کردن ورق های FRP، سطح بتن و انکرها استفاده می شود. سپس FRP را متصل کرده و اجرای روش به پایان می رسد
- تمام اجزای سیستم FRP کامپوزیت ممکن است باعث تحریک و حساسیت پوست شود لذا استفاده از دستکش های مقاوم در برابر شیمیایی توصیه می شود.
- از تنفس بخارات و گرد و غبار اجتناب کرده و در صورت تنفس دشوار به پزشک مراجعه کنید.
- محصولات رزین می توانند باعث تحریک شدید چشم شوند. از تماس با چشم جلوگیری شده و از عینک ایمنی استفاده شود.
- این روش نباید در هوای سرد و مرطوب اجرا شود

### روش مقاوم سازی به روش Near Surface Mount و یا به اختصار روش NSM

در سال های اخیر پیش تنیده کردن نوارها و تسمه های FRP نیز مورد توجه پروژه های عمرانی قرار گرفته است. پیش تنیده کردن یک عضو باعث بهبود در عملکرد خمشی عضو در محدوده خدمت رسانی می شود. ایجاد پیش تنیدگی باعث کاهش خیز عضو، کاهش ترک ها، افزایش بار ترک خوردگی و افزایش بار تسلیم آرماتورهای کششی می شود. این عمل زمانیکه در پل ها با دهانه بلند بکار گرفته می شود نقش اصلی خود را نشان می دهد. زیرا در این پل ها به علت دهانه بزرگ معمولاً شاه تیرها دچار تغییر شکل زیادی می شوند اما پیش تنیدگی باعث اعمال خیز منفی اولیه به تیر شده و خیز حداکثر آن را کاهش می دهد. مزیت بزرگ دیگر اعمال پیش تنیدگی در پل ها افزایش مقاومت خستگی المان ها می باشد. شاه تیرها و پایه ی پل ها تحت بار متناوب ناشی از عبور و مرور

وسایل نقلیه می باشند که همین امر باعث وقوع خستگی در این اعضا می شود. پیش تنیده کردن این اعضا باعث باربرداری آرماتورهای کششی این اعضا شده و مقاومت خستگی عضو را بطرز چشمگیری بهبود می بخشد. در مواقعی که امکان ایجاد یک شکاف سطحی بر روی سطح بتن وجود داشته باشد، روش مقاوم سازی به روش NSM انتخاب بسیار عاقلانه ای می باشد. این روش نیاز به آماده سازی سطح را به میزان بالایی کاهش می دهد و همچنین ریسک ایجاد شرایط بحرانی در اجرای موفق و موثر سیستم مقاوم سازی و نیاز به اجرای سیستم های Lay-Up در کارگاه را از بین می برد. به دلیل اینکه میلگرد و یا لمینیت در سطح بیشتری به بتن چسبیده، لذا در این سیستم هنگام انتقال یک نیروی مشابه در روش EBR میزان کمتری تنش برشی در بتن ایجاد می شود. از این رو طول توسعه (Development Length) در روش NSM بسیار کمتر بوده و می توان تقریباً از کل ظرفیت مقاومت FRP استفاده کرد پیش از آن که گسیختگی ناشی از چسبندگی حاصل شود. اجرای این سیستم نیاز به نیروی آموزش دیده خاصی ندارد و طراحی آن با در نظر گرفتن راهنمایی های ACI 440-2 انجام می شود. به عبارت دیگر در روش NSM، همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود نوارها یا میلگردهای مصالح مقاوم کننده در شیارهایی که در وجه کششی بتن ایجاد شده اند، چسبانده می شوند و پوشش سیمانی و یا چسب اپوکسی روی آن ها قرار می گیرد. به طور کلی برخی از مزایای روش های NSM نسبت به روش EBR عبارتند از: بهبود پیوستگی و انتقال نیرو به بتن اطراف به دلیل محصور شدن نوار داخل شیار، محافظت از نوار در برابر عوامل محیطی خارجی و عدم نیاز به آماده سازی سطحی بتن بعد از ایجاد شیارها.



## راهنمای نصب سیستم مقاوم سازی به روش NSM

**گام اول)** ابتدا محل شکاف طبق نقشه های تامین شده توسط مهندس طراح مشخص شده و با مازیک نشان می خورد. سپس توسط دستگاه مناسب و حفظ مسائل ایمنی شکاف ایجاد می شود (تصویر ۱). بعد نهایی (عمق و عرض) این شکاف برای میلگردهای FRP معمولاً ۱٫۵ برابر قطر میلگرد و در لمینیت ها عرض شکاف ۳ برابر ضخامت لمینیت و عمق آن برابر ۱٫۵ برابر عرض لمینیت (تصویر ۲) است.

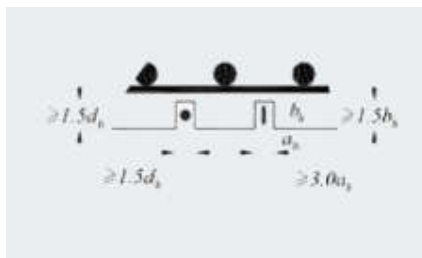
**نکات اجرایی این گام:**

استفاده از ابزار مناسب همچون یک فرز با تیغه الماس، ریل هدایت کننده تیغه در مسیر مستقیم و سایر ابزارهای دیگر ایجاد شکاف را آسان تر می کنند. توصیه می شود در برخی از موارد به جای برش یک مرحله ای شکاف چند خط شکاف ایجاد شود و سپس بتن بین آن ها برداشته شود تا شکاف نهایی ایجاد شود.

## تصویر ۱



تصویر ۲



گام دوم) قلم تراش کردن تکه های بتن در شکاف که توسط فرز برش نخورده اند و ایجاد یک شکاف عاری از هرگونه بتن و سنگدانه (تصویر ۳).

تصویر ۳

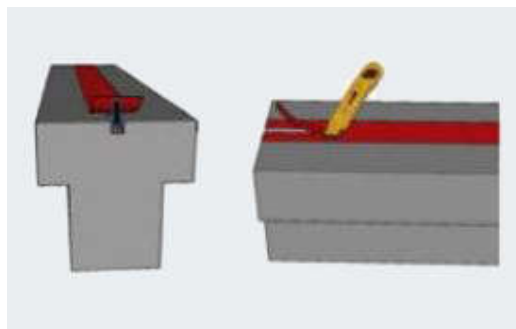


گام سوم) داخل شکاف از وجود هرگونه گرد و غباری توسط پمپ هوا یا جاروبرقی پاک شود. نکته اجرایی این گام: هیچ نیازی به برس زدن و ایجاد سطح غیر صاف با هر وسیله ای وجود ندارد. گام چهارم) برای اینکه پس از اجرای سیستم مقاوم سازی ظاهر عضو بتنی آسیبی نبینند و به خاطر مسائل زیبایی می توان سطح کنار شکاف توسط نوارهایی پوشیده شود تا حین تزریق چسب به بتن بیرون شکاف نچسبد. (تصویر ۴)

نکته اجرایی این گام: برای افزایش سرعت و تسهیل این مرحله نواری یک پارچه روی شکاف و بتن اطرافش قرار می دهیم و سپس با کاتر روی شکاف را برش می زنیم.

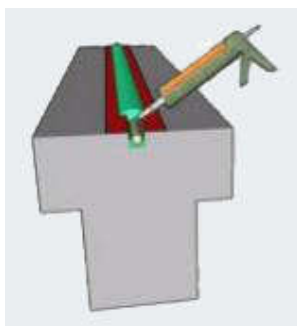
تصویر ۴





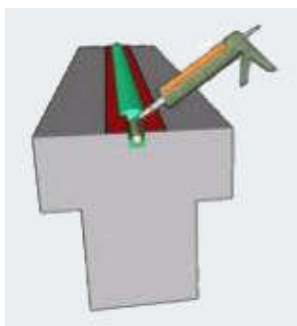
گام پنجم) شکاف را تقریبا تا نیمه با چسب پر می کنیم (تصویر ۵).

### تصویر ۵



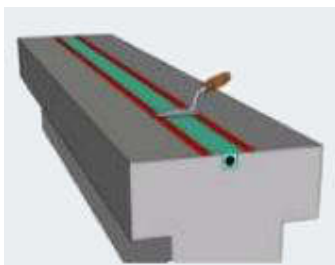
گام ششم) میلگرد و یا لمینیت را آغشته به چسب کرده و در داخل شکاف فرو می بریم. در این مرحله باید مطمئن شویم که چسب بدون اینکه حباب های هوا در آن ایجاد شود بتواند FRP را احاطه کند. گام هفتم) داخل شکاف را کامل با چسب پر می کنیم تا مطمئن شویم که FRP کاملا پوشانده شده است (تصویر ۶).

### تصویر ۶



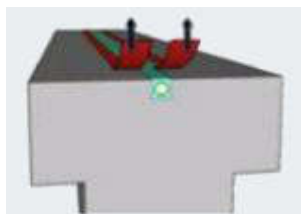
گام هشتم) اضافه چسب توسط لیسه یا ماله (تصویر ۷) برداشته شود.

### تصویر ۷



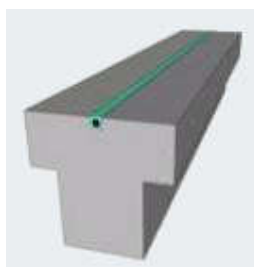
گام نهم) نواری که در گام چهارم بر روی سطح بتن قرار داده بودیم را از بتن جدا می کنیم (تصویر ۸).  
نکته اجرایی این گام: پیش از این که چسب سفت شود این کار انجام شود.

### تصویر ۸



در نهایت سیستم مقاوم سازی شده مطابق تصویر ۹ زیر خواهد بود.

### تصویر ۹



## Externally bonded reinforcement vs Near surface Mounted method

امروزه روش مقاوم سازی با نوار FRP که بر روی سطح عضو (EBR) انجام می شود مرسوم و شناخته شده می باشد. ولی مهندسين همواره به دنبال پاسخ مناسب برای صورت مساله های مختلف هستند، به عبارتی دیگر برای رفع مسائل متفاوت روش های متفاوتی را مورد بررسی قرار می دهند. مقاوم سازی با روش Near Surface Mounted یا به اختصار NSM روشی جدید است که پاسخی برای رفع بعضی از این مشکلات می باشد. در این روش شکاف هایی در سطح عضو ایجاد و نوار یا میلگرد FRP داخل عضو به وسیله چسب اپوکسی نصب می شود. حفر FRP در داخل عضو موجب افزایش چسبندگی در اتصال FRP به عضو می شود. به طوریکه کرنش نهایی قابل تحمل سیستم FRP از ۵ تا ۷ درمیل به ۱۲ درمیل افزایش می یابد.

## مقاوم سازی به روش NSM



### مقاوم سازی به روش EBR



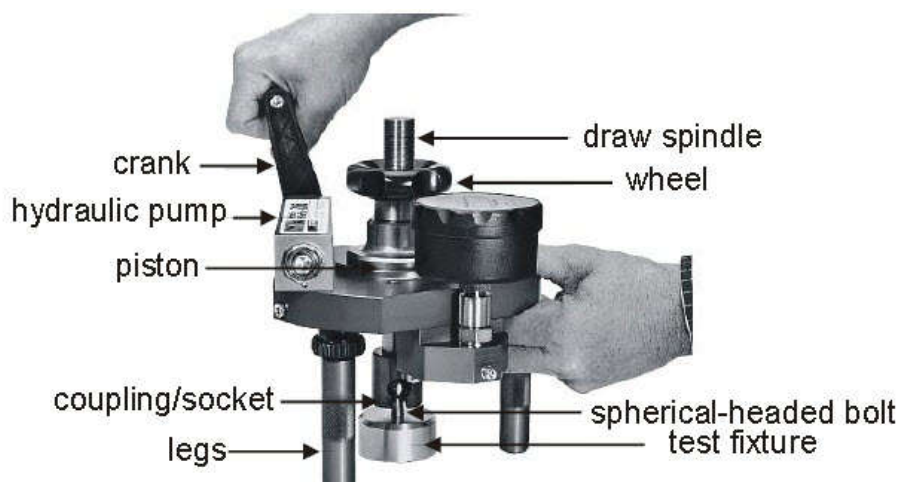
چرا از روش NSM استفاده کنیم؟

مزایا: - موثر بودن این روش نسبت به روش EBR

- عدم نیاز به فراگیری روش اجرا
  - حل مشکل نیاز به آماده سازی سطح کار
  - کاهش در معرض قرارگیری FRP (قرار گرفتن در شکاف)
  - بهبود عملکرد در حین قرار گرفتن در معرض آتش سوزی
  - قابل بازبینی بودن مشخصات FRP قبل از نصب معایب:
  - حفر شکاف در سطوح سقف (رو به بالا) ممکن است بسیار دشوار باشد.
  - کنترل کیفیت در کارگاه به آسانی روش EBR نیست.
  - نیاز به مقدار پوشش بتن کافی دارد.
- چرا از روش EBR استفاده کنیم؟

## مزایا:

- آماده سازی سطح ممکن است از حفر شکاف در عضو آسان تر باشد.
- در سطوح سقف (رو به بالا) آماده سازی و نصب این روش بسیار آسان تر است.
- می توان با روش Wet Lay-up هندسه های مختلفی را ایجاد کرد. - روش کنترل کیفیت با آزمایش Pull-off به راحتی ممکن است. معایب:
- برای اجرای روش Wet Lay-up نیاز به آموزش های ویژه وجود دارد.
- میزان کیفیت نهایی کار به شدت به آماده سازی سطح وابسته است.
- در این روش از مقاوم سازی معمولاً عملکرد با از دست رفتن پیوستگی از دست می رود.
- در روش Wet Lay-up میزان مشخصات در مقایسه با صفحات پیش سخت شده بسیار متغیر است.
- بیشتر در معرض آتش سوزی و از محلال های فیزیکی قرار می گیرند.
- آزمون پذیرش پیوند میان FRP و بتن (کیفیت، یکپارچگی و عملکرد کلی سیستم های مقاوم سازی FRP تا حد زیادی بستگی به چسبندگی سیستم FRP به بستر بتنی دارد.)
- می توان از FRP خصوصاً FRP با الیاف کربن CFRP در زمینه بهسازی لرزه ای و مقاوم سازی سازه های بتنی، بنایی، فولادی و چوبی استفاده کرد. به طور معمول FRP به دو صورت لمینت های سخت شده (برای این محصول نام های نوار یا تسمه نیز استفاده شده است.) که توسط پرایمر و چسب مجزا به سطح بستر چسبانده می شوند و یا بصورت الیاف بافته شده خشک که در هنگام نصب با چسب مخصوص اشباع می شوند، مورد استفاده قرار می گیرند. در حالت دوم چسب بعنوان ماتریکس بین الیاف کامپوزیت و همچنین عامل چسباننده الیاف با سطح بستر عمل می نماید.
- در مقاوم سازی با FRP عمدتاً به داشتن مشخصه های مکانیکی همچون مقاومت کششی، مدول الاستیسیته الیاف، مقاومت اتصال بین الیاف و سطح بتن و مقاومت پیوند ورق های لمینت به یکدیگر نیاز می باشد.
- کیفیت، یکپارچگی و عملکرد کلی سیستم های مقاوم سازی FRP تا حد زیادی بستگی به چسبندگی سیستم FRP به سطح بتنی دارد.
- تحقیقات گسترده انجام گرفته در زمینه رفتار پیوند سیستم FRP به بستر بتنی و ارزیابی آن، نشان دهنده لزوم انجام کنترل کیفیت در محل پروژه می باشد. به عبارت دیگر نصب سیستم FRP بدون انجام تست مانند انجام بتن ریزی در سازه ها بدون نمونه گیری و انجام تست فشاری بر روی آنها میباشد.
- از آنجائیکه بر اهمیت کنترل و تضمین کیفیت پیوند FRP به سطح بتن تاکید شد بایستی روشی مناسب جهت بررسی این مهم مورد استفاده قرار بگیرد. این روش باید با در نظر گرفتن شرایط کارگاهی دارای شرایط زیر باشد:
- الف) سادگی در انجام آزمون؛
- ب) سرعت مناسب؛
- ج) عدم نیاز به انجام مقدمات زیاد؛
- د) معیار پذیرش قابل درک؛ و در آخر
- و) قابلیت تکرار پذیری عالی با کسب اطمینان از یکپارچگی داده ها.
- روش تست استاندارد Pull-off که اولین بار در سال ۲۰۰۹ توسط ASTM D7522 اتخاذ شد، روش مناسبی برای آزمون پذیرش پیوند میان FRP و بتن می باشد.



آزمون D7522 با هدف ارزیابی چسبندگی لمینت های FRP یا الیاف اشباع شده FRP مورد استفاده در ترمیم بتن توسعه یافت. قدرت کشش بدست آمده از این آزمون را می توان در کنترل کیفیت چسبندگی و همچنین در معادلات نظری طراحی سیستم های FRP استفاده کرد.

مراحل انجام این تست بر اساس آیین نامه ACI-440.3R-04 بشرح زیر می باشد:

- ۱- محل تخت و مناسبی را جهت نمونه گیری انتخاب کنید.
- ۲- سطح FRP را برای نصب گوی آماده کنید. سطح موردنظر را با دقت تمیز نمایید.
- ۳- با توجه به سایز گوی با استفاده از مته گرد بر برشی در سطح FRP ایجاد نمایید. برش باید ۶ الی ۱۲ میلیمتر به داخل بتن نفوذ کند. (عکس الف)
- ۴- گوی را با چسب مناسب بر روی سطح برش داده بچسبانید. با توجه به نوع چسب استفاده شده زمان مناسب برای سفت شدن چسب را تامل نمایید. (عکس ب)
- ۵- دستگاه را کاملا عمود بر الیاف نصب کنید. پایه های دستگاه را تنظیم نمایید. (عکس ج)
- ۶- پیچ وسط گوی را چرخانده و تنظیم کنید.
- ۷- نیرو سنج را بر روی صفر تنظیم کنید.
- ۸- نیروی کششی را بصورت دستی یا ماشینی وارد کنید تا FRP گسیخته شود. نیروی Pull-off بدست آمده را ثبت کنید.

### تصویر الف) حلقه برش داده شده برای جدا کردن FRP از سطح بستر



### تصویر ب) گوی چسبانده شده بر روی بستر FRP



تصویر ج) نصب دستگاه Pull-off



تصویر د) نتیجه تست Pull-off



محاسبات:

نیروی Pull-off با فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_a}$$

where

$\sigma_p$  = the pull-off bond strength, MPa;

$F_p$  = the pull-off force, N; and

$A_a$  = the adhesion fixture contact area, mm<sup>2</sup>.

تحلیل نتایج:

چسبندگی لمینت FRP به سطح بتن جهت انتقال بار از عضو بتنی به FRP حیاتی می باشد. پیوند اتصال و

سختی (کیفیت) خود بتن در این راستا بسیار مهم هستند. مود های شکست احتمالی در تست Pull-

off عبارتند از:

۱- شکست چسب در سطح رابط بین لمینت و بتن

۲- گسیختگی در ورق FRP

۳- گسیختگی در بتن

۴- ترکیبی از سه مود شکست بالا

اگر پیوند اتصال مناسب باشد باید گسیختگی در بستر بتنی صورت گیرد که در نتیجه آن حد پایین مقاومت چسبندگی بدست می آید. اگر ظرفیت اتصال ضعیف بوده و منجر به گسیختگی از نوع دیگری شود، این آزمایش میتواند بینشی کلی نسبت به رفتار اتصال و مکانیزم شکست بدست دهد. طبقه بندی نوع شکست به ارزیابی کیفی اتصال و شناسایی ماهیت تخریب کمک می نماید.

میلگرد یا آرماتورهای FRP از نظر شکل ظاهری مشابه میلگردهای متداول هستند، ولی در تولید آنها به جای فولاد از رزین پلیمری مخصوص و الیاف (به طور معمول این الیاف از جنس شیشه و کربن می باشند و دارای مقاومت بیشتری نسبت به فولاد هستند) استفاده می شود. می توان این محصول را به عنوان جایگزین مناسبی برای میلگردهای فولادی در نقش تسلیح کننده بتن دانست، شاهد بر این ادعا نیز تعداد کثیر پروژه هایی است که از این محصول بهره گرفته اند. این محصول در مقابل الکتریسیته، امواج مغناطیسی و خصوصاً خوردگی (corrosion) مقاوم می باشد. با استفاده از این میلگردها می توان از مشکلاتی همچون تداخل الکترومغناطیسی و خوردگی اجتناب نمود. به علاوه چون میلگردهای FRP دارای مقاومت کششی بالایی هستند، می توان از آنها در بخش کششی مقاطع بتنی استفاده کرد.

انواع میلگردهای FRP متناسب با جنس الیاف وجود دارد؛ میلگردهای CFRP ساخته شده با الیاف کربن، میلگردهای GFRP ساخته شده با الیاف شیشه E-Glass، میلگردهای BFRP ساخته شده با الیاف بازالت. میلگردهای GFRP ارزانترین و متداولترین این میلگردها می باشند. بزرگترین مزیت انواع میلگرد کامپوزیت FRP نسبت به میلگردهای معمول، مقاومت بالای آنها در برابر خوردگی می باشد.

## مقایسه خصوصیات مکانیکی میلگردهای کامپوزیت FRP و میلگردهای فولادی

# COMPARATIVE CHARACTERISTICS

metallic and FRP reinforcement



CHARACTERISTICS	Rebar	
	Metallic reinforcement class A-III (A400C)	FRP reinforcement
Material	Steel	Fibreglass, soaked in a polymer based on epoxy resin
Ultimate tensile strength, MPa	390	1200
Modulus of elasticity, MPa	200 000	55 000
Elongation, %	25	2,2
Corrosion resistance to aggressive media	Subject to corrosion	Not subject to corrosion
Heat conduction	Is a heat-conducting	Is not heat-conducting
Electroconductivity	Conducts electricity	Non-conducting - is a dielectric
Produced profiles	6 - 80	4 - 20
Length	The rods of length 6-12 m	According to customer request
Environmentally friendly	Is environmentally friendly	Is not toxic, the degree of impact on humans and the environment belongs to the 4 hazard class (low hazard).
Longevity	In accordance with building standards	Predicted life at least 80 years
FRP equivalents for replacing steel rebar	6 A-III	4 AKC
	8 A-III	6 AKC
	10 A-III	7 AKC
	12 A-III	8 AKC
	14 A-III	10 AKC
	16 A-III	12 AKC
	18 A-III	14 AKC
Weight (with equal strength on the replacement), kg	20 A-III	16 AKC
	6 A-III - 0,222	4 AKC - 0,02
	8 A-III - 0,395	6 AKC - 0,05
	10 A-III - 0,67	7 AKC - 0,07
	12 A-III - 0,92	8 AKC - 0,08
	14 A-III - 1,28	10 AKC - 0,12
	16 A-III - 1,58	12 AKC - 0,20
	18 A-III - 2,0	14 AKC - 0,26
20 A-III - 2,47	16 AKC - 0,35	



## مقاومت میلگردهای FRP در مقابل خوردگی:

بزرگترین عیب میلگردهای فولادی مقاومت پایین آن‌ها در مقابل عوامل شیمیایی خورنده می‌باشد. از آن جاییکه امکان وجود ترک در مقاطع بتنی و در نتیجه نفوذ عوامل شیمیایی به داخل بتن وجود دارد، میلگردهای فولادی دچار خوردگی خواهند شد و متعاقباً مقاومت و یکپارچگی مقاطع بتنی از بین خواهد رفت. به علت مقاومت بالای رزین اپوکسی استفاده شده در ساخت میلگردهای FRP در مقابل اکسیژن، رطوبت، کلر، سولفات‌ها و سایر عوامل خورنده، میلگردهای FRP از مقاومت بالایی در برابر خوردگی برخوردارند. از این رو میلگردهای FRP برای سازه‌هایی که در معرض خوردگی قرار دارند مانند سازه‌های دریایی، اسکله‌ها، عرشه پل‌ها و سازه‌هایی که در معرض نمک‌های یخ‌زا قرار دارند جایگزین بسیار مناسبی برای میلگردهای فولادی می‌باشند.

## مقاومت میلگردهای FRP در برابر نیروهای مغناطیسی:

مواد کامپوزیت FRP دارای خصوصیات منحصر بفردی هستند. از آن جاییکه این مواد از ترکیب رزین با الیاف شیشه، کربن و یا آرامید ساخته می‌شوند، هیچ‌گونه تنش ناشی از میدان مغناطیسی در آن‌ها وارد نمی‌شود. با توجه به همین خصوصیت در مواد کامپوزیت FRP، استفاده از میلگردهای FRP در سازه‌های تحت تاثیر میدان‌های الکترو مغناطیسی نظیر راکتورها، فرودگاه‌ها، بخش‌های MRI بیمارستان‌ها و لابراتوارها توصیه می‌شود.

## مقاومت میلگردهای FRP در برابر جریان الکتریکی:

هدایت الکتریکی در سازه می‌تواند یک خطر به حساب آید. قابلیت رسانایی الکتریکی در مصالح فلزی مسئله خطرناکی بوده و می‌تواند باعث آسیب شود. در مقابل مصالح فلزی، مواد کامپوزیت FRP از لحاظ الکتریکی غیرهادی هستند که این امر آن‌ها را به گزینه مناسبی برای سازه‌های در معرض میدان الکتریکی می‌سازد. نمونه‌هایی از بکارگیری مواد کامپوزیت عبارتند از ساخت تیرهای انتقال برق با استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP (آرمتور FRP)، ساخت دکل‌های بتنی انتقال نیرو با استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP، احداث پست‌های پیش ساخته با استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP، استفاده از میلگردهای FRP در پایه پست‌های با

## ولتاژ بالا و وزن سبک میلگرد کامپوزیت FRP (آرمتور FRP):

میلگردهای FRP با وزن مخصوص ۲/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب بسیار سبک‌تر از میلگردهای فولادی رایج با وزن مخصوص ۸۵/۷ هستند. این کاهش چگالی می‌تواند منجر به کاهش هزینه حمل و نقل، آسانی در جابجایی مصالح و هم چنین کاهش بار مرده سازه گردد.

## قیمت مناسب میلگرد کامپوزیت FRP (آرمتور FRP):

استفاده از میلگردهای FRP در بسیاری از پروژه‌ها منجر به اقتصادی‌تر شدن پروژه می‌گردد. برای اطلاع از آخرین قیمت‌ها و مقایسه آن با میلگرد فولادی با شرکت رادیاب تماس حاصل فرمایید.

## تولید میلگرد FRP با دستگاه پالتروژن

توسط دستگاه پالتروژن که در تولید محصولات کامپوزیت با روش Pultrusion می‌توانید روش کار آن را مطالعه کنید، میلگردهای FRP را می‌توان با شکل‌های متنوع تولید کرد.

پلیمرهای مسلح شده با الیاف با مقاومت کششی بالا از جمله الیاف شیشه GFRP یکی از بهترین مواد کامپوزیتی در زمینه‌های مختلف شناخته شده و کاربرد دارند. به عنوان مثال امروزه تولید مقاطع بتنی سبک، پر مقاومت و با دوام با میلگردهای GFRP بسیار مرسوم شده است. در شکل زیر نسل جدید میلگردهای GFRP با پوشش سندبلاست را مشاهده می‌فرمائید. شرکت رادیاب توصیه می‌کند مشتریان عزیز از این پس این میلگردها استفاده کنند.



>

مشخصات فنی میلگردهای کامپوزیت GFRP

برای دریافت فایل pdf مشخصات فنی میلگردهای GFRP لطفاً از صفحه [بروشور ها و کاتالوگ های میلگردهای GFRP](#) بازدید کنید.

## کاربردهای میلگرد کامپوزیت GFRP

به دلیل مقاومت طبیعی در برابر خوردگی، آرماتور GFRP و یا میلگردهای کامپوزیت FRP برای سازه هایی که در معرض خوردگی قرار دارند، مانند سازه های دریایی، اسکله ها، عرشه پل ها، و سازه هایی که در معرض نمک های یخ زدا قرار دارند بسیار مناسب می باشند. همچنین بعلت خاصیت غیر مغناطیسی آرماتور GFRP و یا میلگردهای کامپوزیت GFRP بکاربری آن ها در تجهیزات حساس مانند میدان های الکترومغناطیس و بخشهای MRI بیمارستانها مناسب تر از میلگردهای فولادی می باشد.

در زیر به تعدادی از کاربری های آرماتور FRP و یا میلگرد GFRP اشاره شده است:

1. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در تاسیسات فاضلاب مانند تصفیه خانه ها، کلاریفایر (Clarifier)، منهول (Manhole)، چربی گیر (Grease Trap)
2. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در کانال ها و لوله های بتنی هدایت فاضلاب، پساب های صنعتی و مواد شیمیایی
3. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در سازه های بتنی اسکله ها و سازه های دریایی (Marine and Offshore)
4. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در سازه های مجاور دستگاههای MRI در مراکز بهداشتی و درمانی
5. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در آرماتوربندی لایه های فوقانی در عرشه (Deck) پلها در مناطق سردسیر و زیر سازی های بتن مسلح (RCC)
6. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در دیواره موقت بتنی در داخل تونل های مترو (Soft Eye)
7. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در نیلینگ و تحکیم خاک
8. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در شمع (Pile) های داخل خاک و آب
9. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در کانال های روباز (Culvert) و لوله های بتنی هدایت آب
10. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در بلوکهای بتنی پیش ساخته جاده ای (new jersey)
11. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در ساختمانهای پیش ساخته بتنی برای استفاده موقت
12. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در پانل های پیش ساخته نما (GRC)

13. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در دیوارهای پیش ساخته، ستونها و فونداسیون پیش ساخته برای دیوارکشی و محوطه سازی
14. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در تیرهای برق و تیرهای جایگزین دکل های انتقال نیرو
15. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در اتاقک پست برق پیش ساخته بتنی
16. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در آرماتوربندی کف پارکینگ ها و سالن های صنعتی
17. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در کف کاذب و سقف کاذب بتنی
18. کاربرد میلگرد کامپوزیت GFRP در ساخت کول

#### طراحی با میلگرد کامپوزیت GFRP

میلگردهای کامپوزیت GFRP دارای رفتار متفاوتی با میلگردهای فولادی می باشند. بنابراین فلسفه طراحی ساختمان های بتنی با استفاده از میلگردهای کامپوزیت GFRP دارای تغییراتی نسبت به میلگردهای فولادی است. میلگردهای فولادی دارای یک رفتار تقریباً ایزوتروپیک می باشند ولی میلگردهای کامپوزیت GFRP ناهمسانگرد هستند و دارای خصوصیات برتر (مقاومت کششی بالا) فقط در جهت اصلی الیاف می باشند. بعلاوه مصالح کامپوزیت FRP دارای رفتار الاستیک خطی می باشند و از خود رفتار جاری شدن (وارد شدن به مرحله پلاستیک) مانند فولاد نشان نمی دهند. از این رو روش های طراحی باید کمبود شکل پذیری در سازه های مقاوم شده با میلگردهای FRP را در نظر بگیرد. بدلیل اینکه میلگردهای کامپوزیت FRP دارای یک رفتار غیر شکل پذیر می باشند، استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP باید محدود به سازه هایی شود که مهمترین مشکل آن خوردگی و یا مشکلات الکترومغناطیسی می باشد.

#### خصوصیات و رفتار مکانیکی میلگرد کامپوزیت GFRP

##### • رفتار کششی میلگرد کامپوزیت GFRP

زمانی که بارگذاری در جهت کشش انجام می شود مصالح کامپوزیت FRP دارای رفتار پلاستیک قبل از شکست نمی باشند. رفتار کششی مصالح FRP شامل نوع الیاف، به وسیله رابطه تنش- کرنش خطی الاستیک تا شکست مشخص می شود. مقاومت کششی و سختی میلگردهای کامپوزیت FRP به چندین عامل بستگی دارد. بدلیل اینکه الیاف در میلگرد کامپوزیت FRP عضو اصلی باربر هستند نوع الیاف، جهت قرارگیری و مقدار الیاف در وهله اول حاکم بر خصوصیات کششی میلگرد می باشد. مقاومت و سختی متفاوتی در میلگردهایی با درصد حجم الیاف مختلف با سطح مقطع یکسان پدیدار می شود. میزان سخت شدن، محل ساخت و کنترل کیفیت در خصوصیات مکانیکی میلگرد نیز تاثیر می گذارد.

##### • رفتار فشاری میلگرد کامپوزیت GFRP

بطور کلی، تکیه کردن به مقاومت میلگردهای FRP در برابر تنش های فشاری توصیه نمی شود. حالت شکست برای میلگرد کامپوزیت FRP که تحت فشار طولی قرار گرفته است می تواند شامل شکست کششی جانبی، ریز کمانش های الیاف یا شکست برشی شود. مدول الاستیسیته فشاری میلگردهای FRP معمولاً از مدول الاستیسیته کششی آنها پایین تر می باشد.

##### • رفتار چسبندگی میلگرد کامپوزیت GFRP

عملکرد چسبندگی میلگرد کامپوزیت FRP، به طراحی فرآیند تولید، خصوصیات میلگرد و شرایط محیطی بستگی دارد. برای مهار یک میلگرد در بتن، نیروی چسبندگی می تواند به وسیله عوامل زیر منتقل شود:

- 1- مقاومت فصل مشترک چسب که چسبندگی شیمیایی نامیده می شود. 2- مقاومت اصطکاک در فصل مشترک در برابر لغزش. 3- درگیری مکانیکی میلگرد و بتن بدلیل نامنظمی سطح.

## استفاده از روش مقاوم سازی با مصالح FRP

سابقه استفاده از مصالح در صنعت ساختمان کشور ایران به حدود یک دهه می رسد اما امروزه استفاده از کامپوزیت های با زمینه پلیمری در بهسازی سازه ها از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است که دلیل اصلی آن نیاز به افزایش عمر بهره برداری و ارتقای اساسی زیرساخت ها در تمامی نقاط دنیا می باشد. الیاف FRP ساخت شرکت **CTech-LLC** آلمان می توانند توسط روش های دستی، دورپیچی با دستگاه مکانیزه، دستگاه آغشته ساز الیاف و... بر روی المان های مورد نظر نصب گردند.

1. آماده سازی سازه مقاوم سازی: قبل از هرگونه اقدام به تقویت با **ورقه های FRP** بایستی در صورت نیاز بتن تخریب شده را جدا کرده و در صورت رسیدن به آرمانتور خورد شده اقدامات مربوط به ترمیم و یا تعویض آن ها را صورت دهیم.
  2. به کار بردن آستری یا پرایمر FRP: برای افزایش چسبندگی و جلوگیری از جدایش ورقه FRP از لایه چسب یا **رزین اپوکسی** بین بتن و ورقه، با غلتک یک لایه اپوکسی FRP با لزجت کم به طور موضعی روی سطح مورد نظر به عنوان پرایمر می مالند.
  3. بتونه کردن سطح مقاوم سازی: یک لایه چسب FRP با ویسکوزیته بالا برای پرکردن خلل و فرج و فرورفتگیها در محلهای مورد نیاز به کار برده می شود. چسبندگی مناسب الیاف یا لمینت FRP با اجرای مستقیم مصالح ترمیم بر روی لایه زیرین که به درستی آماده شده است حاصل می شود.
  4. بردن شیت بر روی یک سطح تمیز و آماده که عاری از هر گونه آلودگی، چسب و ناصافی است ورقه FRP مطابق مشخصات و جزئیات ارائه شده بریده می شود.
  5. اشباع کردن الیاف FRP: در پروژه های بزرگ مقاوم سازی ورقه ها با دستگاه های گرداننده خاص در کارخانه اشباع می شوند و لایه اپوکسی یا ماتریس رزین به آن اضافه می شود و فقط کافی است در محل مورد نظر چسبانده شود ولی در کارهای کوچکتر در محل کارگاه رزین FRP روی سطح موردنظر مالیده شده سپس ورقه FRP خشک و بدون چسب بر روی سطح چسبانده می شود.
  6. نظارت بر کنترل کیفی FRP: در زمان عمل آوری 2 تا 6 ساعت بسته به شرایط حاکم، سطح مقاوم سازی شده با FRP چک و کنترل می شوند تا هیچ گونه حباب هوا بین لایه FRP و بتن حبس نشده باشد و خم شدگی یا بیرونی زدگی وجود نداشته باشد.
  7. اطمینان از کیفیت اجرای **مقاوم سازی با FRP**: گزارش های کنترل کیفیت تهیه شده و به خوبی نگهداری می شوند تا اطمینان از اجرای موفقیت آمیز ترمیم، تقویت و تعمیر با FRP حاصل شود.
  8. لایه رویه FRP: پس از عمل آوری و نظارت بر کیفیت اجرای مقاوم سازی، ورقه های FRP به منظور حفاظت، نگهداری و حفظ زیبایی و معماری با یک لایه بتن رویین یا ماده ای دیگر پوشانده می شوند.
- در بسیاری از مناطق زلزله خیز جهان از جمله ایران تعداد زیادی از ساختمان های بنایی وجود دارند که بسیاری از آن ها برای بار های لرزه ای طراحی نشده اند. **زلزله های اخیر** نشان داده است که این ساختمان ها در برابر بارهای لرزه ای آسیب پذیر بوده و نیاز به **مقاوم سازی** دارند. بر پایه تحقیقات به عمل آمده بیش از 70 درصد از سازه های موجود در سرتاسر جهان ساختمان های بنایی هستند. زلزله های قوی و متوسط می توانند صدمات و خسارت جبران ناپذیری را بر این گونه سازه ها وارد نمایند که بخش عمده ی این خسارات برای سازه های بنایی است. بنابراین بررسی آسیب پذیری و **مقاوم سازی ساختمان** این نوع بنا ها تحت اثر زلزله دارای اهمیت خاصی می باشد. همچنین اغلب سازه هایی که دارای اهمیت تاریخی می باشند، با استفاده از مصالح بنایی ساخته شده اند.
- از طرفی با توجه به اینکه خرابی و جایگزینی این ساختمان ها به دلایل بسیاری امکان پذیری نیست احتیاج به روش های **مقاوم سازی ساختمان** های غیر مسلح بیشتر احساس می شود. **روش های متعارف مقاوم سازی** متفاوتی موجود است که هر کدام از این روش ها بر پایه افزایش مقاومت و یا شکل پذیری دیوارهای غیر مسلح بنایی استوار است. به

منظور بهسازی سازه های بنایی در استاندارد **ACI 440.7R-10** پیشنهادهایی ارائه شده است. وزن زیاد، ضعف مقاومتی ملات، کمبود نسبی دیوارهای بنایی (تراکم کم) و وجود بازشوهای بزرگ باعث ضعف مقاومتی ساختمان شده و ساختمان با وجود انسجام کافی ممکن است قابلیت عملکردی مورد نظر را نداشته باشد. سازه های بنایی به دو دسته بنایی مسلح و بنایی غیر مسلح تقسیم می شوند. سازه های بنایی مسلح سازه هایی هستند که محاسبات سازه ای برای آنها در نظر گرفته نشده اما المان ها و اجزایی برای مهار بار جانبی در آن تعبیه شده است. محاسبات سازه ای برای آنها در نظر گرفته نشده اما المان ها و اجزایی برای مهار بار جانبی در آن تعبیه شده است. ساختمان های بنایی از مصالح آجر و ملات ساخته شده اند که درز ملات این بناها به عنوان یک نقطه ضعف اصلی در بار جانبی زلزله می باشد. به این دلیل مودهای شکست، لغزش درز ملات و کشش قطری در رفتار درون صفحه ای و کماتش خارج از صفحه دیوارها در زلزله های گذشته بیشترین عامل تخریب ساختمان را داشته است.

#### مقاوم سازی تیر با کامپوزیت های FRP

##### تیر بتنی

**مقاوم سازی تیر بتنی با مصالح FRP** در طی 3-4 روز به 3 برابر مقاومت کششی فولاد می رسند، از این رو با توجه به اینکه الیاف FRP مقاومت کششی بسیار بالایی نسبت به ورقه های فولادی دارند، اتصال FRP به ناحیه کششی بتن در تیر بتنی سبب افزایش ظرفیت خمشی مقطع خواهد شد. عوامل متعددی مانند ابعاد مقطع تیر بتنی، مساحت و مشخصات مکانیکی میلگردهای موجود و **میلگرد FRP** مورد استفاده و همچنین مقاومت بتن موجود، در میزان افزایش مقاومت خمشی سازه های بتنی با استفاده از سیستم های FRP دخیل می باشند. در ادبیات فنی این افزایش مقاومت از 10 تا 160 درصد گزارش شده است

#### مزایای روش مقاوم سازی تیر بتنی با FRP

- افزایش مقاومت خمشی تیر
- افزایش مقاوم برشی تیر
- افزایش شکل پذیری تیر
- افزایش مقاومت در برابر خوردگی
- افزایش دوام و عمر
- کنترل عرض ترک
- ضخامت کم ورقه های FRP و عدم تغییر قابل توجه در ابعاد تیر
- سهولت در اجرا
- هزینه پایین نسبت به روش های مرسوم دیگر
- ترمیم ناشی از خوردگی

##### تیر فولادی

در سازه های فولادی که تیرها وظیفه تحمل بارهای وارده از کف سازه و انتقال آن ها به ستون ها را بر عهده دارند. در صورتی که تیر فولادی بنابر هر علتی ظرفیت خمشی کافی برای تحمل بار ها را نداشته باشد نیاز به مقاوم سازی پیدا میکند.

همانند تقویت تیر بتنی، تیر فولادی را نیز می توان با چسباندن FRP به قسمتی از مقطع که تحت کشش قرار می گیرد تقویت نمود. بدین ترتیب می توان با تقویت بال تحتانی تیر فولادی دو سر مفصل آن را تقویت نمود. همچنین برای تیر های دو سر گیردار و یا تیرهایی که در قابهای چند دهانه استفاده می شوند، می توان با تقویت بال تحتانی بوسیله FRP در میانه طول عضو و نیز بال فوقانی در نواحی نزدیک تکیه گاه، اقدام به تقویت خمشی عضو نمود.

مزایای روش مقاوم سازی تیر فولادی با FRP  
 به حداقل رسیدن مشکلات اجرایی به دلیل وزن بسیار کم الیاف FRP  
 انعطاف پذیری بالای الیاف FRP  
 افزایش ظرفیت خمشی تیرهای فولادی  
 به تاخیر انداختن کمانش موضعی بال تیر  
 ضخامت کم لمینیت FRP و عدم تغییر قابل توجه در ابعاد تیر  
 هزینه پایین نسبت به روش های مرسوم دیگر  
 برای اطلاعات بیشتر رجوع کنید به تقویت خمشی تیرهای فولادی با FRP  
 راهکارهای مقاوم سازی ستون ها  
 مقاوم سازی ستون به روش ژاکت بتنی

ترمیم و مقاوم سازی ستونهای بتنی و فلزی با استفاده از ژاکت بتنی به عنوان راه حلی موثر توصیه می‌گردد. در این روش ستون هایی که دارای ضعف باربری بوده و یا نیاز به ترمیم دارند، با افزودن لایه‌ای از بتن، میلگردهای طولی و خاموتهای بسته تقویت می‌گردد. در مواقعی که آسیبهای وارده به ستون بتنی زیاد بوده و یا ستون از ظرفیت کافی در برابر نیروهای جانبی برخوردار نباشد استفاده از طرح ژاکت بتنی برای مقاوم سازی ستون پیشنهاد می‌گردد. همچنین از این تکنیک مقاوم سازی می‌توان برای افزایش سختی برشی در ستون های فولادی با مقاطع I و H شکل استفاده نمود. در حالتی که ستون فولادی مقطعی بسته داشته باشد، می‌توان به منظور تقویت، ستون را با بتن پر نمود. اجرای تکنیک ژاکت بتنی بهتر است با قالب و بتن خود تراکم صورت گیرد ولی در صورتی که لایه بتن اضافه شده ضخامت کمی داشته باشد، استفاده از روش شاتکریت بهتر از بتن ریزی می‌باشد.



مقاوم سازی ستون بتنی به روش ژاکت بتنی

مقاوم سازی ستون به روش ژاکت فولادی  
 تقویت ستون ها با استفاده ژاکت فولادی، سبب افزایش مقاومت فشاری، برشی و همچنین تامین محصور شدگی جهت افزایش شکل پذیری آن می‌شود. با این روش مقاوم سازی می‌توان ظرفیت برشی، فشاری و محصور شدگی ستون ها را تامین کرد و بدین ترتیب ظرفیت باربری آنها در مقابل بارهای جانبی زلزله و قائم ثقلی نیز افزایش می‌یابد.  
 مقاوم سازی ستون با کامپوزیت های FRP  
 ستون بتنی

هنگامی که ستون تحت بارهای لرزه ای قرار می گیرد، مسئله ظرفیت جذب انرژی و شکل پذیری ستون اهمیت می یابد که استفاده از الیاف FRP ضمن افزایش ظرفیت برشی ستون، مد گسیختگی آن را از حالت برشی به خمشی تغییر داده و شکل پذیری را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. با افزایش میزان بار وارده بر ستون، بتن تمایل دارد در جهت عمود بر جهت اعمال بار از هم باز شود. محصور کردن عرضی بتن با پوشش FRP (دور پیچ کردن) توسط افزودن لایه هایی از الیاف شیشه و کربن مقاومت نهایی ستون را تا 2 برابر افزایش می دهد و البته تاثیر مهم تر این الیاف در افزایش 5 برابری در ظرفیت تغییر شکل بتن است.

در این روش قرارگیری الیاف در امتداد عمود بر محور طولی عضو به صورت دور پیچ کامل، سبب ایجاد محصورشدگی انفعالی (Passive) در عضو می گردد. از این رو FRP تا زمان بارگذاری و رخداد تغییرشکل های عرضی در ستون بتنی موجود منفعیل بوده و تحت تنش قرار نگرفته و تاثیری در باربری عضو ندارد. بدین سبب اجرا و نصب استاندارد و اطمینان از چسبندگی کامل بین بتن و FRP در این روش مقاوم سازی بسیار حائز اهمیت می باشد.

مزایا و خصوصیات مقاوم سازی ستون بتنی با FRP

افزایش مقاومت خمشی ستون

افزایش مقاومت برشی ستون

افزایش مقاومت فشاری ستون

افزایش مقاومت در برابر خوردگی

افزایش دوام و عمر

کنترل گسترش ترک و عرض ترک

ضخامت کم ورق های FRP و عدم تغییر قابل توجه در ابعاد تیر

سهولت در اجرا

هزینه پایین نسبت به روش های مرسوم دیگر

افزایش شکل پذیری

برای اطلاعات بیشتر در مورد مقاوم سازی ستون های بتنی اینجا را کلیک کنید.



ترمیم ستون بتنی با الیاف FRP

ستون فولادی

ستون ها اجزایی از ساختمان های فولادی هستند که قسمت اعظم نیروی وارد بر آن ها به صورت فشاری می باشد و اغلب به صورت عمود بر سطح زمین میباشند. عمده خرابی موجود در ستون های فولادی شامل کمناش موضعی، کمناش کلی و گسیختگی در محل درزها و وصله ها می باشد.

استفاده از روکش FRP در مقاطع بسته همانند مقاوم سازی ستون های بتنی می باشد که در آن الیاف به طور دورپیچ ستون های فولادی را محصور می کند و باعث افزایش مقاومت فشاری آن ها میگردد. این امر هم چنین باعث افزایش شکل پذیری اعضا تحت ترکیب نیرو های محوری و خمشی میشود.

مزایای مقاوم سازی ستون فولادی با FRP

قابلیت افزایش مقاومت محوری، برشی و خمشی ستون

افزایش شکل پذیری و قابلیت جابه جایی نسبی نهایی بیشتر

کمترین افزایش در ابعاد پایه در بین روش ها مشابه

سرعت بالای مقاوم سازی بدون توقف بهره برداری از سازه

اضافه نمودن ورق های فولادی

در ساختمان های فولادی با اضافه کردن ورق پوششی به بال ستون و یا اضافه نمودن ورق موازی با جان ستون، می توان ستون فولادی را مقاوم سازی نمود. در حالت اول و با افزایش ضخامت بال از کمناش موضعی بال ستون جلوگیری شده و اضافه نمودن ورق موازی با جان ستون، مقطع را به شکل جعه ای تبدیل کرده، افزایش ممان اینرسی درامتداد موازی با جان را در پی خواهد داشت.

برای اطلاعات بیشتر در مورد مقاوم سازی ستون های فولادی اینجا را کلیک کنید.

راهکارهای مقاوم سازی دال بتنی

افزایش ضخامت دال بتنی

در برخی مواقع و بعلت مشکلاتی همچون افزایش بار وارده بر دال بتنی، ضعف در طراحی دال، خوردگی آرماتورهای فولادی و یا وجود ترک در دال بتنی از روش افزایش ضخامت می توان برای تقویت دال بتنی استفاده نمود. در صورتی که دال بتنی توانایی مقاومت در برابر ممان منفی وارد بر آن را نداشته و مقدار آرماتورهای تحتانی کافی باشد، ضخامت دال را در وجه فوقانی آن افزایش می دهیم. در مقابل و در صورتی که دال بتنی توانایی مقاومت در برابر ممان مثبت وارد بر آن را نداشته و یا بار مرده وارد بر آن بسیار کمتر از بار زنده باشد، ضخامت دال بتنی در وجه تحتانی آن باید افزایش یابد.

مراحل مقاوم سازی دال بتنی به روش افزایش ضخامت دال:

برداشتن کاور بتن

تمیز کردن آرماتورهای فولادی با استفاده از برس سیمی و یا روش های مرسوم دیگر.

استفاده از پوشش های ضد خوردگی با پایه اپوکسی بر روی میلگردها

در صورتی که مقدار خوردگی در آرماتورها بالا باشد، آرماتورهای فولادی جدید متناسب با الزامات آیین نامه ای باید طراحی و به دال اضافه گردد.

آرماتورهای فولادی جدید باید با استفاده از روش های مناسب در جهت عمود به دال و در جهت افقی به تیرهای پیرامونی مهار گردد.

با استفاده از لایه ای از مواد با پایه اپوکسی بر روی بتن قدیم، از چسبندگی مناسب دال موجود با بتن مسلح جدید اطمینان حاصل گردد.

قبل از خشک شدن اپوکسی، بتن جدید و با ضخامت مورد نیاز اجرا گردد. به منظور کاهش جمع شدگی در بتن می توان از مواد افزودنی مناسب استفاده نمود.



اضافه کردن صفحات فولادی به دال

یکی از روش های کنترل خیز سازه و افزایش سختی، مقاومت و یکپارچگی کف ها و سقف های بتنی، استفاده از صفحات و ورق های فولادی است. این ورق ها باید به صورت صحیح به سقف متصل و مهار شوند و فضای بین سقف و ورق با گروت یا مصالح بر پایه اپوکسی پر شوند تا ضمن چسبندگی کافی، عملکرد لرزه ای در برابر زلزله و انتقال بار مناسبی را از خود بر جای بگذارند.



تقویت دال بتنی با ورق فولادی

مقاوم سازی دال بتنی با کامپوزیت های FRP

مقاوم سازی دال بتنی با FRP به منظور افزایش ظرفیت باربری دال، افزایش مقاومت دال در برابر خوردگی، کمبود مقاومت فشاری بتن، افزایش مقاومت خمشی، برشی و... بطور موضعی انجام می شود. دال ها عملاً وظیفه تحمل بارهای قائم را دارند ولی چون عملکرد دیافراگم افقی نیز دارند، باید با اعضای مقاوم جانبی سازه اتصال داشته و از سختی و مقاومت کافی برخوردار باشند.

برای مقاوم سازی دال بتنی با FRP، مصالح مرکب FRP را می توان بصورت نوارها و یا صفحاتی بر روی سطوح تحت کشش برای افزایش مقاومت خمشی اجرا نمود. دال یک طرفه با تکیه گاه ساده را می توان با چسباندن نوارها یا صفحات FRP در سطوح تحتانی آنها و در راستای طولی، مقاوم سازی نمود. در دال دو طرفه مقاوم سازی با نوارهای FRP در هر دو جهت صورت گیرد.

البته اگر دال دارای تکیه گاه گیردار باشد، نوارهای FRP را باید در قسمت فوقانی دال نیز اجرا نمود. همچنین تقویت و بهسازی دال بتنی با FRP به منظور افزایش ظرفیت برشی پانچ دال بتنی در اطراف ستون ها، و تقویت مناطق اطراف باز شو ها انجام می شود.

استفاده از ورق های CFRP در ناحیه کششی اتصال دال می تواند تشکیل و گسیختگی ترک های برشی را بوسیله افزایش مقاومت خمشی دال در مجاورت ستون به تعویق اندازد و در نتیجه باعث بهبود مقاومت برشی دو طرفه اتصال گردد. در مقاوم سازی دال با FRP به دلیل ضخامت کم ورق های FRP (حدود 0/05 اینچ یا 1/3 میلی متر)، ورق ها براحتی می توانند تحت پوشش کف پنهان شوند و همچنین کاهش هزینه ها و اقتصادی بودن این روش باعث برتری آن نسبت به روش های معمول دیگر می باشد.



### تقویت ظرفیت باربری دال بتنی با لمینیت کربن

تقویت اعضا و اجزای بتنی با استفاده از روکش بتنی و یا فولادی، سبب افزایش مقاومت فشاری، برشی و همچنین تامین محصور شدگی جهت افزایش شکل پذیری یا پیوستگی بتن و آرماتور می‌شود. با این روش مقاوم سازی می‌توان ظرفیت برشی، فشاری و محصور شدگی ستونها، دیوارها، دال ها و تیرها را تامین کرد و بدین ترتیب ظرفیت باربری آنها در مقابل بارهای جانبی زلزله و قائم ثقلی نیز افزایش می‌یابد.

مزایا و خصوصیات مقاوم سازی دال بتنی با FRP

افزایش مقاومت خمشی دال‌های یک طرفه

افزایش مقاومت خمشی دال‌های دو طرفه

تقویت و افزایش مقاومت برشی

افزایش سختی و کاهش خیز در بارهای سرویس

افزایش شکل پذیری

ترمیم و تقویت ناشی از خوردگی

افزایش مقاومت در برابر خوردگی

صرفه اقتصادی نسبت به روش های معمول

سهولت در اجرا

راهکارهای مقاوم سازی دیوارها

شاتکریت بتنی دیوار

یکی از روش های مقاوم سازی دیوارها استفاده از شاتکریت بتنی و مسلح نمودن دیوار بتنی یا بنایی می‌باشد که در مقاوم سازی ساختمان به صورت کلی تاثیر زیادی دارد. در این روش ابتدا یک شبکه میلگرد به طور صحیح و مهاربندی شده بر روی دیوار قرار می‌گیرد و سپس با استفاده از دستگاه شاتکریت عملیات بتن پاشی صورت می‌گیرد.

این پوشش بتنی علاوه بر ایجاد انسجام مناسب در دیوار، مقاومت و شکل پذیری درون صفحه و برون صفحه را نیز افزایش می‌دهد. یکی دیگر از مزیت‌های این روش مقاوم سازی در این است که شبکه میلگرد ایجاد شده بر سطح دیوار به همراه بتن پاشیده شده همانند یک لایه بتن مسلح بوده و باعث بهبود رفتار لرزه ای دیوار (دیوار بتنی یا دیوار بنایی) در برابر زلزله می‌شود.

مقاوم سازی دیوار با کامپوزیت های FRP

مصالح کامپوزیت پلیمری FRP شرکت افزیر از جنس الیاف شیشه و یا کربن، راه‌حلی ایده‌آل برای تعمیر و مقاوم سازی دیوار بتنی، بنایی غیرمسلح، آجری و جان‌پناه محسوب می‌شوند. از جمله المان های سازه ای که

قابل مقاوم سازی ساختمان به کمک مصالح کامپوزیت پلیمری FRP شرکت افزیر هستند می توان به موارد زیر اشاره کرد:

دیوارهای برشی بتنی مسلح

دیوارهای بتنی غیر مسلح

دیوارهای بنایی



ترمیم دیوار بتنی با الیاف CFRP

مزایا و خصوصیات مقاوم سازی دیوار بتنی با FRP

افزایش مقاومت خمشی و برشی دیوارها

حداکثر افزایش ضخامت دیوار به میزان 5 میلی متر

سبکی و افزایش حداقلی وزن دیوار

افزایش مقاومت کل دیوار حتی در صورت پوشاندن سطح کوچکی از آن

عملکرد آب بندی

کاهش بسیار زیاد نرخ خوردگی دیوار

قابلیت اتصال مناسب به انواع دیوار اعم از بتنی، آجری و ...

عدم نیاز به هم پوشانی زیاد و در نتیجه ارزان تر بودن این روش

راهکارهای مقاوم سازی اتصالات

اتصال تیر به ستون در قاب های خمشی بتنی مسلح به علت قرارگیری اتصال تحت تنش های رفت و برگشتی زلزله جزء بحرانی ترین نقاط در عملکرد قاب بتن مسلح خمشی می باشد. لذا اصلاح عملکرد گره اتصال و مقاوم سازی آن باعث بهبود عملکرد کل سیستم و مقاوم سازی کل ساختمان خواهد شد. روشهای متنوعی برای تقویت اتصالات به شرح زیر موجود می باشد که با توجه به معیارهای مختلف یک یا ترکیبی از آنها برای بهبود عملکرد اتصال و تقویت آن در برابر زلزله انتخاب می شود:

تزریق رزین اپوکسی در ژاکت فولادی اتصالات بتنی

استفاده از طوق های پیش تنیده X شکل

مقاوم سازی و تقویت اتصالات با استفاده از FRP

نصب جاکت ورق فولادی در اتصالات بتنی

ایجاد قفس فولادی در اتصالات بتنی

پیش تنیدگی اتصالات

ایجاد ژاکت بتنی در اتصالات



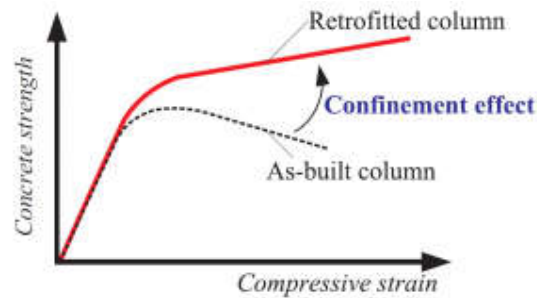
بهبودی اتصالات در ساختمان بتنی با الیاف FRP

با تقویت و مقاوم سازی اتصالات بتنی با FRP می توان ظرفیت خمشی و همچنین ظرفیت برشی اتصال ساختمان را افزایش داد. به علت دورگیری، بکارگیری این روش میزان شکل پذیری اتصال را نیز افزایش می دهد. با استفاده از FRP می توان بدون افزایش ابعاد اتصال، مقاومت آن را افزایش داد. استفاده از تقویت اتصال بتنی با FRP، نسبت به روکش فولادی ارجح تر است، زیرا تقویت اتصال با FRP بر خلاف فولاد دچار خوردگی نمی شود و می تواند در مقابل خوردگی اسیدها، بازها و مواد مهاجم مشابه در دامنه وسیعی از دما مقاومت کنند.

با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از تکنولوژی جدید الیاف پلیمری تقویت شده (FRP) از محبوبیت بسیاری برخوردار شده است. این موضوع به دلیل نیاز به نگهداری و افزایش مقاومت شالوده های سازه های مهم در سراسر دنیا و همچنین مزایای استفاده از این الیاف مانند مقاومت در برابر خوردگی و زنگ زدگی در برابر مواد شیمیایی، امکان جا به جایی و نصب آسان، زمان ساخت کم، نسبت مقاومت به وزن زیاد، نسبت سختی به وزن زیاد و همچنین توانایی نصب بر روی اکثر سطوح، می باشد. یکی از کاربردهای مهم الیاف های پلیمری برای مقاوم سازی سازه های، افزایش مقاوم سازی ستون های بتنی می باشد. در دهه های اخیر، مقاوم سازی ستون ها با محصور کردن آن ها به وسیله صفحات FRP، محبوبیت بسیاری کسب کرده است. تعمیر و مقاوم سازی ستون های بتن آرمه به وسیله کامپوزیت های پلیمری شامل الیاف پوششی، محفظه ای و اسپری می باشد. نمونه ای از این روش ها در شکل (1) نمایش داده شده است. مقاوم سازی ستون های بتنی، بدون ایجاد تغییر در سختی ستون، از دیگر مزایای استفاده از این الیاف ها می باشد. نمودار تنش کرنش نمونه ای از ستون مقاوم سازی شده با ستون معمولی در شکل (2) نشان داده شده است.



شکل (1) مقاومسازی ستون‌های بتنی با FRP: اسپری - محافظه‌ای - پوششی



شکل (2) نمودار تنش کرنش ستون مقاوم نشده و مقاوم شده با پوشش FRP

به طور کلی، ستون‌ها برای افزایش ظرفیت محوری، خمشی و برشی و به دلایل مختلفی مانند عدم محصورشدگی، بارهای خارج از مرکز، بارهای ضربه‌ای و خوردگی مقاومسازی می‌گردند. در حالت بارگذاری بر روی ستون، انبساط جانبی بتن توسط پوشش FRP محدود می‌گردد. بعد از پیدایش ترک‌های داخلی، ضریب پواسون بتن که در محدوده‌ی 0.15-0.2 می‌باشد، شروع به افزایش می‌کند. در نتیجه بتن با شدت بیشتری به صورت غیرخطی و در جهت جانبی، انبساط می‌یابد. این تغییر شکل ناپایدار، فشاری به سمت بیرون به الیاف وارد می‌سازد که باعث می‌شود کرنش حلقه‌ای در FRP ایجاد گردد. در نتیجه الیاف فشاری داخلی به هسته‌ی بتن وارد می‌سازد که باعث محدود شدن انبساط جانبی هسته‌ی بتن می‌شود و ظرفیت باربری و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. در ستون‌های استوانه‌ای، بتن به صورت یکنواخت در جهت جانبی منبسط می‌گردد. به همین دلیل فشار محدودکننده‌ی یکنواخت از الیاف به آن وارد می‌شود. اما در ستون‌های غیر دایره‌ای، به دلیل شکل سطح مقطع، فشار FRP و انبساط بتن یکنواخت نمی‌باشد. در ستون‌های مربعی و مستطیلی، انبساط جانبی بتن در سطح صاف مقطع، تغییر شکل خمشی در FRP ایجاد می‌کند و مقاومسازی الیاف زمانی به صورت مفید فعال می‌شود که بتن در قسمت خمش یافته و سهمی‌وار، ترک بردارد. تأثیر مقاومسازی FRP، معمولاً در نقاط تیز کمتر می‌شود زیرا که باعث گسستگی نا به هنگام الیاف پلیمری به دلیل تیزی یا تمرکز تنش می‌شود. برای جلوگیری از این شرایط، نقاط تیز ستون‌های غیر دایره‌ای، به صورت گرد برش داده می‌شوند.

این شکل مقطع جدید، باعث افزایش سطح مقطع مؤثر در مقاوم‌سازی می‌شود. جزئیات سطح مقطع مؤثر در انواع ستون‌ها در شکل (3) نمایش داده شده است.



شکل (3) سطح مقطع مؤثر در انواع ستون‌های بتنی

### روش‌های تعمیر، حفاظت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و سازه‌های با مصالح بنایی

#### تعمیر، بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی

روش‌های بهسازی یکی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی بسیار متنوع و گسترده هستند و ممکن است در شرایط مختلف از روش‌های متفاوتی استفاده گردد. اما بر مبنای نتایج مطالعات فنی بهسازی و مهندسی ارزش، مقایسه چند معیار بر اساس تحلیل ریسک و تجربه برای انواع سازه‌های مورد نیاز به مقاوم‌سازی موثرترین و بهینه‌ترین روش انتخاب می‌گردد. ملاحظات اصلی ترمیم و بهسازی سازه‌ها مطابق ذیل می‌باشد:

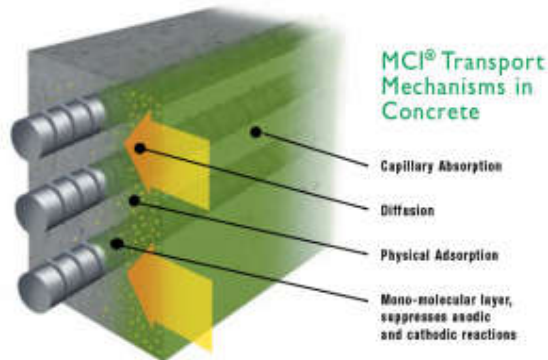
- تثبیت و پایا سازی مصالح موجود
- ارضای معیارهای کفایت سازه‌ای
- سازگاری فیزیکی و شیمیایی و مکانیکی مصالح بهسازی با مصالح موجود
- پیوستگی و انتقال نیروی بین مصالح جدید و قدیم
- پایش دوام و مسائل نگهداری و بهره‌برداری
- امکان‌پذیری و سهولت و قابلیت اطمینان کیفیت اجرا
- اقتصاد طرح
- حداقل ریسک طراحی و اجرا و بهره‌برداری
- حصول حداکثر افزایش عمر مفید

#### پایا سازی و بهره‌گیری از مقاومت مصالح موجود در مرحله اولیه در تعمیر سازه‌های بتن مسلح

پایا سازی و بهره‌گیری از مقاومت مصالح موجود از روش‌های موثر برای بهینه نمودن طرح بهسازی و مقاوم‌سازی می‌باشد و می‌تواند بصورت‌های زیر انجام می‌شود:

- استفاده از مواد بازدارنده خوردگی از نوع آلی و بر پایه آمینه کربوکسیلات (MCI) برای پایاسازی بتن مسلح جهت امکان استفاده از تسلیح موجود برای عملکرد درازمدت سازه در مواردی که آسیب در سازه از طریق فرایند خوردگی صورت پذیرفته است.
- شرط دیگر استفاده از تسلیح موجود وجود قلاب یا مهار کافی برای تبادل نیرو بین بتن و فولاد در سازه‌های بتنی می‌باشد.
- تزریق و دوخت ترک‌ها از دیگر الزامات پایا سازی بتن مسلح موجود است.
- ترمیم سطحی بتن (خصوصاً در ناحیه کاور) بوسیله ملات‌های پایه سیمانی اصلاح شده با پلیمر و الیاف MCI، به دلیل توانایی در مهاجرت به عمق بتن و رسیدن به سطح فلز تقویت‌کننده بتن و تشکیل یک لایه مولکولی محافظ روی سطح فلز می‌تواند موجب حفاظت آرماتور شود، زمانی که در تماس با آن قرار می‌گیرد. MCI می‌تواند هم‌حین ساخت بتن با افزوده شدن به آب یا مستقیماً به میکسر (Mixer) و هم برای سازه‌های بتنی موجود بکار رود. در سازه‌های بتنی موجود، MCI روی سطح سازه اعمال می‌شود و توسط خاصیت موئینگی (Capillary) به داخل سازه کشیده می‌شود. در واقع بتن مانند یک اسفنج عمل می‌کند و موجب مکش بازدارنده به داخل می‌شود. وقتی MCI در تماس با فولاد قرار می‌گیرد، یک جاذبه یونی به سطح فولاد (آرماتور) پیدا می‌کند و لایه مولکولی محافظ را روی آن

تشکیل می‌دهد که تمایل آن به سطح فلز، خیلی بیشتر از آب، یون‌های کلراید و سایر عوامل خورنده است. در مواردی که عمق کاور بتن بالاتر از 7 سانتیمتر می‌باشد جهت حفاظت و کنترل خوردگی سازه‌های موجود می‌توان از روش تزریق MCI استفاده نمود.

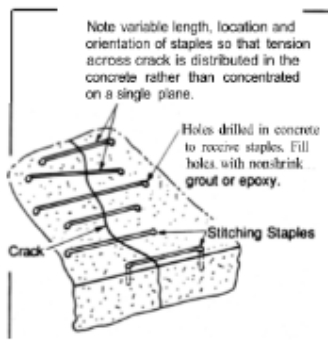


شکل 1: عملکرد حفاظتی بازدارنده خوردگی

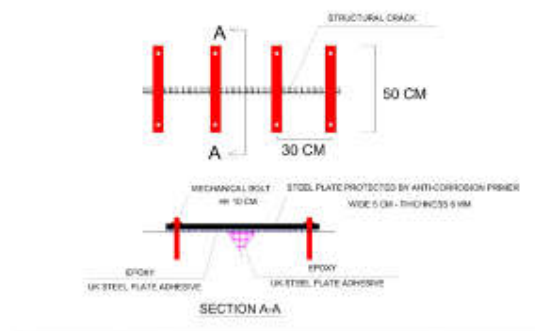


شکل 2- استفاده از ماده MCI حاوی مواد پایه سیلیکاتی ابند بصورت پاششی بر روی سطح جهت حفاظت بتن (شکل سمت راست پروژه راه‌آهن اصفهان نائین)، تزریق ماده MCI در بتن (شکل وسط-پروژه مقاوم‌سازی پایه‌های پل راه‌آهن بندرعباس به فین) و حفاظت میلگردهای پایه‌های پل‌های بتنی در مرحله تعمیر و کندن کاور بتن (شکل سمت چپ-پروژه مقاوم‌سازی پل‌های راه‌آهن بندرعباس به حاجی‌آباد)

در مرحله تعمیر سازه‌ها در روش‌های جدید ملات‌های تعمیراتی الیاف دار اصلاح شده با پلیمر و حاوی مواد بازدارنده خوردگی تولید شده است که نیازهای پایا سازی و حفاظت سازه‌های موجود را در مرحله تعمیرات برآورده می‌سازد. یکی دیگر از الزامات پایا سازی سازه‌های موجود تزریق و یا دوخت ترک‌ها در سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. تزریق ترک‌ها در بتن با مواد پایه اپوکسی انجام می‌گردد. دوخت ترک‌ها می‌تواند بروش بخیه زنی (Stitching) که در دستورالعمل‌های ACI 224-1R-93 جزئیات آن موجود می‌باشد، صورت پذیرد.



شکل 3: جزئیات دوخت ترک‌ها بوسیله تسمه فلزی و چسب پایه اپوکسی



شکل 4: جزئیات دوخت ترک‌ها بوسیله تسمه فلزی و چسب پایه اپوکسی در پروژه مقاوم‌سازی پل‌های محور قم به اراک

### استفاده از تسلیح خارجی در عملیات بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها

#### 1-2- استفاده از تسلیح خارجی بروش استفاده از شیت الیاف FRP و یا لمینیت FRP

الیاف کربن مصالح دارای مقاومت و سختی زیاد هستند که عمدتاً به دو شکل ورقه، تسمه برای تقویت سازه‌های بتنی استفاده می‌شوند. استفاده از FRP به دلیل داشتن مزیت‌های سرعت اجرای بالا، وزن کم، عدم ایجاد محدودیت معماری و مقاومت بالا در عملیات مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های بتنی توجیه‌پذیر می‌باشد. برای دال‌ها بتنی تقویت خمشی با ورقه برای سطوح کوچک و تسمه برای طول‌های متوسط و بلند استفاده می‌شود. استفاده از ورقه‌های الیاف کربن برای سطح زیر دال به دلیل اجرای بسیار مشکل در حالت متداول و قابلیت اطمینان چسبیدن ورق خصوصاً در حضور نیروهای دینامیکی و ارتعاشی به سطح عملاً مرسوم نیست. ملاحظات و ضوابط آئین‌نامه‌ای طراحی و استفاده از الیاف کربن در ACI440-2R-2008 بطور مفصل ارائه شده و موارد مهم آن بصورت زیر می‌باشد:

- نیاز به کنترل کیفی دقیق حین اجرا و اطمینان از استفاده از رزین و چسب سازگار با رزین الیاف
- نیاز به نیروی ماهر آموزش دیده
- نیاز به تسطیح و زیر سازی سطح برای نصب
- نیاز به طراحی دست بالا برای کنترل مد شکست ناگهانی در حالت حدی نهایی
- نیاز به لایه حفاظتی ملات برای برآورده نمودن معیارهای آتش‌سوزی

استفاده از FRP در دور پیچ کردن کامل یا پوشاندن قسمتی از المان، موجب افزایش مقاومت برشی تیرها و ستون‌های بتنی می‌شود. ایجاد محصورشدگی المان سازه‌ای با FRP همچنین می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری اعضای تحت بارگذاری فشاری و خمشی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه شود.

در یک عضو خمشی چسباندن FRP به ناحیه کششی بتن، به گونه‌ای که الیاف موازی با محور طولی عضو باشد، باعث بهبود مقاومت خمشی در المان خواهد شد.



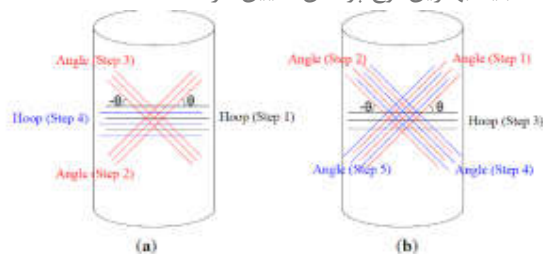


شکل 6: استفاده از لمینیت الیاف کربن در فرآیند مقاوم‌سازی پایه‌های پل‌های راه‌آهن محور بافق-بندرعباس a



شکل 7: استفاده از شست الیاف کربن در فرآیند مقاوم‌سازی پایه‌های پل‌های راه‌آهن محور بافق-بندرعباس

مطالعات گذشته نشان داده است که استفاده از FRP در جهت جانبی، باعث افزایش ظرفیت باربری و کرنشی بتن، تحت بار محوری، می‌گردد که بسته به نوع ستون باید نوع مناسب انتخاب گردد. به عنوان مثال، در الیاف پوششی و ستون‌های استوانه‌ای، اگر FRP به صورت نشان داده شده در شکل (4) و به دو صورت a: (بدون زاویه-زاویه بدون زاویه) و b: (زاویه-زاویه بدون زاویه) نصب گردد، در هر دو حالت، مقاومت محوری فشاری و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به حالت غیر مقاوم حاصل می‌گردد. اما شکل با حالت a، ظرفیت کرنشی و تنش محوری بالاتری از خود نشان می‌دهد. همچنین مطالعات بیان می‌دارد که ترکیب شکل و مقدار زاویه پوشش‌ها، مقاومت و شکل‌پذیری متفاوتی ایجاد می‌سازد که بسته به مقدار تقاضا باید بهترین نوع پوشش تعیین گردد.



شکل (4) دو نوع پوشش FRP در ستون استوانه‌ای

### مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی تحت بار متمرکز

در ستون‌ها با بار محوری متمرکز و مقاوم شده با FRP، افزایش ظرفیت تغییر شکل محوری، به طور چشمگیری نسبت به ستون‌های مقاوم نشده، دیده شده است. این افزایش شکل‌پذیری با سختی الیاف نسبت معکوس دارد به این معنا که

برای افزایش مقاومت، الیاف با شکل پذیری محدودتر مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این، با پوشش FRP، کمانش میلگردهای طولی و گسترش ترک‌ها محدود می‌گردد. نتایج تحقیقات بر روی ستون‌های مقاوم شده با FRP و تحت بار متمرکز نشان می‌دهد که ظرفیت کرنش محوری با شدت بیشتری نسبت به ظرفیت تنش محوری افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایشگاهی بر روی ستون‌های مقاوم شده بیان می‌دارد که افزایش ظرفیت بار محوری، به متغیرهای بسیاری از جمله مشخصه‌های FRP، مقاومت بتن، شکل سطح مقطع و شدت بار محوری بستگی دارد.

### مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی تحت بار با خروج از مرکزیت

در عمل، بیشتر ستون‌های یک سازه، تحت بار محوری با خروج از مرکزیت قرار دارند. که این عامل سبب می‌شود تنش غیر خطی در سطح ستون به وجود آید. مطالعات نشان می‌دهد که به طور کلی بار با خروج از مرکزیت، ظرفیت بار محوری و تغییر شکل محوری ستون را کاهش می‌دهد که با مقاوم‌سازی ستون با الیاف پلیمری، مقداری از این ظرفیت بازیابی می‌گردد. نتایج تحقیقات پیشین بیانگر این است که پوشش‌های طولی FRP، باعث افزایش ظرفیت مقاومت نهایی ستون می‌شوند و پوشش‌های عرضی شکل‌پذیری را در ستون بتن آرمه افزایش می‌دهند. تعداد لایه‌های FRP، بر روی ظرفیت بار فشاری تأثیر بسیاری دارد و هر چه قدر خروج از مرکزیت افزایش یابد، این ظرفیت برای الیاف ثابت، کاهش می‌یابد. با افزایش قطر ستون مقاوم شده ظرفیت تغییر شکل جانبی افزایش می‌یابد.

### مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی تحت بار ضربه‌ای

ستون‌های پل‌ها، به دلیل افزایش ترافیک، همواره در معرض بار کاملاً دینامیکی وسایل نقلیه قرار دارند که به صورت ضربه‌ای بر آن‌ها وارد می‌شوند و باعث خسارت، شکست ستون‌ها، شکست اتصالات یا در بعضی مواقع شکست کل سازه می‌گردند. مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری روشی مناسب برای مقاوم‌سازی این ستون‌ها می‌باشد.

### مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی تحت بار لرزه‌ای

همانگونه که بیان گردید، سازه‌های بتن آرمه ممکن است به طور مناسبی در برابر بارهای لرزه‌ای طراحی نشده باشند. فروشکست ستون‌های بتن آرمه، عموماً به دلیل شکست بتن در اثر محصورشدگی کم، گسیختگی میلگردهای عرضی و کمانش میلگردهای طولی می‌باشند. در ستون‌ها، حداکثر خمش و کرنش در انتهای آن‌ها اتفاق می‌افتد. در حین یک زلزله، نواحی خارج از مرکز پلاستیک، در ناحیه‌ی الاستیک باقی می‌مانند و خسارت در مفاصل پلاستیک ایجاد می‌گردد. بنابراین طول مفاصل پلاستیک مهم می‌باشد. زیرا که علاوه بر نمایش طول نواحی آسیب‌دیده‌ی ستون، در ظرفیت دریافت نیز تأثیرگذار است.

وقتی مقدار پوشش FRP ستون‌های مقاوم‌سازی شده افزایش یابد، ظرفیت انحنای سطح مقطع افزایش می‌یابد، اما ظرفیت دریافت می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. این موضوع به دلیل این است که ظرفیت دریافت از طول مفاصل پلاستیک و انحنای مقطع توأمان تأثیر می‌پذیرد. اما به طور کلی مطالعات نشان می‌دهند که کامپوزیت‌های FRP، ظرفیت دریافت و بار جانبی را افزایش داده و خسارت را به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهند.

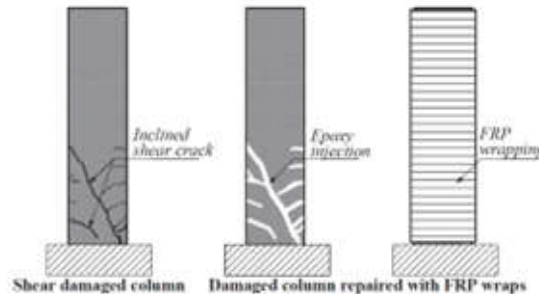
### مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی در برابر خوردگی

ستون‌های بتن آرمه، قابلیت خوردگی در شرایط جوی دریایی، آتش و یخ‌زدگی را دارا هستند. رفتار ستون‌های مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری نشانگر مقاومت ستون در برابر این شرایط می‌باشد. این موضوع به ویژه در مورد پوشش‌های کربنی CFRP، صادق می‌باشد. علاوه بر این، سرعت خوردگی در ستون‌های آسیب‌دیده مقاوم شده به شدت کاهش می‌یابد.

نحوه‌ی استفاده از پوشش‌های الیاف پلیمری به صورت شماتیک در شکل (5) نمایش داده شده است.

## مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی در برابر برش

تحقیقات نشان داده است که پوشش‌های FRP، رفتار کلی برشی ستون‌های بتن آرمه را بهبود می‌بخشد اما تغییر شکل‌های برشی به دلیل مودهای شکست و پارگی الیاف، کاهش می‌یابد. انتقال تنش از بتن به FRP، یک پارامتر مهم برای مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری می‌باشد، زیرا ممکن است باعث شکست ترد گردد.



شکل (5) استفاده از پوشش FRP در ستون آسیب‌دیده

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، علت استفاده از الیاف پلیمری در مقاوم‌سازی ستون سازه‌های بتن آرمه ذکر گردید و نتایج کلی حاصل از مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات بیانگر این موضوع هستند که به طور کلی استفاده از الیاف FRP، باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌ها تحت انواع بارها و خوردگی می‌باشند.

## منابع

- Hassan Baji, Hamid Reza Ronagh, Chun-Qing Li, (2016) "Probabilistic assessment of FRP-confined reinforced concrete columns", *Composite Structures*, Volume 153, 2016, Pages 851-865, ISSN 0263-8223.
- Brighton, David. (2014). FRP Composites Strengthening of Concrete Columns under Various Loading Conditions. *Polymers*. 6. 1040-1056. 10.3390/polym6041040
- Shahzad Saleem, Amorn Pimanmas, Winyu Rattanapitikon (2018), "Lateral response of PET FRP-confined concrete", *Construction and Building Materials*, Volume 159, Pages 390-407, ISSN 0950-0618.
- Hanan Al-Nimry, Ahmad Soman, (2018), "On the slenderness and FRP confinement of eccentrically-loaded circular RC columns", *Structures*, Volume 164, 2018, Pages 92-108, ISSN 0141-0296.
- Kim, J. (2018). Mainshock-aftershock response analyses of FRP-jacketed columns in existing RC building frames. *Engineering Structures*. 165. 315-330. 10.1016/j.engstruct.2018.03.017

ساختمان‌های بتن آرمه به دلیل ویژگی‌هایی همچون ارزانی و سهولت اجرا همواره نظر سازندگان را برای به‌کارگیری آن در ساخت‌وساز جلب کرده است. در سال‌های اخیر بهسازی و تقویت ساختمان‌های موجود از موضوعات اصلی صنعت ساختمان و همچنین تحقیقات دانشگاهی به شمار رفته است. هدف از بهسازی می‌تواند افزایش مقاومت، شکل‌پذیری و یا کاهش اثرات حرارت بر روی المان باشد. مقاوم‌سازی اعضای بتنی با مصالح کامپوزیتی FRP روش نسبتاً جدیدی به شمار می‌رود. مصالح FRP خواص فیزیکی مناسبی دارند که می‌توان به مقاومت کششی بالا و ضخامت و وزن کم آن‌ها اشاره کرد. در ستون‌های بتنی استفاده از FRP ضمن افزایش ظرفیت برشی ستون، مد گسیختگی آن را از حالت برشی

به خمشی تغییر داده و شکل پذیری را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. دور پیچی اعضای فشاری با الیاف FRP باعث افزایش مقاومت فشاری آن ها نیز می شود. این امر همچنین باعث افزایش شکل پذیری اعضا تحت ترکیب نیروهای محوری و خمشی می شود. در این مقاله می خواهیم اثرات FRP را بر روی رفتار ستون بتن آرمه بررسی کنیم. موارد بررسی شده نشان می دهد که استفاده از FRP تأثیر به سزایی در مقاومت و همچنین شکل پذیری دارد.

### حالت های شکست یک ستون بتن آرمه

به طور کل دو حالت برای شکست ستون بتن آرمه در حالت حد نهایی باربری در نظر گرفته شده است:

#### شکست فشاری ستون

در این حالت ستون با خرد شدن بتن شروع به شکست می کند و سپس با افزایش فشار، فولادهای مقطع نیز تسلیم می شوند و در نهایت شکست کامل می گردد.

#### شکست کششی ستون

در این وضعیت نیز شکست مقطع ستون با تسلیم قسمتی از فولادهای مقطع در کشش در یک طرف مقطع آغاز شده و سرانجام با خرد شدن بتن در وجه دیگر ستون تکمیل می شود.

وقوع هر یک از حالت شکست به نسبت لنگر خمشی به بار محوری وارد بر ستون بستگی دارد؛ به طوری که در یک ستون با فولادگذاری متفاوت و در یک محدوده وسیع تغییر خروج از مرکزیت از  $e=0$  تا  $e=\infty$ ، شکست مقطع به طور تدریجی از شکست فشاری تا شکست کششی تغییر خواهد کرد. حالت های مختلف شکست ستون در ادامه بحث شده است.

#### الف) بار محوری خالص

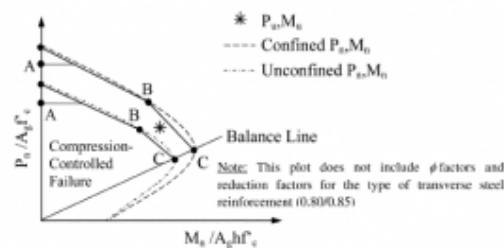
در این حالت فرض می گردد بار محوری بدون کوچکترین خروج از مرکزیتی بر ستون اعمال گردد. این امر سبب می شود که لنگر خمشی بسیار ناچیز شود و همه ی نقاط مقطع همزمان به برسد. در این حالت فولادهای مقطع نیز به تنش تسلیم می رسند.

#### ب) لنگر خمشی خالص

این وضعیت درست بر خلاف وضعیت قبلی است. در این حالت مقدار خروج از مرکزیت بی نهایت در نظر گرفته می شود و عملاً کل مقطع به کشش در می آید. گسیختگی در این حالت کاملاً کششی است.

#### ج) حالت بالانس

در این حالت ترکیب بار محوری و لنگر خمشی به گونه ای است که قسمتی از مقطع تحت کشش قرار گرفته است و درست در همان لحظه ای که بتن در قسمت فشاری به کرنش نهایی 0.003 می رسد، فولادهای کششی نیز به کرنش تسلیم می رسند. این حالت یک حالت مرزی بین شکست فشاری و شکست کششی محسوب می شود.

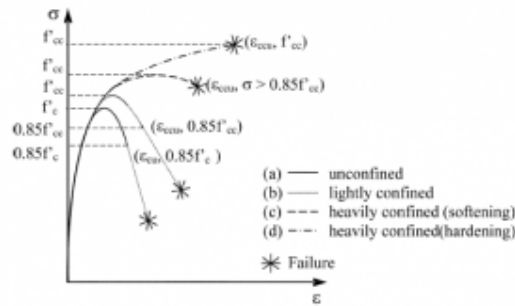


شکل 1: منحنی اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی در ستون

اما در حالت های مابین موارد ذکر شده رفتار المان بستگی به خروج از مرکزیت بار محوری دارد. اگر در حالتی خروج از مرکزیت کمتر از  $e_b$  بود ما با گسیختگی فشاری مواجهیم حال اگر چه مقدار خروج از مرکزیت از مقدار بالانس بیشتر باشد شکست کششی را شاهد خواهیم بود.

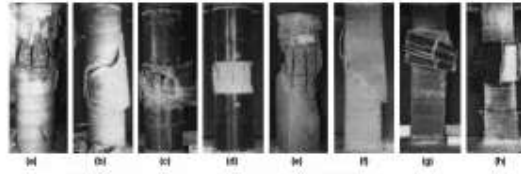
## اثرات FRP روی رفتار ستون بتن آرمه

سیستم پوشش FRP می‌تواند به منظور افزایش مقاومت اعضای فشاری به وسیله محصورسازی استفاده شود. محصورسازی یک عضو بتنی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که الیاف به صورت عرضی در راستای طولی ستون قرار گرفته باشند. در این صورت الیاف عرضی به مانند خاموت‌های عرضی کار خواهند کرد. پوشش FRP محوریت غیرفعال برای عضو فشاری فراهم خواهد کرد به صورتی که لایه‌های FRP تا لحظه شروع ترک‌ها در عضو بدون تنش باقی می‌مانند. در حقیقت FRP در این وضعیت با محصور سازی جلوگیری از ترک بردن بتن کرده و شکل‌پذیری را تا حد زیادی بالا می‌برد. این افزایش شکل‌پذیری همچنین با افزایش مقاومت حد نهایی همراه است. با محصورسازی توسط FRP رفتار ستون به مانند منحنی C یا D خواهد شد.



شکل 2: منحنی رفتاری المان در حالت محصور و غیر محصور

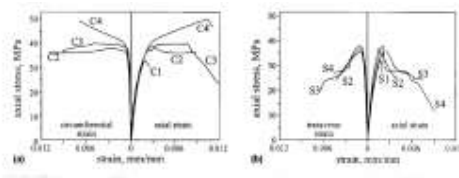
پسیکی و همکاران بر روی 8 نمونه از ستون، اثرات نوع و مقدار FRP و همچنین شکل ستون را بر روی مقاومت محوری و منحنی های تنش کرنش بررسی کردند. در این آزمایش از 4 ستون دایره شکل و 4 ستون مستطیل شکل با نوع و مقدار FRP متفاوت استفاده گردید.



شکل 3: نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته در آزمایش مورد بررسی پسیکی

در انتها نتایج زیر به دست آمد:

- ستون‌های دایره‌ای شکل رفتار بهتری نسبت به ستون مستطیل شکل در شکل‌پذیری دارند. این وضعیت برای هر دو حالت تقویت شده و تقویت نشده صدق می‌کند. پوشش FRP در مقاطع دایره به منظور محصورسازی عضو بتنی به صورت موثرتری عمل می‌کند. سیستم FRP وقتی به صورت عرضی نسبت به راستای طولی عضو قرار می‌گیرد یک فشار محصوریت پیرامونی یکنواخت در راستای شعاع عضو فراهم می‌نماید.
- رفتار ستون‌ها در حالت تقویت شده بستگی به مقدار FRP دارد این در حالت‌های C2 تا C4 در منحنی‌های زیر به خوبی دیده می‌شود.

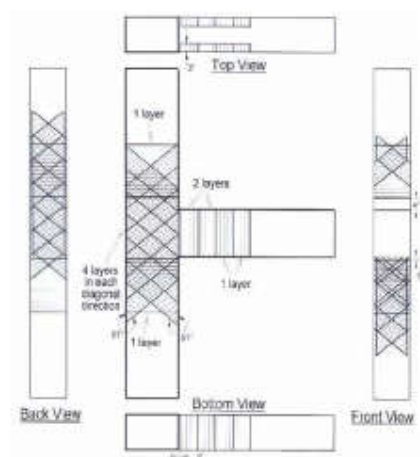


شکل 4: منحنی تنش- کرنش نمونه های آزمایشی

- برای محدود کردن انبساط حجمی المان بتن آرمه باید ژاکت FRP از سختی کافی برخوردار باشد تا شکل پذیری مناسب به المان اعمال گردد و منحنی رفتاری به حالت محصور شده برسد.
- کرنش گسیختگی ژاکتی که در آزمایش به کار رفته بود کمتر از کرنش گسیختگی آن نمونه در تست کوپان کششی است.

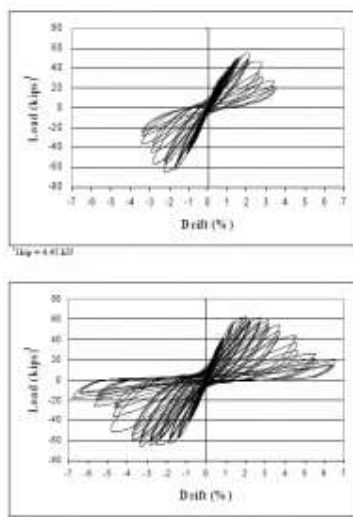
### اثرات FRP بر روی رفتار هیستریزیس

همانطور که در قسمت های قبل اشاره شد، FRP با محصورسازی مانع از گسترش رشد ترک در المان می گردد و همین امر باعث می شود که شکل پذیری المان افزایش یابد. علاوه بر این به دلیل جلوگیری از رشد ترک، المان رفتار بهتری در بارگذاری دینامیک پیدا می کند. پینچینگ یکی از عامل هایی است که به دلیل ترک در مدل رفتاری دینامیکی المان ایجاد می گردد. در این وضعیت قسمتی از لنگر به جای افزایش انرژی در المان برای بستن ترک ها به کار می رود. در آزمایش های انجام شده توسط پانتلیدز و همکاران بر روی دو نمونه اتصال تیر به ستون که در یک حالت بدون ژاکت FRP است و در حالت دوم با ژاکت تقویت شده است.



شکل 5: محل قرارگیری FRP بر روی المان

هر دو نمونه تحت بارگذاری سیکلیک قرار داده شد و در نهایت افزایش شکل پذیری، مقاومت و همچنین جذب انرژی در نمونه ها مشاهده گردید.



شکل 6: نمودار بار به تغییر مکان جانبی در حالت تقویت شده و غیر تقویت شده از FRP فقط برای تقویت المان‌های ساختمانی استفاده نمی‌شود بلکه در بقیه سازه‌ها نیز کاربرد دارد. از سایر کاربردها می‌توان به تقویت پایه پل‌ها در مقابل بار لرزه ای نام برد. شلیک و برنا ستون‌های پایه یک پل را در مقیاس کوچک شبیه‌سازی کرده بوند و بر روی آن بارگذاری سیکلیک اعمال کردند. نتایج بدست آمده به مانند آزمایش پانتلیدز بوده است.

### نتیجه‌گیری

ژاکت‌های FRP با ایجاد محصورسازی توانستند شکل‌پذیری مناسبی در المان ایجاد کنند همچنین با افزایش شکل‌پذیری مقاومت المان نیز افزایش پیدا کرده است. علاوه بر موارد فوق ژاکت‌ها با جلوگیری از رشد ترک در رفتار دینامیک منجر به بهبودی در جذب انرژی شده‌اند.

### منابع

- ACI 440-2R-2008, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP [1]  
Systems for Strengthening Concrete Structures  
Pantelides, Chris P., Chandra Clyde, and L. D. Reveley. "Rehabilitation of R/C [2]  
th World Conference on Earthquake 12 ".building joints with FRP composites  
.2000. *Engineering, Auckland, New Zealand*  
Schlick, Benjamin M., and Sergio F. Breña. "Seismic rehabilitation of reinforced [3]  
Proc. ".concrete bridge columns in moderate earthquake regions using FRP composites  
of the 13th World Conference on Earthquake Engineering,(CD-Rom, paper n. 508),  
.2004. *Vancouver, BC, Canada, August*

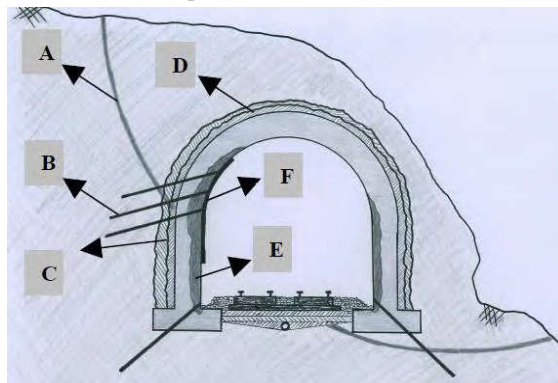
### رفتار لرزه ای تونل‌ها

- مترو از جمله سازه‌های زیرزمینی بوده و به دلیل داشتن شرایطی خاص نیازمند در نظر گرفتن عواملی در ساخت می‌باشند که در زیر به اختصار عنوان نموده‌ایم:
- ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو در شهرهای پر جمعیت برای حل مشکل ترافیک ساخته می‌شوند لذا در صورت آسیب دیدن خطرات جانی و اقتصادی فراوانی ایجاد می‌شود.

- به دلیل احداث اکثر ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو در عمق کم سازه‌های سطحی روی آن‌ها اثر می‌گذارند و متقابلاً رفتار تونل‌های مترو نیز روی سازه‌های سطحی اثر می‌گذارد.
- شهرها معمولاً در مناطق مسطح و آبرفتی توسعه می‌یابند لذا این سازه‌ها نیز در لایه‌های رسوبی منفصل توسعه می‌یابند که این شرایط خاصی را بر سازه‌ها حاکم می‌کند.
- در ایستگاه‌ها معمولاً نیاز به فضا‌های با دهانه بزرگ وجود دارد. که این امر آسیب‌پذیری این سازه‌ها را افزایش می‌دهد.

لذا با توجه به موارد فوق توجه به آسیب‌پذیری و تحلیل و طراحی لرزه‌ای و در گام بعد بهسازی لرزه‌ای ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. روش‌های بهسازی لرزه‌ای متفاوتی برای تونل‌ها وجود دارد که مبتنی بر نوع پوشش و مشخصات خاک محل احداث تونل می‌باشد. در ادامه به معرفی چند روش بهسازی لرزه‌ای تونل‌ها پرداخته می‌شود.

- استفاده از راک بولت برای مهار حرکت گوه‌های سنگی و استفاده از راک بولت به همراه شاتکریت برای تونل‌هایی که در خاک‌های نرم احداث می‌شوند.
  - استفاده از ملات‌های پرکننده مانند پلی‌اورتان جهت پر کردن گوه‌های گسیختگی و ترک‌های خاک اطراف تونل.
  - تزریق دوغاب جهت برقراری سطح تماس کامل بین پوشش و خاک.
  - استفاده از اپوکسی جهت پر کردن ترک‌های پوشش.
- استفاده از ورق [FRP](#) جهت تسلیح و افزایش مقاومت محوری، برشی و خمشی پوشش. شکل زیر [1] نمایی از نقش هریک از روش‌های معرفی شده جهت بهسازی لرزه‌ای تونل را نشان می‌دهد.



شکل 1: (A) سطح گسیختگی، (B) استفاده از راک بولت، (C) تزریق پلی‌اورتان جهت پر کردن گسیختگی، (D) تزریق دوغاب جهت ایجاد سطح تماس بین پوشش و خاک، (E) پر کردن ترک با استفاده از اپوکسی، (F) تسلیح پوشش با استفاده از FRP.

بحث تحلیل و طراحی و بهسازی لرزه‌ای در قالب کتاب‌ها و مقالات طی دو دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفته است، در ادامه به معرفی برخی از مقالات مهم منتشر شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

تیلور و همکاران در سال 2005 با استفاده از مدل‌های عددی پاسخ دینامیکی تونل را قبل و بعد از بهسازی مورد بررسی قرار دادند.

صدقیانی و ضامنی در سال 1391 به بررسی تاثیر گسل بر پایداری تونل در شرایط استاتیکی و دینامیکی پرداخته است. در این مقاله برای مدل‌سازی از روش المان اجزا (DEM) و از نرم‌افزار تجاری (UDECE) استفاده شده است. کورتزیس و همکاران در سال 2013 اثر مشخصات مکانیکی خاک ناحیه اندرکنش خاک و تونل را بر نیروها و لنگرهای خمشی ایجاد شده در پوشش تونل در اثر انتشار امواج S و P با مدل‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار داده است.



مرتضایی و همکاران در سال 2009 در مقاله‌ای پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح را تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک قبل و بعد از مقاوم‌سازی سازه با ورقه‌های FRP مورد بررسی قرار داده‌اند. در مقاله حاضر رفتار لرزه‌ای یکی از ایستگاه‌های مترو شهر کرج مورد بررسی قرار گرفته شده است و در حالت ویژه بهسازی رفتار آن با به کارگیری صفحات FRP به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از توسعه مدل اجزای محدود استفاده گردید.

### مشخصات ایستگاه مترو مورد مطالعه

#### مشخصات ساختگاه

ایستگاه مورد مطالعه یکی از ایستگاه‌های خط 2 متروی کرج می‌باشد وضعیت ژئوتکنیک ساختگاه با مطالعه گزارشات مربوط به مشاهدات حین حفاری و نتایج آزمایشگاهی، به طور کلی خاک زیر سطحی محدوده مورد بررسی را می‌توان در سه گروه لایه خاک دستی خاک ریزدانه و خاک درشت‌دانه طبقه‌بندی نمود. قسمت فوقانی خاک طبیعی محدوده ساختگاه از لایه‌های خاک اغلب ریزدانه رسی (CL) گاهی ماسه یا لای و به ندرت ماسه رس و لای دار (SC) و (SM) تشکیل گردیده است؛ ضخامت این لایه در نواحی مختلف بین صفر تا 15 متر متغیر می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که قسمت تحتانی خاک زیر سطحی ساختگاه از لایه‌های خاک درشت‌دانه اغلب گرد گوشه شن و ماسه رس گاهی لای دار با تراکم متوسط تا بسیار متراکم تشکیل گردیده است. این لایه دارای حداقل ضخامت 10 متر می‌باشد.

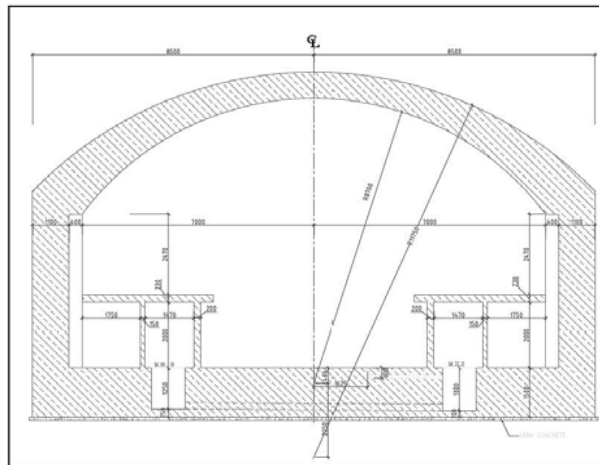
خلاصه‌ای از اطلاعات اولیه ساختگاه در جدول 1 ارائه شده است :

جدول 1 : اطلاعات اولیه ساختگاه

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص (KN/m <sup>3</sup> )	ضریب ارتجاعی (MPa)	نسبت پوآسون	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (KPa)
لایه اول	CL	18.6	40	0.25	20	50
لایه دوم	SC & SM	20.4	80	0.3	36	25

#### مشخصات سازه

پوشش تونل مورد مطالعه از بتن در جار ریز به ضخامت متوسط 35 سانتی‌متر تشکیل شده است. عرض داخلی تونل 17 متر و ارتفاع آن 11 متر می‌باشد، شکل 2 شماتیکی از مقطع پوشش را نشان می‌دهد؛ حفاری تونل در دو مرحله نیم مقطع فوقانی و نیم مقطع تحتانی صورت می‌گیرد. برای حفاری تونل در محل ایستگاه تنها حفاری فوقانی صورت می‌گیرد.



شکل 2: مقطع پوشش

مشخصات بتن پوشش در جدول زیر ارائه شده است :

جدول 2: مشخصات بتن

$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	$\theta$	$f'_c (MPa)$
2500	0.2	20

#### مشخصات FRP

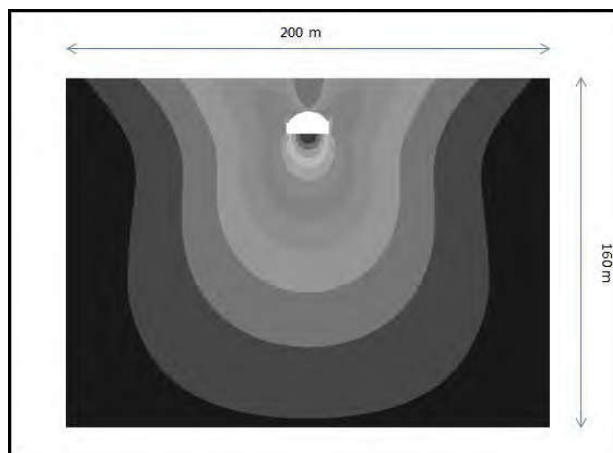
از آنجایی که FRP در بسیاری موارد متشکل از الیاف یک طرفه می‌باشد. فرض Isotropic برای آن دور از واقعیت می‌باشد، بنابراین رفتار FRP در مدل‌سازی Lamina فرض شد، جهت‌گیری الیاف FRP تنها در راستای طولی و عرضی المان‌های پوشش در نظر گرفته شد مدول الاستیسیته و ضریب پواسون جهات مربوطه در جدول زیر ارائه شده است، اعداد 1 و 2 راستای محورهای اصلی می‌باشد.

جدول 3: مشخصات FRP

$E_1 (GPa)$	$E_2 (GPa)$	$\theta$
62	4.8	0.22

#### مدل‌سازی عددی

در تحقیق حاضر به کمک روش اجزای محدود و نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی عددی صورت گرفته شد تا تأثیر FRP بر روی رفتار لرزه‌ای پوشش مورد بررسی قرار گیرد، نمایی از مدل ساخته شده در شکل 3 ارائه شده است.



شکل 3: مدل خاک و لاینینگ در نرم افزار آباکوس

مدل سازی حفاری با کاهش سختی و غیر فعال سازی المان در گام بعدی صورت می گیرد، و اضافه کردن پوشش به جدار تونل با فعال سازی المان پوشش صورت می گیرد، ابعاد مقطع تونل بر اساس پلان ایستگاه مورد مطالعه در نظر گرفته شد، ابعاد المان خاک نیز در گام نخست پنج برابر بزرگترین بعد تونل از جداره تونل تا مرز کناری در نظر گرفته شد، با انجام چندین آنالیز و بررسی ناحیه تأثیر حفاری در نهایت عدد 200 متر برای طول و 160 متر برای عمق قطعه خاک در نظر گرفته شد. رفتار مدل Plain Strain فرض شد و به منظور نصب FRP بر روی دیواره پوشش ضخامت مدل یک متر در نظر گرفته شد.

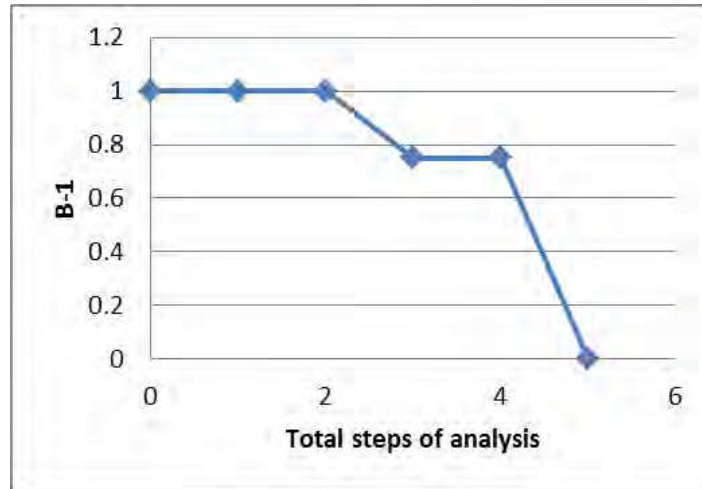
المان های خاک شامل المان های گوه ای شش گره ای (6-noded Wedge element) در ناحیه اطراف تونل و المان های مکعبی هشت گره ای (8-noded hexahedron element) در سایر نقاط قطعه خاک می باشند. المان بندی پوشش نیز با استفاده از المان های گوه ای شش گره ای (6-noded Wedge element) صورت گرفت. مدل رفتاری خاک مدل موهر کلمب و رفتار پوشش الاستیک فرض شد.

### مدل سازی استاتیکی

در گام مدل سازی استاتیکی شرایط تکیه گاهی به منظور جلوگیری از حرکت افقی به مرزهای جانبی مدل اعمال گردید همچنین انتهای مدل نیز به منظور محدود کردن جابجایی قائم مقید شد و درجه آزادی خارج از صفحه مدل نیز بسته شد.

تحلیل استاتیکی مدل در پنج گام انجام شد، در گام اول وزن مخصوص مؤثر به لایه های خاک اعمال شد، اعمال این شرایط تنش های افقی در مدل ایجاد می کند، بنابراین در همین گام مقدار ضریب فشار محاسبه شد. در گام دوم سختی المان های داخل تونل با استفاده از روش کاهش بار کاهش داده شد، فرضیات این روش به این صورت است که در ابتدا فشار وارد بر مرز داخلی فضای زیرزمینی برابر فشار خارجی ناشی از زمین در نظر گرفته می شود، سپس فشار داخلی با ضریب (1-) کاهش داده می شود.

در گام سوم المان های داخل تونل حذف می شوند و نیروهای گره ای ناشی از المان های حذف شده به مرز حفاری اعمال می شوند، سپس این نیروها به میزان 25 درصد کاهش داده می شوند در گام چهارم المان های پوشش به مدل اضافه شده و در گام پنجم نیروهای گره ای وارد به مرز حفاری نیز به تدریج از مرز حذف می شوند.



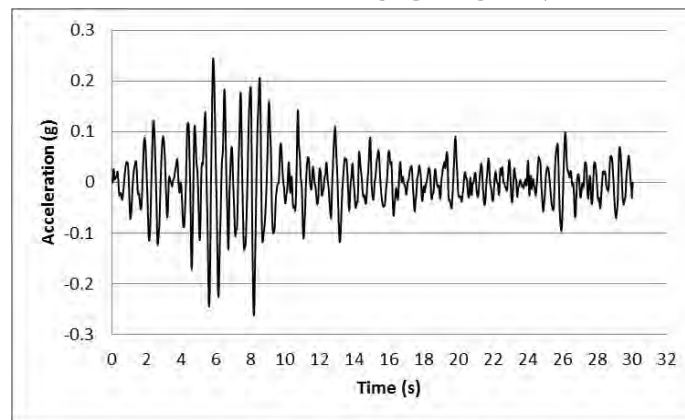
شکل 4: تغییرات ضریب بار در گام‌های مختلف تحلیل

### مدل‌سازی دینامیکی

در زمین طبیعی اطراف سازه زیرزمینی کاملاً نامحدود بوده و موج در یک محیط بینهایت منتشر می‌شود. این در حالی است که در مدل‌سازی عددی فضای زیرزمینی و خاک اطراف آن محدود می‌باشند، در تحلیل استاتیکی محدود کردن خاک اطراف فضاهای زیرزمینی با در نظر گرفتن ناحیه تأثیر فضای زیرزمینی امکان‌پذیر است در حالیکه در تحلیل دینامیکی این امر باعث انعکاس انرژی امواج برشی از طریق مرزها به داخل هندسه مدل می‌شود، برای جلوگیری از این امر استفاده از مرزهای جاذب یا میراگرها در مدل‌های عددی رایج است. در این تحلیل از مرزهای جاذب با بکارگیری المان نامحدود از نوع مکعبی هشت گره‌ای که از یک سمت نامحدود هستند استفاده شده است. این المان‌ها مانند میراگر عمل کرده و به این ترتیب رفتار مجموعه خاک و سازه با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌شود.

### بارگذاری لرزه‌ای

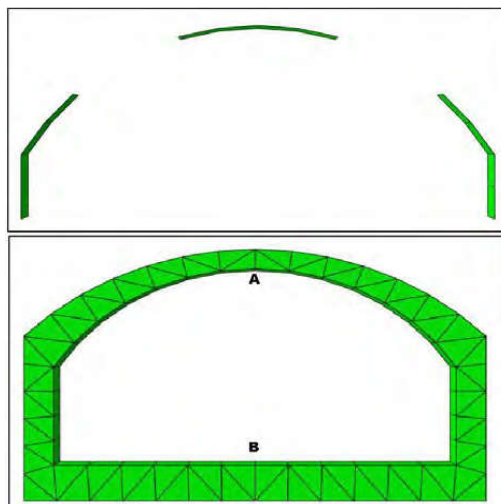
بار لرزه‌ای به صورت شتاب نگاشت به پای سازه اعمال گردیده است.



شکل 5: شتاب‌نگاشت اعمال شده به مدل

### نتایج مدل‌سازی عددی

نتایج بدست آمده در سه موقعیت مختلف پوشش، بر اساس ارزیابی و مقایسه نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی تاج، دیواره‌های تونل و کف تونل در دو مدل تسلیح یافته با FRP و بدون FRP ارائه شده است. محل قرارگیری شیت های FRP در مدل تسلیح یافته با FRP در تاج و دیواره‌های تونل می‌باشد، شکل (6) موقعیت شیت های FRP را در مدل نشان می‌دهد.

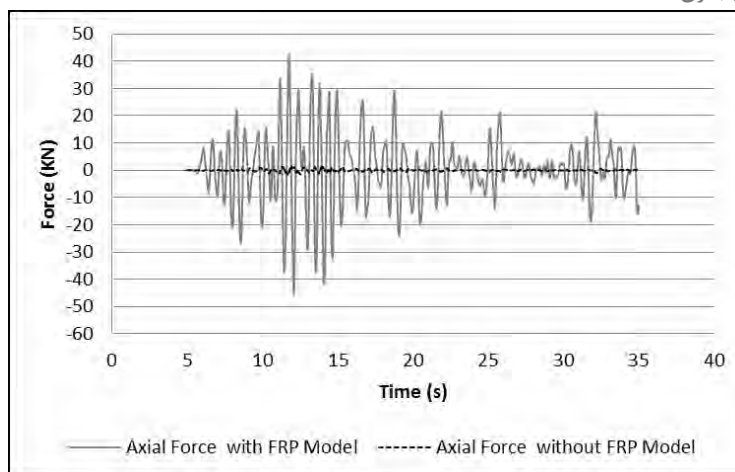


شکل 6: موقعیت شیت های FRP در دیواره داخلی پوشش

ابتدا تأثیر وجود FRP در تاج تونل (A) و سپس تأثیر آن بر روی کف تونل (B) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### بررسی نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در تاج تونل

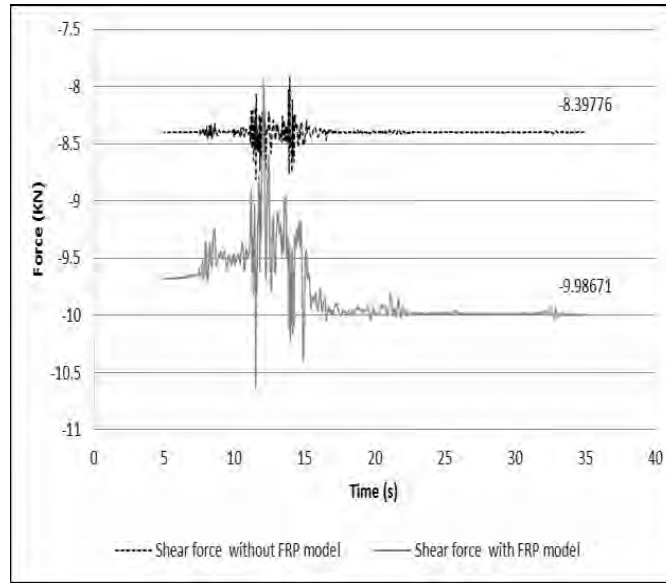
نیروی محوری تغییرات نیروی محوری مقطع تونل در محل تاج برحسب زمان در نمودار زیر ارائه شده است، در مدل تسلیح یافته با FRP نیروی محوری بیشتری ایجاد شده است که این امر حاکی از افزایش سختی مقطع تسلیح یافته با FRP نسبت به مدل بدون FRP است.



شکل 7: تاریخچه نیروی محوری تاج تونل

### نیروی برشی

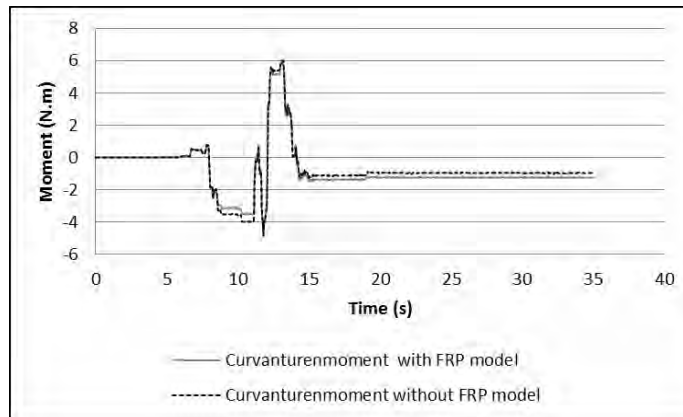
تغییرات نیروی برشی مقطع تونل در محل تاج برحسب زمان در نمودار زیر ارائه شده است.



شکل 8: تاریخچه نیروی برشی تاج تونل

### لنگر خمشی

مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در راستای طولی پوشش در دو مدل اندک است، دلیل این امر کوچک بودن بعد عمود بر صفحه پوشش (یک متر) نسبت به بعد داخل صفحه آن است.



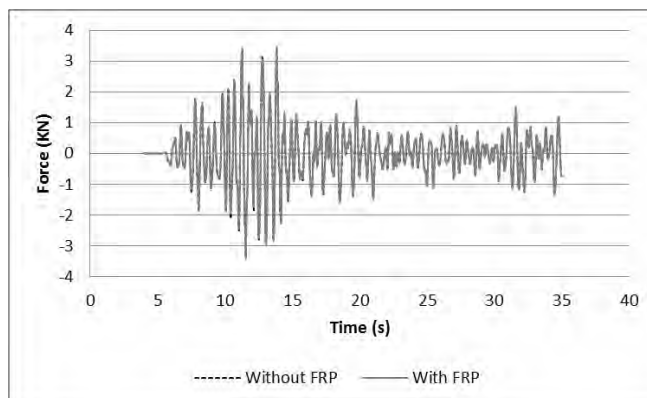
شکل 9: تاریخچه لنگر خمشی تاج تونل

### بررسی نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در کف تونل

کف تونل در هر دو مدل فاقد FRP است، با توجه به این موضوع در ادامه رفتار لرزه‌ای کف تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### نیروی محوری

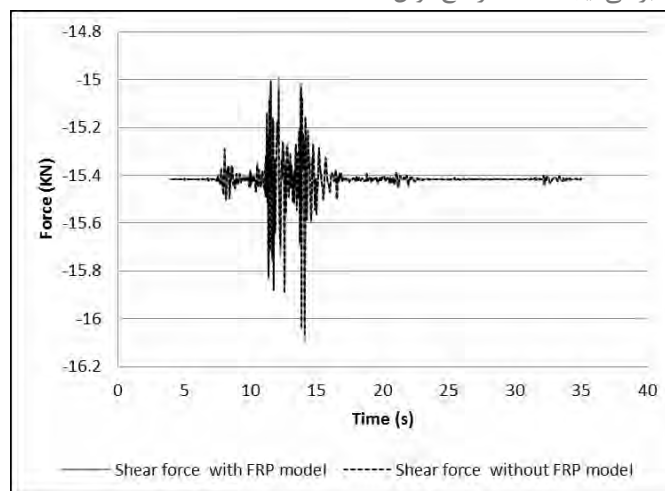
شکل زیر تاریخچه زمانی تغییرات نیروی محوری را در کف تونل نشان می‌دهد.



شکل 10 : تاریخچه نیروی محوری کف تونل

### نیروی برشی

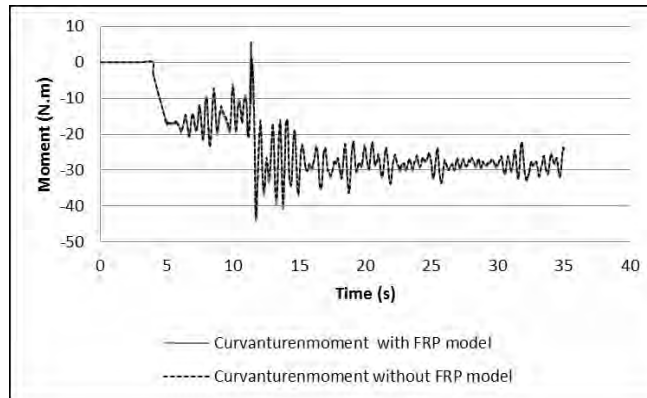
تاریخچه زمانی تغییرات نیروی برشی کف تونل ارائه شده است، با مقایسه مقادیر ماکزیمم نمودار تغییرات نیروی برشی در تاج و کف تونل این نتیجه حاصل می‌شود که حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در مقطع کف تونل 35٪ بیشتر از حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در تاج تونل است.



شکل 11 : تاریخچه نیروی برشی کف تونل

### لنگر خمشی

با مقایسه تاریخچه زمانی لنگر خمشی در تاج و کف تونل حداکثر لنگر خمشی مثبت در کف تونل حدود 10 برابر تاج تونل است.



شکل 12: تاریخچه لنگر خمشی کف تونل

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی عددی صورت گرفت تا تأثیر FRP بر روی رفتار لرزه ای پوشش مورد بررسی قرار گیرد. اثر FRP از طریق بررسی نیروی محوری، نیروی برشی در مقطع تونل، و لنگر خمشی ایجاد شده در راستای طولی تونل در دو المان واقع در تاج (A) و کف تونل (B) مورد بررسی قرار گرفت، المان واقع در تاج تونل در مدل اول بدون FRP و در مدل دوم با شیت های FRP تسلیح یافته بود.

المان واقع در کف تونل در هر دو مدل فاقد FRP بود. نتایج تحلیل عددی نشان داد که استفاده از شیت های FRP روی سطح داخلی پوشش تونل بر روی ظرفیت محوری و برشی مقطع پوشش تأثیرگذار است. تأثیرات FRP بر روی رفتار لرزه ای پوشش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در جدول زیر درصد اختلاف میانگین نیروهای داخلی و لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش، ارائه شده است.

جدول 4: اختلاف میانگین نیروهای داخلی و لنگر خمشی

اختلاف میانگین (%)

موقعیت المان	نیروی محوری	نیروی برشی	لنگر خمشی
تاج (A)	97.9	13.3	14.5
کف (B)	55.53	5.42	3.75

میزان نیروی محوری ایجاد شده در مقطع در حالت بهسازی با شیت های FRP نسبت به مدل بدون FRP به طور متوسط 97.9% در المان تاج تونل و 55.35% در المان کف تونل افزایش یافته که این امر حاکی از افزایش سختی و ظرفیت محوری پوشش تسلیح یافته با FRP است.

میزان نیروی برشی ایجاد شده در مقطع در حالت بهسازی با شیت های FRP به طور متوسط 13.3% در المان تاج و 5.42% در المان کف افزایش یافته است.

ظرفیت خمشی نیز به طور متوسط 14.5% در تاج و 3.75% در کف تونل افزایش یافته است.

با توجه به داده های ارائه شده در جدول 1 نتیجه گیری می شود که بیشترین تأثیر FRP بر افزایش ظرفیت محوری پوشش است، نتیجه دیگری که استنباط می شود تأثیر موضعی FRP بر افزایش سختی پوشش است، بطوری که افزایش ظرفیت پوشش در محل تاج 61% بیشتر از افزایش ظرفیت در کف تونل است.



1. " بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP؛ رامین پورزند، مرتضی اسماعیلی، عبدالحسین بغلانی؛ دومین کنفرانس ملی زلزله؛ 1394.
2. *Multi-objective seismic retrofit "Se Woon Choi, Yousok Kim, Hyo Seon Park  
",method for using FRP jacketsin shear-critical reinforced concrete frames  
Composites: Part B 56 (2014) 207–216*
3. محمد حسین صدقیانی، شیما ضامنی، " بررسی تأثیر گسل بر پایداری تونل، "؛ نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ماه 1391.

روش‌ها و مصالح مختلفی جهت مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه وجود دارد، اما در سال‌های اخیر استفاده از ورق‌های FRP بسیار رواج یافته و مطالعات بسیاری انجام گرفته تا بتوان از آن‌ها بجای ورق‌های فولادی استفاده نمود. به طور کلی استفاده از کامپوزیت‌ها از دهه 1940 آغاز شد در ابتدا کاربرد نظامی داشت و بیشتر در صنایع هوا و فضا استفاده می‌شد. ولی ویژگی‌های منحصر بفرد آن مانند وزن کم و استحکام بالا باعث شد تا به سرعت در سایر زمینه‌ها از جمله صنعت ساختمان‌سازی، صنعت خودروسازی، ساخت اسکله و شناورها (کشتی‌ها و قایق‌های تندرو سازه‌های دریایی) نیز بکار رود.

### معرفی FRP

FRP (Fiber Reinforced Polymer) فیبرهای پلیمری تقویت شده نوعی ماده کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین (ماده چسبنده) از جنس پلیمر احاطه شده است. به بیان ساده‌تر کامپوزیت‌های FRP متشکل از یک سری فیبر یا الیاف که درون رزینی به عنوان ماتریس یا زمینه قرار گرفته که در آن‌ها الیاف بلند و ممتد عامل ایجاد مقاومت هستند و رزین آن‌ها را در جای خود نگه داشته و بار را از سازه به الیاف منتقل می‌کند و در طول آن‌ها به طور یکنواخت توزیع می‌کند. همچنین رزین باعث حفاظت الیاف می‌شود بنابراین الیاف و رزین اجزای اصلی کامپوزیت‌های FRP هستند. البته در کنار این مواد، مواد دیگری نیز در نقش فیلر و هاردنر و مواد مضاعف جهت بهبود خواص ماده حاصل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### انواع محصولات FRP

#### 1. میلگردهای FRP

فولادها به طور مختصر در مقابل خوردگی به وسیله قلیایی بتن محافظت می‌شوند و معمولاً سبب دوام خدمت پذیری سازه می‌گردند. برای خیلی از سازه‌هایی که در محیط‌های مهاجم از قبیل سازه‌های دریایی، پل‌ها، پارکینگ که در معرض نمک‌های یخ قرار می‌گیرند، ترکیب رطوبت، افزایش دما و محیط کلریدی، قلیایی بتن را کاهش می‌دهد و سبب خوردگی فولادها می‌شود که در نهایت موجب تخریب سازه بتنی می‌شود به همین خاطر امروزه از میلگردهای ساخته شده با مواد پلیمری FRP در این سازه‌ها استفاده می‌کنند. به دلیل اینکه میلگردهای FRP دارای یک رفتار غیر شکل‌پذیر می‌باشند لذا موارد استفاده این میلگردها محدود به سازه‌هایی می‌شود که مهم‌ترین مشکل آن‌ها خوردگی یا مشکلات الکترومغناطیسی می‌باشد. رفتار مکانیکی میلگردهای FRP با میلگردهای فولادی تفاوت دارد، لذا نحوه طراحی سازه‌های بتنی با استفاده از میلگردهای FRP دارای تغییراتی نسبت به میلگردهای فولادی می‌باشد. میلگردهای فولادی دارای رفتاری تقریباً همسانگردی می‌باشند ولی میلگردهای FRP به بتن تأثیر می‌گذارد. مصالح FRP برخلاف مصالح فولادی، رفتار الاستیک خطی از خود نشان می‌دهند. در شکل 1 انواعی از میلگردهای FRP نشان داده شده است.



شکل 1 : میلگردهای FRP

ورقه‌های FRP، ورقه‌های با ضخامت چند میلی‌متر از جنس FRP هستند. این ورقه‌ها با چسب‌های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می‌شوند. از ورقه‌های FRP جهت تعمیر و تقویت سازه‌های آسیب دیده (ناشی از زلزله و یا ناشی از خوردگی آب‌های یون دار) استفاده می‌شود. ورق‌های FRP از لحاظ شکل‌پذیری می‌توانند به شکل پارچه‌ای و صفحه‌ای باشند. شکل پارچه‌ای خاصیت شکل‌پذیری بالای دارد و راستای الیاف در آن می‌تواند در یک جهت یا دو جهت باشد. صفحه‌ها بر خلاف الیاف پارچه‌ای شکل‌پذیر نیستند و در ضخامت و عرض‌های مختلف یافت می‌شوند.

## 2. ورق‌های FRP

ورق‌های FRP، ورقه‌های با ضخامت چند میلی‌متر از جنس FRP هستند. این ورقه‌ها با چسب‌های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می‌شوند. از ورقه‌های FRP جهت تعمیر و تقویت سازه‌های آسیب‌دیده (ناشی از زلزله و یا ناشی از خوردگی آب‌های یون دار) استفاده می‌شود. ورق‌های FRP از لحاظ شکل‌پذیری می‌توانند به شکل پارچه‌ای و صفحه‌ای باشند. شکل پارچه‌ای خاصیت شکل‌پذیری بالایی دارد و راستای الیاف در آن می‌تواند در یک جهت یا دو جهت باشد. صفحه‌ها بر خلاف الیاف پارچه‌ای شکل‌پذیر نیستند و در ضخامت و عرض‌های مختلف یافت می‌شوند.

## 3. کابل، نوار و تاندن‌های پیش‌تنیدگی

محصولات شبیه میله‌های FRP، ولی به صورت انعطاف‌پذیر هستند که در سازه‌های کابلی و بتن پیش‌تنیده در محیط‌های دریایی و خورنده کاربرد دارند. این محصولات در اجزاء پیش‌تنیده، در مجاورت آب نیز بکار گرفته می‌شوند.

## 4. پروفیل‌های ساختمانی

مصالح FRP همچنین در شکل پروفیل‌های ساختمانی به صورت I شکل، T شکل نبشی و ناودانی تولید می‌شوند. چنین محصولاتی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای قطعات و سازه‌های فولادی در مجاورت آب تلقیس شوند.

## 5. شبکه کامپوزیتی

شبکه کامپوزیتی FRP محصولاتی هستند که از بر خورد میله‌های FRP در دو جهت و یا سه جهت ایجاد می‌شوند. نمونه‌ای از این محصولات، شبکه کامپوزیتی Nefmac است که از فیبرهای کربن، شیشه‌ای و یا آرمید و رزین و نیل استر تولید می‌شود و برای مسلح کردن بتن مناسب است.

## انواع فیبرهای تشکیل‌دهنده FRP

به طور کلی FRP را بر اساس فیبر تشکیل‌دهنده آن به چندین دسته تقسیم می‌کنند :

### 1. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers)

پلیمرهای مسلح شده با الیافی از جنس کربن

### 2. GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers)

پلیمرهای مسلح شده با الیافی از جنس شیشه

3. (AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers

پلیمرهای مسلح شده با الیافی از جنس آرمید

4. (BFRP (Bazalt Fiber Reinforced Polymers

پلیمرهای مسلح شده با الیافی از جنس بازالت

### برخی از موارد کاربرد FRP

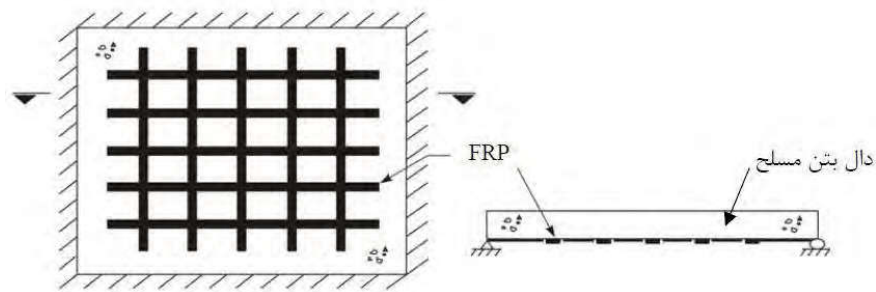
1. افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون‌ها، تیرها، دال‌ها و اتصالات بتن آرمه
2. تقویت مخازن فولادی و بتنی
3. تقویت سازه‌های فراساحل و دریا
4. سازه‌های مقاوم در برابر انفجار
5. تقویت تیر و ستون‌های چوبی
6. تقویت دودکش‌های بتن آرمه با مصالح بنایی
7. تقویت دیوارهای بتن آرمه
8. تقویت دیوار تونل‌ها
9. تقویت لوله‌های بتنی یا فولادی
10. تقویت دیوارهای آجری و مصالح سنتی
11. ساخت دیوارهای ساحلی
12. سقف‌های پشت‌بام‌های صنعتی
13. نشیمن‌گاه تجهیزات راکتورها
14. سیستم دال کف در محیط‌های خورنده شیمیایی
15. مرمت و تقویت سازه‌های مهم چون بیمارستان‌ها، آثار باستانی و ...

### کاربردهای FRP در تقویت دال‌های بتن آرمه

از FRP در تقویت ستون‌ها، تیرها، اتصالات، دیوارهای برشی بتنی، دیوارهای آجری، پایه و عرشه پل‌ها و ... می‌توان استفاده نمود. تکنیک مقاوم‌سازی ستون‌های مسلح بتنی با استفاده از کامپوزیت‌های FRP به طور گسترده‌ای به جای پوشش نمودن به وسیله فولاد مورد کاربرد قرار گرفته است. در مقایسه با استفاده از تنگ‌ها و مارپیچ فولادی، تکنیک محصورسازی با استفاده از FRP قابلیت این را دارد که محصورشدگی را به صورت پیوسته برای تمام مقطع عرضی ستون تأمین کند. همچنین این مواد دارای خواص ذاتی مطلوبی (نسبت زیاد مقاومت به وزن و مقاومت با در برابر خوردگی و خنثی بودن الکترومغناطیسی) هستند. به گونه‌ای که می‌توان در مقاوم‌سازی یا بازسازی اعضای بتنی به طور موفقیت‌آمیزی از آن‌ها بهره گرفت.

FRP می‌تواند در تیرها و دال‌های بتنی به عنوان جایگزین تمام یا بخشی از میلگرد کششی مورد نیاز بکار رود. همچنین در اتصالات بتنی می‌تواند استفاده گردد و شکل‌پذیری اتصال را افزایش دهد. تقریباً هیچ روش دیگری نمی‌تواند چنین تأثیری داشته باشد. از FRP در تقویت دیوارهای برشی نیز استفاده می‌گردد. FRP می‌تواند شکل‌پذیری دیوارهای بنایی را افزایش داده و آن‌ها را مهار نماید.

در شکل 2: قسمت‌های تقویت‌شده دال با FRP نشان داده شده است.



شکل 2: قسمت‌های تقویت‌شده دال با FRP

### **تقویت اتصالات با FRP**

اتصالات آسیب‌پذیرترین قسمت سازه بوده و در عین حال سخت‌ترین جزء سازه جهت تقویت می‌باشند. تقویت توسط FRP یکی از مؤثرترین و ساده‌ترین روش‌های تقویت اتصالات سازه می‌باشد.

### **تقویت برشی تیر با FRP**

بهترین شیوه تقویت برشی تیرها Wrapping توسط ورق‌های FRP می‌باشد. همچنین به راحتی و به شکل بسیار مؤثری می‌توان تیرها را توسط FRP تقویت خمشی نمود.

### **تقویت دیوار برشی با FRP**

FRP می‌تواند تأثیر زیادی در تقویت خمشی و برشی دیوارهای برشی داشته باشد.

### **افزایش مقاومت فشاری بتن با FRP**

FRP کاربردهای فراوانی در تقویت ستون‌های بتنی دارد. از FRP می‌توان برای تقویت خمشی ستون‌ها، افزایش مقاومت مشخصه بتن و افزایش شکل‌پذیری (اثر محصورشدگی) استفاده نمود. به علت ضخامت کم ورق‌های FRP، این روش یکی از راه‌های مناسب برای تقویت ستون‌ها است چرا که در معماری ساختمان خللی ایجاد نمی‌نماید. تأثیر عمده تقویت توسط FRP، در ستون‌های دایره‌ای شکل بوده ولی ستون‌های مربع یا مستطیل را می‌توان با گرد کردن گوشه‌ها، به صورت مناسب جهت تقویت با FRP تبدیل نمود.

### **تقویت دال‌های بتن آرمه توسط FRP**

یکی از این اجزاء کمکی برای بهبود خواص دال‌های بتنی که نیاز به تقویت دارند، پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) می‌باشند که در شرایط مختلف با اهداف مختلف و به اشکال مختلف به دال‌ها متصل می‌شوند. استفاده از اجزاء FRP به عنوان تقویت، راه‌حلی مؤثر برای غلبه بر مسائل طول عمر سازه‌های بتن آرمه بنظر می‌رسد.

### **تقویت خمشی دال‌های بتنی توسط FRP**

در دهانه‌های تقویت‌شده با CFRP در دال‌های دو طرفه، ورق‌های CFRP می‌توانند در برای حفظ و حتی افزایش ظرفیت اولیه بار دال‌های بتنی دو طرفه دهانه دار مورد استفاده قرار بگیرند. برای دال‌های تقویت شده با CFRP ظرفیت حمل بار در مقایسه با تیر ضعیف شده 12.5 – 24 افزایش یافته است. راه‌های سنتی برای تقویت اضافی با میلگرد فولادی و دهانه ظرفیت بار بیشتری را در مقایسه با دال‌های بدون دهانه حاصل می‌کند.

رفتار دال‌ها تقویت‌شده با FRP تست شده تا زمان نقص الاستیک دو خطی بوده، سفتی دال‌ها تقویت شده با تقویت شبکه CFRP پس از آغاز ترک‌ها در مقایسه با دال تقویت شده با فولاد به طور قابل توجهی کاهش یافت. برای اطمینان از سفتی انعطافی کلفی جهت کنترل اعوجاج، نیاز به نسبت‌های تقویت بالاتر است.

برای تقویت شبکه FRP گنجانده شده در بتن، میله‌های عرضی مهار میله‌های طولی را تأمین می‌کند. در این مورد فضا بندی میله‌های شبکه ترک را کنترل می‌کند. اعوجاج تابعی از سفتی تقویت و نسبت واقعی تقویت مورد استفاده در

دال است. دال‌ها تقویت شده با FRP خصوصاً با نسبت کوچکتر تقویت، قبل از ایجاد نقص از طریق اعوجاجات نسبتاً بزرگ و عرض ترک‌های وسیع هشدار لازم را می‌دهند.

تست‌های آزمایشگاهی اعتبار و اثر بخشی تقویت با شبکه CFRP برای استفاده در دال‌های بتنی تقویت شده را نشان می‌دهد که در آن طراحی عمدتاً تحت تنظیم معیار قابلیت سرویس‌دهی است. تطابق نزدیک در رفتار انعطافی بین دال‌های مختلف نشان می‌دهد که دال‌های تقویت شده با FRP باید با یک کشش انعطافی معادل تقویت با فولاد بیش تقویت شوند شبکه‌های CFRP NEFMAC C19-R می‌توانند بعنوان تقویت بتن به جای میله‌های فولادی 15 میلی‌متری در شبکه‌های به اندازه 225 در 150 میلی‌متری استفاده شوند.

FRP می‌تواند مقاومت دال‌های بتنی را در برابر خمش چندین برابر افزایش داده و شکست دال‌های بتنی تقویت شده با FRP به صورت ناگهانی و غالباً در محل ایجاد نقص در FRP روی می‌دهد.

تعداد ترک‌های ایجاد شده در دال‌های بتنی تقویت شده با FRP نسبت به دال نرمال تحت بارهای مختلف کاهش چشمگیری شبکه ترک را کنترل می‌کند. اعوجاج دال تابعی از سفتی تقویت و نسبت واقعی تقویت مورد استفاده در دال است. دال‌های تقویت شده با FRP، خصوصاً با نسبت کوچکتر تقویت، قبل از ایجاد نقص از طریق اعوجاجات نسبتاً بزرگ و عرض ترک‌های وسیع هشدار لازم را می‌دهند.

نوارهای CFRP به صورت پوشش بیرونی، ظرفیت باربری دال‌ها تقویت شده را افزایش می‌دهد. علاوه بر این در دال‌های تقویت شده نسبت به دال تقویت نشده، ترک‌های ایجاد شده کوچکتر و به طور یکنواخت‌تری توزیع گردیده‌اند.

مقاوم‌سازی دال‌های با میزان فولاد کششی 25 درصد فولاد متعادل، مقاومت نهایی تیر در حدود 31 – 62 درصد افزایش می‌دهد.

مقاوم‌سازی دال‌های با میزان فولاد کششی 50 درصد فولاد متعادل، مقاومت نهایی تیر را در حدود 22 – 50 درصد افزایش می‌دهد.

در شکل 3، قسمت‌های تقویت‌شده‌ی دال بتنی با ورق‌های CFRP نشان داده شده است.



شکل 3: قسمت‌های تقویت‌شده‌ی دال بتنی با ورق‌های CFRP

### مزایای استفاده از FRP

1. مقاومت کششی بیشتر از فولاد
2. مقاومت در مقابل نیروهای خمشی و برشی
3. مقاومت در برابر ضربه، خوردگی، حریق و اسیدها و بازها (به طور کلی ترکیبات شیمیایی)
4. ظرفیت بالای جذب ارتعاشات
5. عدم هدایت الکتریکی و حرارتی
6. عدم تأثیرپذیری در میدان‌های مغناطیسی و فرکانس‌های رادیویی (برای مثال دستگاه‌های بیمارستانی)

7. وزن کم (یک چهارم وزن آرماتور فولادی و چگالی حدود 20٪ فولاد)

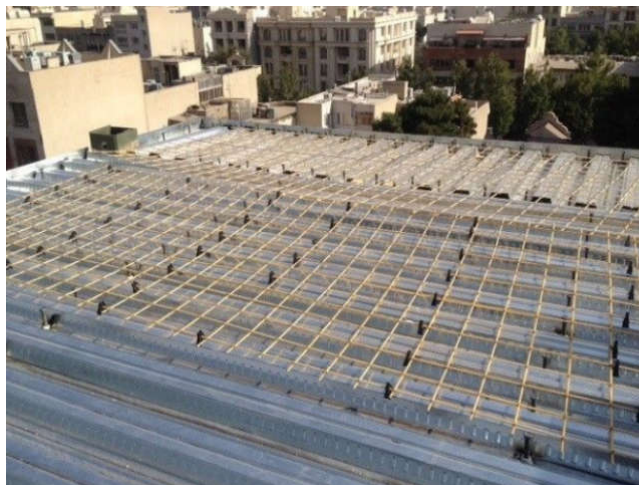
8. حمل و نقل آسان و سرعت اجرای بالا

### نتیجه‌گیری

- از مناسب‌ترین راه‌های تقویت قسمت‌های مختلف سازه استفاده از FRP با توجه به ضخامت کم آن‌ها می‌باشد، همچنین در معماری ساختمان نیز خللی ایجاد نمی‌کند.
- این کامپوزیت‌ها جایگزین مناسبی برای آرماتورهای فولادی در سازه‌های دریایی و عرشه پل‌ها می‌باشند.
- با توجه به وزن نسبتاً کم مصالح FRP در تقویت سازه‌ها بار مرده سازه افزایش چشم‌گیری ندارد، استفاده از مصالح FRP راهکار مناسبی است.
- با توجه به مزایای ذکر شده سازه‌هایی که در برابر خوردگی و میدان‌های مغناطیسی حساسیت زیادی دارند، استفاده از مصالح FRP پیشنهاد می‌شوند.

### منابع

1. "مقاوم‌سازی دال بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های FRP"، طاهر محمدپناه، ارسطو ارمغانی، کنفرانس بین‌المللی مهندسی شهرسازی، عمران و معماری، 1395.
2. "دستورالعمل مقاوم‌سازی ساختمان‌ها با استفاده از FRP" مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، 1392.
3. "ارزیابی تجربی تأثیر امتدادهای تقویت دال‌های دو طرفه با کامپوزیت FRP"، یاسری و کشاورزی، مجموعه مقالات همایش ملی نوین در مهندسی، عمران



### پیوستگی بتن و میلگرد FRP

امروزه مصالح نوین در صنعت ساخت‌وساز پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند. از جمله این محصولات الیاف‌های FRP هستند که خصوصیات و مشخصات فوق‌العاده‌ای دارند. از جمله این خصوصیات مدول الاستیک بسیار این مواد است بطوریکه مدول CFRP حدود 70 درصد و GFRP حدود 20 درصد فولاد می‌باشد. این پایین بودن سفتی، موجب کرنش بیشتر آن‌ها شده و بنابراین بتن‌های مسلح شده با FRP انعطاف‌پذیرتر هستند و تغییرشکل‌های بیشتری را تحمل می‌کنند. علاوه بر این، این مواد برخلاف فولادها، شکست ترد دارند. بنابراین رفتارهای متفاوتی از سازه‌های FRC در مقایسه با سازه‌های SRC انتظار می‌رود. از این رو، نیازی اساسی برای توسعه مدل‌های تحلیلی بر اساس خواص ویژه و مدهای شکست میله‌های FRP وجود دارد. از جمله ابعاد اساسی رفتار سازه‌ها گسترش چسبندگی است، از این رو چسبندگی متصدی برقراری و نگهداری برهم کنش بین تقویت‌کننده و بتن اطراف در حین انتقال بار از یکی به دیگری است. بنابراین کیفیت چسبندگی تأثیر بسزایی بر تشکیل ترک دارد و از این رو بر فاصله بین ترک‌ها و پهنای

ترک‌ها اثر می‌گذارد. مکانیزم اصلی در گسترش چسبندگی برهم کنش فولاد-بتن، برهم کنش مکانیکی بین سطح دنداندار یا تغییر شکل یافته میله تقویت‌کننده و بتن است. بهرحال، مکانیزم‌های دیگر به مانند اصطکاک سطح و چسبندگی شیمیایی نیز نقش دارند. بررسی حاضر برخی از کارهای تحلیلی انجام شده در زمینه بررسی استفاده از تقویت‌کننده‌های غیر آهنی در سازه‌های بتنی تقویت‌شده را ارائه می‌دهد. این پژوهش بر مبنای مطالعه درباره ویژگی‌های پیوستگی بتن و میلگرد FRP در تست استاندارد بیرون کشیدن Pullout انجام شده است.

### مروری بر آئین‌نامه ACI440

هدف از این روش آزمون برای اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی از طریق آزمایش Pullout به کارگیری در آزمایشات آزمایشگاهی است که در آن متغیر اساسی سائز و نوع میلگرد FRP است. روش آزمون نباید برای ایجاد طرح ارزش‌های (مقادیر) پیوستگی و توسعه طول‌ها برای میلگردهای نصب‌شده در بتن بکار برده شود.

هدف از این روش آزمون تعیین رفتار (حالت) پیوستگی برای شناسایی مواد، تحقیق و توسعه و اطمینان کیفی است. حالت پیوستگی، وابسته‌ی شکل‌بندی آزمون خواهد شد که ممکن است هم تجزیه و تحلیل و هم طرح را تحت تأثیر قرار دهد. نتیجه اولیه‌ی آزمون، مقاومت پیوستگی آزمون برای بتن با وزن نرمال است که در کاربرد میلگردهای FRP به عنوان جوش‌ها و میلگردهای مستحکم‌کننده، عامل مهمی در نظر گرفته شده است.

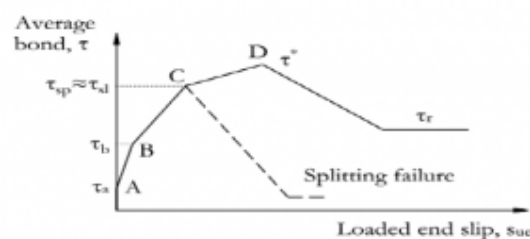
همچنین ممکن است این روش آزمون برای تعیین همگونی یک محصول یا یک برداشت (برخورد) برای یک شرایط مرتبط با اثر آن بر توسعه‌ی پیوستگی بین میلگرد FRP و بتن بکار برده شود. نتایج بدست آمده از این روش آزمون باید تنها برای اهداف مقایسه‌ای برای مقایسه کردن پارامترها یا متغیرهای مقاومت پیوستگی بکار برده شود، ممکن است روشی برای ایجاد تأثیرات محیطی بلند مدت بر پیوستگی برای بتن، که شامل عامل کاهش محیطی برای میلگردهای نصب شده در بتن است بکار برده شود.

### بررسی رفتار چسبندگی بین میلگردهای FRP و بتن

انتظار می‌رود رفتار چسبندگی میله‌های FRP به بتن متفاوت از میله‌های فولادی سنتی باشد از این رو پارامترهای کلیدی که بر عملکرد اتصال اثر گذارند متفاوت می‌باشند. برخی از این پارامترها عبارتند از:

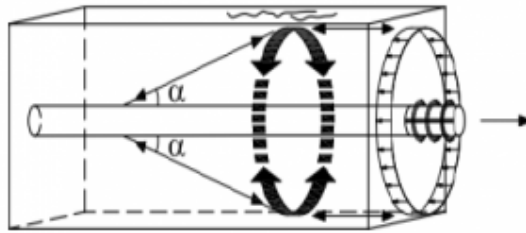
- مدول الاستیک پایین‌تر FRP در مقایسه با فولاد، در هر دو جهت طولی و عرضی.
- سفتی برشی بسیار کمتر از فولاد است
- مقاومت برشی ماتریس رزین کمتر از فولاد است، فاکتوری که انتظار می‌رود مقاومت تغییرشکل‌های سطحی میله را کنترل می‌کند.

عملکرد چسبندگی بین میله و بتن برای شکل‌های مختلف سطح میله متفاوت است. وقتی میله‌های با سطح صاف بررسی می‌شوند، اتصال اساساً هم با چسبندگی بین سطح میله و بتن اطراف و هم با مقاومت برشی درون لایه‌های بین لایه‌های پی‌درپی فیبرها در سطح میله حاصل می‌شود. در نتیجه در سطح صاف، هیچ ترک کششی اتفاق نمی‌افتد و غیرمحمتمل است که نیروهای جدایش اتصال گسترش یابند. شکل زیر توصیفی از برهم‌کنش بین میله FRP تغییر شکل یافته با بتن را نشان می‌دهد.



شکل 1: تغییر تنش میانگین اتصال با جابجایی انتهای بارگذاری شده یک FRP با طول قرار کوتاه

در این شکل در ابتدای بارگذاری، بخش OA، مکانیزم اصلی مقاومت در برابر بار خارجی چسبندگی شیمیایی بین دو ماده است. در این مرحله، هیچ لغزش قابل اندازه‌گیری وجود ندارد. برای مقادیر تنش اتصال بیشتر چسبندگی شیمیایی شکسته می‌شود و مکانیزم اتصال متفاوتی شکل می‌گیرد (بخش AB). جابجایی در انتهای بارگذاری شده میله افزایش می‌یابد و شکل‌های سطحی میله تنش‌های زیادی را در بتن ایجاد می‌کند، بنابراین ترک‌های ریز ایجاد شده در نوک شکل‌های سطحی میله اجازه جابجایی میله را می‌دهد. این اعتقاد وجود دارد که شروع ترک‌های ریز به دلیل تغییر شکل‌های سطح نرم میله‌های FRP نسبت به میله‌های فولادی تأخیر دارد. با افزایش جابجایی میله، بخش BC، تنش‌های حاصل شده افزایش قابل توجهی می‌یابد و اجزای شعاعی نیروهای اتصال در برابر حلقه‌های تنش کششی گسترش یافته در بتن متعادل می‌شوند (شکل 2). اگر میله بطور مناسبی محصور نشده باشد و مقدار حلقه‌های تنش از مقاومت کششی بتن بیشتر شود، ممکن است ترک‌های جدایش در طول میله FRP مشاهده شود. اگر مقاومت به جدای شکافی ایجاد شود، بخش CD، تنش اتصال می‌تواند به مقاومت ماکزیمم اتصال برسد. با حرکت هر دو انتهای میله (انتهای بارگذاری شده و بارگذاری نشده)، سفتی اتصال کاهش می‌یابد.



شکل 2: تعادل اجزایی شعاعی نیروهای اتصال در برابر حلقه‌های تنش کششی

بر اساس نسبت بین مقاومت بتن و مقاومت برشی برآمدگی‌های سطحی، چهار مد متفاوت از شکست اتصال اتفاق می‌افتد:

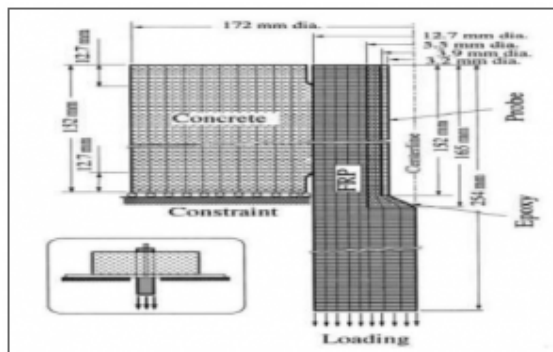
- برش قسمت یا همه برآمدگی سطح میله. مقاومت اتصال میله‌های FRP با مقاومت برشی بین لایه‌های پشت سر هم فیبر یا با مقاومت برشی برآمدگی میله کنترل می‌شود. بنابراین، افزایش در مقاومت بتن با افزایش مقاومت اتصال میله FRP ارتباطی نخواهد داشت.
- شکست برشی بتن: بتن در برابر برآمدگی سطح میله متلاشی می‌شود؛ بنابراین مقاومت اتصال اساساً با مقاومت برشی بتن کنترل می‌شود.
- مد ترکیبی: با سطح متوسطی از مقاومت بتن، احتمالاً مدی مرکب از دو شکست بالا اتفاق می‌افتد.
- فشرده شدن: در نتیجه استحکام کم در جهت شعاعی، میله ممکن است که در امتداد بتن فشرده شود. در این مورد اتصال با اصطکاک بین برجستگی‌های میله و بتن ایجاد می‌شود. زمانی که ماکزیمم تنش اتصال حاصل می‌شود، مکانیزم تحمل بار از بین رفته و مقاومت اتصال باقیمانده اساساً به مقاومت اصطکاکی وابسته می‌شود.

### مطالعات عددی

مدل‌ها در سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند (1) مقیاس عضو (member scale) جایی که رفتار اتصال با قانون جابجایی-اتصال تعریف می‌شود و هر عضو تقویت کننده به صورت یک عضو میله‌ای تک‌بعدی عمل می‌کند؛ (2) مقیاس دندانه (rib scale)، که شکل پیچیده سطح میله می‌بایست ایجاد شده و المان بندی شود، و (3) مقیاس میله (bar scale)، که وضعیت سطح میله بصورت صریح مدل نمی‌شود و اثر برهم کنش مکانیکی آن بصورت غیر مستقیم و استفاده از توصیفی واسط تعریف می‌شود. حالت اول مقیاس عضو برای مطالعه موضعی رفتار جابجایی-اتصال در نقطه‌ای دلخواه از سازه مفید نیست.



همچنین، مدل‌های مقیاس دندانه، به دلیل فرضیات ساده‌سازی، به معادلات کیفی مکانیزم‌های اکتیو اتصال محدود می‌شوند. بنابراین مدل‌های مقیاس میله به عنوان مؤثرترین مطالعه بر مکانیزم‌های اتصال معرفی می‌شوند. برای نشان دادن مثال‌هایی از گروه‌های مختلف مدلسازی، برخی از تحقیقات عددی انجام شده در ادامه آورده می‌شود. مثالی از مدل مقیاس دندانه کار انجام شده توسط Bakis, CE و همکارانش است که از برنامه المان محدودی برای ایجاد مدل دو بعدی، متقارن محور، غیرخطی برای نمونه بتن میله FRP به همراه کرنش‌سنج (شکل 3) استفاده کرده‌اند. مدل با المان‌های چهار گره‌ای ایجاد شده است. فشار تماسی، با قید شعاعی اولیه ایجاد شده، و اصطکاک کولمب با المان‌های دو بعدی مدل شده است در حالی که چسبندگی شیمیایی با المان‌های فنر غیرخطی که بین همه گره‌های مجاور بتن و FRP در طول تماس پل زده مدل شده است.



شکل 3: مدل المان محدود دوبعدی متقارن محوری از میله با سطح صاف

پارامترهای کنترل اتصال، با اطلاعات تست بیرون کشیدن تعیین شده، که برای میله با سطح صاف بسختی تعیین می‌شود. پیش‌بینی‌های المان محدود در رابطه با وابستگی جابجایی و توزیع کرنش حلقوی و طولی در طول اتصال با داده‌های تجربی تطبیق داشته است. با بررسی‌های پارامتریک، استحکام عرضی میله‌های با سطح صاف به عنوان مهم‌ترین خواص کنترل‌کننده اتصال معرفی شده است. اصطکاک ایجاد شده با فشار تماسی شعاعی و چسبندگی شیمیایی نیز از مکانیزم‌های اتصال می‌باشند. مدل ایجاد شده توسط achillides و همکارانش مثالی جدید از مدل مقیاس میله است. مکعب بتنی FRP با استفاده از المان‌های دو بعدی مدل شده است. بتن و میله‌های FRP بترتیب با المان‌های صفحه‌ای چهار گره‌ای و المان مربعی دو گره‌ای مدل شده‌اند. برهم کنش اتصال بین دو ماده با المان‌های فنر مدل شده است که داده‌های ورودی ارتباط بین بارگذاری و کشش فنر است. داده‌های تجربی تست بیرون کشیدن در طول تماس کم برای کالیبره کردن ویژگی‌های فنر استفاده شده است.

### مدل تست بیرون کشیدن میله

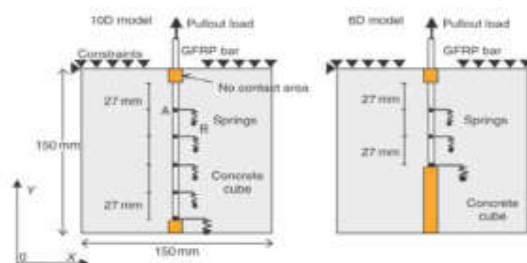
روند مدل تست شامل دو هدف اصلی است. هدف اول کمک به فهم چگونگی گسترش تنش اتصال در تماس بین FRP و بتن در حین بیرون کشیدن میله است. این کار از نتایج تجربی قابل استنباط نیست زیرا که هیچ کرنش سنجی را نمی‌توان در طول تماس میله بدلیل اثرگذاری بر رفتار تماسی، قرار داد. از این‌رو، برای مانیتور کردن رفتار اتصال میله FRP قرار گرفته در بتن در حین تست، از نتایج تحلیلی استفاده می‌شود. هدف دوم از این تحلیلات، توسعه روندی برای پیش‌بینی رفتار اتصال طول‌های قرار گرفته بزرگ‌تر تحت بار کششی با استفاده از اطلاعات تجربی از نمونه‌های با طول قرار کوچک‌تر است. این هدف کاربردی عملی دارد زیرا که هدفش کاهش نیاز به تست تعداد زیادی نمونه برای بررسی تأثیرگذاری طول تکیه‌گاه بر مقاومت میانگین اتصال است این حقیقت پذیرفته شده است که اندازه طول اتصال در مقاومت میانگین اتصال میله تأثیر دارد.

تحلیل با خواص کاملاً الاستیک برای بتن و FRP انجام شده است از این‌رو فرض شده است که ترک‌خوردگی بتن اهمیت کتری در شرایط تست بیرون کشیدن دارد. به علاوه، مدل الاستیک از این جهت که حلی پایدارتر از مدل غیر

خطی ایجاد می‌کند برای بررسی رفتار اتصال میله‌های FRP ترجیح داده شده است. نتایج بررسی‌های تحلیلی با نتایج تجربی بدست آمده از تست‌های بیرون کشیدن مقایسه شده است. تحلیل حاضر اساساً بر رفتار میله‌های 13.5 mm GFRP تمرکز کرده است. به‌رحال روند توصیف شده برای بررسی رفتار اتصال انواع میله‌های تقویت‌کننده قابل استفاده است در صورت که داده‌های تجربی تست بیرون کشیدن موجود باشد.

### توصیف مدل

نمونه‌های بتن و FRP با المان‌های دوبعدی مدل شده‌اند. بتن با المان‌های مربعی صفحه‌ای چهار گره‌ای با ضخامت 150 mm و مدول یانگ  $E=30$  GPa مدل شده است در حالی که المان‌های میله‌ای دو گره‌ای با سطح مقطع مربعی با مساحت 143.13 میلی‌متر مربع و  $E=45$  GPa برای مدل‌سازی میله FRP استفاده شده است. میله و بتن با المان‌های غیرخطی فنر با فواصل 27 mm (دو برابر قطر میله) به یکدیگر لینک شده‌اند. استفاده از این فاصله خاص و منحنی بار جابجایی فنر بعداً توضیح داده خواهد شد. برای مدل کردن اندازه‌های مختلف طول اتصال استفاده شده در کارهای تجربی، چهار مدل که تنها در تعداد فنرهای رابط فرق دارند بررسی شده است. فرض می‌شود که هر فنر سهم اتصال فاصله‌ای به اندازه 27 mm از کل طول اتصال میله را به عهده دارد. مدل‌سازی G10D میله‌ای با قطر 13.5 mm دارد و با 5 فنر رابط، اتصال بررسی می‌شود و مدل‌سازی نمونه G6D میله 13.5 mm GFRP که طول اتصالی برابر با 81 mm دارد و با استفاده از 3 فنر اتصال بررسی می‌شود در شکل 4 نشان داده شده است. فنرها نقطه A از میله را به نقطه B از بتن وصل می‌کنند. این دو نقطه دارای مختصات یکسانی هستند که در شکل برای بهتر نشان دادن فنرها، این دو نقطه جدا از هم نشان داده شده‌اند.

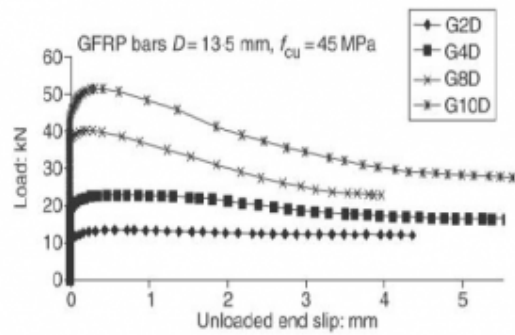


شکل 4: مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی نمونه‌های G10D 45 و G6D 45

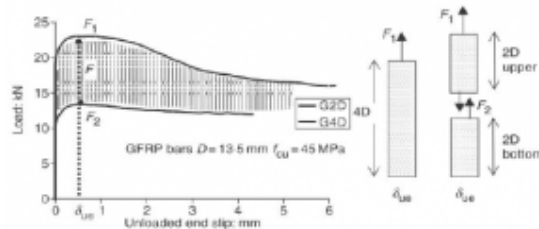
مدل مشابه تست تجربی از سطح بالایی در جهت Y مقید می‌شود. برای جلوگیری از حرکت‌های جزئی مدل در جهت X در حین بیرون کشیدن میله، گوشه بالا سمت چپ مدل نیز در جهت X بالا سمت چپ مدل نیز در جهت Y و در اینکرمنت‌های کوچک به میله اعمال می‌شود. این بار بصورت جابجایی اعمال می‌شود بنابراین امکان مطالعه بر رفتار اتصال پس از رسیدن به مقدار نهایی وجود دارد.

### خواص فنر

نقش اصلی المان‌های فنر در این مدل شبیه‌سازی برهم کنش اتصال بین میله و بتن اطراف در حین بیرون کشیدن است. داده‌های ورودی مورد نیاز که رفتار فنرها را مشخص می‌سازند شامل مقادیر انبساط و نیروهای مرتبط اعمالی به فنر است. در مدل حاضر، انبساط فنر با جابجایی میله و نیروی مرتبط بصورت تابعی از مقاومت اتصال میله تعریف می‌شود. برای تعیین منحنی بار-جابجایی اتصال، داده‌های تجربی از تست‌های بیرون کشیدن استفاده شده است. شکل 5 منحنی‌های بار-جابجایی انتهای بارگذاری شده و انتهای بارگذاری نشده برای چهار نمونه که دارای میله‌های GFRP 13.5 mm هستند را نشان می‌دهد. برای توصیف منحنی‌های بار-جابجایی انتهای بارگذاری شده و بارگذاری نشده نمونه‌های G4D و G2D با جزئیات بیشتر بررسی می‌شود.



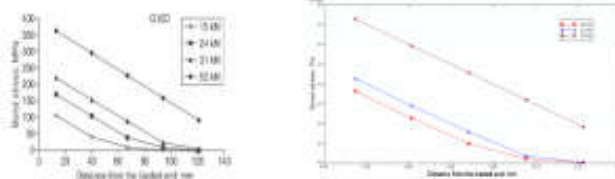
شکل 5: منحنی‌های تجربی بار-جابجایی انتهای بارگذاری شده و بارگذاری نشده میله‌های GFRP 13.5 mm فرض می‌شود که منحنی طول اتصال D4 با دو تا منحنی طول D2 برابر باشد که در شکل 7 این موضوع نشان داده شده است. جابجایی انتهای بارگذاری نشده، تابعی از بار F1 است که مرتبط با طول اتصال D4 است، اما از طرف دیگر نیز بار داخلی F2 به طول اتصال D2 پایینی مرتبط می‌شود. اختلاف بین F1 و F2 مقدار بار F می‌شود که سهم اتصال D2 بالایی جابجایی خاصی را تعیین می‌کند. سهم اتصال D2 بالایی در منحنی بار - جابجایی انتهای بارگذاری نشده در اتصال D4 ناحیه هاشور زده شده بین دو منحنی D2 و D4 است. منحنی حاصل F در شکل 6 نشان داده شده است. این منحنی برای همه فنرهای مدل بجز برای آخرین فنر لحاظ شده است.



شکل 6: سهم طول اتصال D2 بالایی در رفتار اتصال میله است.

### نتیجه‌گیری

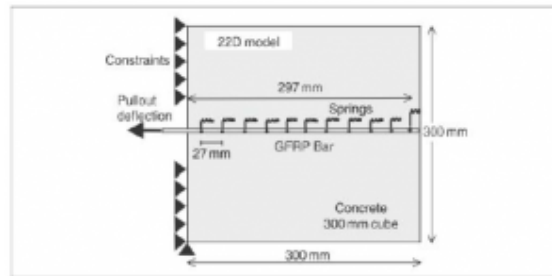
با بررسی نتایج مشاهده شد که با یافته‌های قبلی ارائه شده در مقاله مشابه بودند. نتایج تنش تماسی در طول تماس در شکل زیر نشان داده شده است که نتایج شبیه‌سازی دوباره با نتایج نشان داده شده در مقاله در هر دو حالت برای انتهای بارگذاری شده و نشده مشابه است. یکی از اهداف مطالعه تحلیلی بحث مشاهده گسترش اتصال در حین بیرون کشیدن میله FRP است. هر چند که نتایج تجربی شواهد مشخصی از آنچه که در خارج از طول اتصال می‌دهد (اندازه‌گیری‌های بار و جابجایی)، هیچ اطلاعاتی از اینکه چطور رفتار اتصال در امتداد طول اتصال میله گسترش می‌یابد وجود ندارد. اینجا جایی است که مطالعات تحلیلی می‌تواند به فهم بهتر رفتار اتصال میله FRP در بتن کمک کند. شکل زیر توزیع تنش اتصال و نرمال در امتداد طول اتصال مدل G10D را نشان می‌دهد. در بار کم بیشینه تنش اتصال در نقطه بارگذاری میله است. با افزایش بار، تنش اتصال به نظر می‌رسد که در طول اتصال ثابت شود. نزدیک به بیشترین مقدار بار (Km52) بیشینه تنش اتصال نسبت به انتهای بارگذاری نشده جابجا می‌شود. بعد از بیشترین مقدار نیرو، تنش اتصال در تمام طول اتصال کاهش می‌یابد تا مقدار بار مشخصی که رفتار اتصال با اصطکاک میله و بتن کنترل می‌شود.



شکل 7: توزیع تنش اتصال و نرمال در امتداد طول اتصال برای مدل G10D

پیش‌بینی رفتار اتصال در طول تماس‌های بزرگ‌تر:

بعد از پیش‌بینی رفتار اتصال برای طول‌های تماس کوچک از D10 مدل بر طول تماس‌های بزرگ‌تر تمرکز می‌کند. در این مورد، داده‌های تجربی برای مقایسه وجود ندارد، از این‌رو نتایج فقط حاصل از مطالعات تحلیلی است. سه طول تماس بزرگ‌تر با طول‌های 297 mm (22D)، 594 mm (44D) و 864 mm (64D) بررسی شده است. فنرهای اتصال میله به بتن در فواصل 27 mm قرار گرفتند و بتن مکعبی ابعادی بزرگ‌تر از حالت قبل دارد. هندسه یکی از این بتن‌ها که دارای طول تماس D22 است در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 9: مدل برای طول تماس‌های بزرگ‌تر

مطالعات تحلیلی مدل‌های بالا نشان داده‌اند که مقاومت اتصال میله FRP با افزایش طول اتصال کاهش می‌یابد. مقاومت بیشینه میانگین برای طول‌های اتصال مختلف نشان داده شده است. از شکل مشاهده می‌شود که نرخ اتصال در طول‌های کوچک‌تر سریع‌تر کاهش می‌یابد.

منابع

1. "مدلسازی پیوستگی بتن و میلگرد FRP توسط نرم افزار Abaqus؛" کمیل مومنی و موسی مظلوم؛ اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران، اسفند ۱۳۹۰.
2. Achillides, Z., Pilakoutas, K.. FE.2016-2017. modelling of bond interaction of FRP bars to concrete. Structural Concrete

### مقاوم سازی سازه های مترو

با توجه به آسیب‌هایی که از طرق مختلف به سازه‌های بتن آرمه وارد می‌شوند، روش‌های مختلف مقاوم‌سازی این سازه‌ها روز به روز گسترش می‌یابد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از غلاف‌ها یا ژاکت‌های بتن آرمه، غلاف‌های فولادی، ورق‌های فولادی و ورق‌های FRP اشاره نمود. استفاده از ورق‌های FRP (Fiber reinforced polymer) روشی نوین است که به دلیل خواصی چون نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت مناسب در برابر خوردگی و حملات شیمیایی، سهولت حمل و نصب به دلیل انعطاف‌پذیری فوق‌العاده آن‌ها و عدم افزایش ابعاد المان‌ها، گسترش یافته است. در گذشته جهت تقویت یا بهسازی سازه‌های موجود به منظور تحمل بار بیشتر یا برطرف کردن ضعف سازه و یا افزایش شکل‌پذیری عموماً از مصالح سنتی استفاده می‌گردیده است که با معرفی مواد مرکب در مهندسی عمران این مصالح با داشتن ویژگی‌های مکانیکی مناسب، گزینه مناسبی برای بهسازی شدند. مواد مرکبی که در مهندسی عمران بکار می‌روند به صورت پلیمرهای مصلح با الیاف FRP می‌باشند. FRP ها مصالحی سبک، با دوام و مقاوم هستند که امروزه به راحتی در دسترس قرار گرفته‌اند. ضخامت نسبتاً نازک ورق‌های FRP کاربرد آنها را بسیار ساده نموده و قابلیت اعمال بر روی اکثر سطوح را امکان‌پذیر می‌نماید. لازم به ذکر است که مانند هر مصالحی FRP ها دارای نقاط ضعفی نظیر حساسیت در مقابل آتش و ضعف در تحمل تنش‌های فشاری می‌باشد.

استفاده از سیستم‌های FRP برای بهسازی و تقویت سازه‌های بتنی از اواسط دهه 80 میلادی در اروپا و ژاپن آغاز شد. در این 25 سال کاربرد این روش تنها به سازه‌های بتنی محدود نمانده و برای انواع سازه‌های بنایی، چوبی و فولادی بکار رفته است.

تاکنون پژوهش‌های نظری و آزمایشگاهی بسیاری بر روی مصالح و بارهای انفجاری انجام شده است. امروزه با گسترش تأسفات حملات تروریستی، تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه یافته است و آئین‌نامه‌های متعددی توسط مراجع مختلف برای تحلیل و طراحی انفجاری ارائه شده است. از طرفی با پیدایش مصالح نوین، گسترش کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران و کاربری مناسب آن‌ها در بهسازی سازه‌های موجود، چشم‌انداز جدیدی در جهت مقابله با این وقایع فراهم شده است.

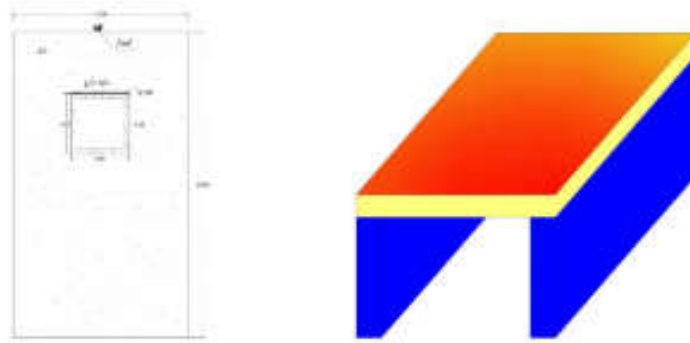
به‌کارگیری روش چیدمان‌های نواری در مقابل پوشش کامل دیوار بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجار مؤثر بوده موجب کاهش در میزان تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت می‌شود. تحلیل‌های انفجاری سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که با روش‌های تقریبی انجام می‌گرفت به قرن‌های 13 و 14 میلادی بازمی‌گردد. در یکی از این پژوهش‌ها، رفتار دال بتنی تحت اثر بار انفجار بررسی شده است. ابتدا به صورت آزمایشگاهی دال بتنی تحت اثر بار انفجاری قرار داده شد و سپس نتایج بدست آمده با مدلسازی توسط نرم‌افزار Ansys و Abaqus مقایسه و پس نمایش صحت مدلسازی کوشیدند رابطه‌ای بین قطر حفره ناشی از انفجار، وزن مواد منفجره و محل انفجار ارائه نمایند و در پایان مقایسه‌ای بین مدل‌ها و نرم‌افزارهای استفاده شده انجام داده و در هر مورد نقاط ضعف و قوت آن‌ها را تشریح نمودند. فیوض و همکاران نیز رفتار سازه‌های فولادی و بتنی را با شکل‌ها و شرایط مختلف تحت اثر بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار داده‌اند و تأثیر شکل و سایر ویژگی‌ها را بر روی عملکرد سازه برای هر دو نوع فولادی و بتنی به وسیله نرم‌افزار المان محدود Abaqus شبیه‌سازی و مقایسه نموده‌اند و عملکرد سازه‌های بتنی را در حالت کلی مناسب‌تر گزارش کرده‌اند.

نگارندگان این پژوهش نیز مقاوم‌سازی دیوارهای بتنی با انواع ورق‌های FRP در ضخامت‌های متفاوت را در مقابل بار انفجار مورد بررسی قرار داده و تأثیر مقاوم‌سازی با استفاده از این ورق‌ها را بر کاهش تغییر مکان بیشینه، نشانه خسارت و تنش در میلگردهای داخل بتن را در برابر بار انفجاری مناسب ارزیابی کرده که در این میان به کارگیری ورق‌های کربنی در مقایسه با ورق‌های شیشه و آرامید مناسب‌تر گزارش شده است. این پژوهش به بررسی کارایی استفاده از مصالح مرکب بر عملکرد دیوارهای بتنی در برابر انفجار پرداخته است. بدین صورت که دیوار بتنی مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای مسلح با الیاف شیشه‌ای (GFRP) تحت اثر بار انفجاری قرار گرفته است.

با توجه به مطالب بیان شده، جهت بررسی اثر GFRP ها بر سازه‌های مترو با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus، تأثیر این ورق‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

### مدل عددی

در این مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود سه‌بعدی Abaqus، یک مدل تونل مترو بتنی با مقطع مستطیلی در نظر گرفته شده است. این مدل با ورق GFRP پوشانیده شده است و در داخل زمین و در حجمی از خاک قرار دارد. در بالای این حجم خاک، بار ترافیک ناشی از وسایل نقلیه وجود دارد. همچنین در این مدل بار انفجاری بر روی سطح خاک وارد می‌شود و خاک و سازه مترو را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این مدل عددی دارای ابعاد 5.5 متر و به ضخامت 0.4 می‌باشد که داخل حجم خاکی به ابعاد 25 در 15 متر قرار دارد و فاصله آن از سطح زمین 5، 7.5 و 12.5 متر متغیر می‌باشد. جنس خاک از مصالح ماسه می‌باشد و جنس سازه مترو از بتن. شکل 1 نشان دهنده بار انفجار وارده بر روی سقف سازه پوشیده شده از ورق شیشه‌ای می‌باشد.



شکل 1: نمایی از مدل

### مصالح خاکی

در تحقیق حاضر از ماسه به عنوان مصالح خاکی استفاده شده است. مشخصات این خاک مطابق جدول زیر در نظر گرفته شده است.

جدول 1: خصوصیات مصالح خاکی

پارامتر	واحد	ماسه
وزن واحد:	$\text{KN/m}^3$	۱۹
مدول یانگ	mpa	۳۰
ضریب پواسون	-	۰.۳

### بتن

مقاومت فشاری بتن در پژوهش 35 مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب در آن از مدل خسارت مومسانی بتن استفاده شده است. مقادیر تنش و کرنش پلاستیک مورد نیاز در این مدل از گزارش نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین گرفته شده است. مشخصات مورد استفاده برای مدلسازی بتن در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2: مقادیر تنش و کرنش پلاستیک بتن در کشش و فشار

کرنش در کشش	تنش کششی (MPa)	کرنش در فشار	تنش فشاری (MPa)
0.0000	5.3	0.0000	17.5
0.000176	5.31	0.00038	25.7
0.001539	8.5	0.00189	34.9
-	-	0.00218	35
-	-	0.00456	28

### ویژگی مصالح

ماده مرکب به کار گرفته شده در این پژوهش GFRP است. به منظور بررسی اثر تغییر ضخامت بر پارامترها، ضخامت ورق‌های GFRP در نظر گرفته شده 2 و 1 و 3 میلی‌متر است. مشاهده می‌شود که نامگذاری این ورق‌ها بر اساس وزن واحد سطح آن‌ها صورت گرفته است و همچنین مقاومت کششی نهایی و مدول کششی الیاف شیشه در جدول 3 مشاهده می‌شود.

جدول 3 : مشخصات فیزیکی و مکانیکی ورق های GFRP

Physical Properties			
Product Name	G400	G800	
Fiber Material	E-Glass	E-Glass	
Areal Weight	0.083 lb/ft <sup>2</sup> (400 gr/m <sup>2</sup> )	0.166 lb/ft <sup>2</sup> (800 gr/m <sup>2</sup> )	
Fabric Width	20 in (508 mm)	20 in (508 mm)	
Nominal Thickness	0.006 in/ply (0.151 mm/ply)	0.012 in/ply (0.302 mm/ply)	
Tensile Properties			
Ultimate Tensile Strength	500 ksi (3450 Mpa)	Composite	245 ksi (1694 Mpa)
Tensile Modulus	11200 ksi (77 Gpa)		
Ultimate Rupture Strain	4.48%	Composite	2.20%

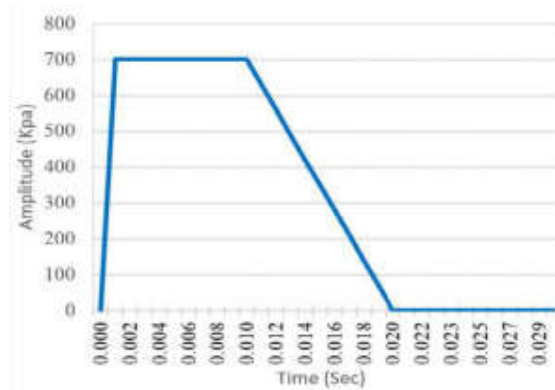
### بارگذاری

بارگذاری انفجاری به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. در این پژوهش برای ساده‌سازی و کاهش زمان عملیات شبیه‌سازی رایانه‌ای مدل‌ها از وابستگی مکانی بارگذاری صرف‌نظر شده و تنها به توزیع زمانی بار پرداخته شده است. به سخن دیگر، توزیع فشار ناشی از انفجار به صورت یک فشار یکنواخت ولی تابع زمان بر روی سطح خاک اعمال شد. این امر را می‌توان با استناد به آیین‌نامه انفجار انجمن ساخت سازه‌های فولادی آمریکا مورد قبول دانست. بر طبق این آیین‌نامه، اگر فواصل محل انفجار تا سازه از نصف کوچک‌ترین بعد سازه بیشتر شود می‌توان با فرضی مناسب فشار وارده بر سازه را به صورت یکنواخت در نظر گرفت. در این مطالعه فشار اعمالی هم ارز با فشار ناشی از انفجار 95 کیلوگرم TNT در فاصله 5، 7.5 و 12.5 متری از سازه در نظر گرفته شده است. فشار وارده در طول زمان کل 0.2 ثانیه اعمال شده که در جدول 4 نمایش داده شده است.

جدول 4 : دامنه زمانی بارگذاری مدل و فشار وارده

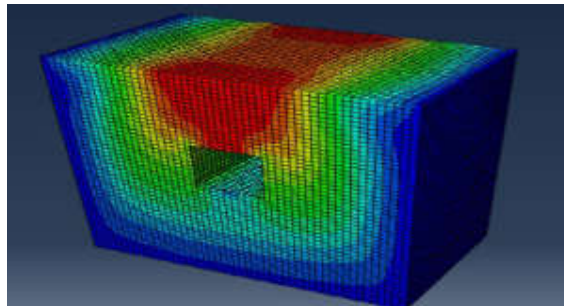
مدت زمان (Sec)	فشار (Pa)
0.0	0.00
0.001	700000
0.010	700000
0.020	0.00

شکل 2 نشان دهنده دیاگرام بار انفجار وارده می‌باشد.



شکل 2: نمودار تاریخچه بار انفجاری

برای تحلیل مدل‌ها از تحلیلگر صریح (Explicit) نرم‌افزار Abaqus استفاده شده است. از این تحلیل‌گر در مواردی که هدف، تحلیل دینامیکی مدل در زمان بسیار اندک مورد نظر باشد، استفاده می‌گردد. در طی تحلیل رفتار الیاف شیشه‌ای و سازه مترو برای مدت 0.5 ثانیه (20 گام) ثبت گردیده است. بیشینه پارامترهای مورد نظر در هر مدل محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل 3 نمایی از مدل پس از پایان تحلیل نشان داده شده است.



شکل 3: از مدل پس از پایان تحلیل نشان داده شده است.

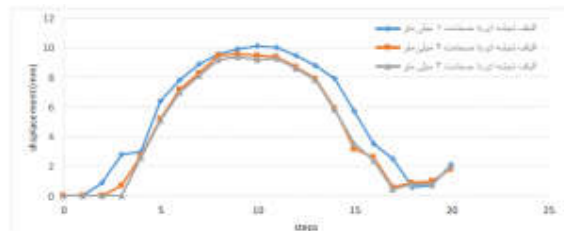
بررسی تأثیر افزایش ضخامت GFRP بر روی سازه:

در این قسمت تأثیر ضخامت GFRP بر پاسخ سازه مورد نظر بوده است.

(الف) در این بررسی GFRP با ضخامت 1، 2 و 3 میلی‌متر روی سقف سازه در فاصله 5 متری از محل انفجار قرار گرفته است. حداکثر جابه‌جایی نقطه میانی سقف سازه در شکل 4 نمایش داده شده است.

(ب) در این بررسی GFRP با ضخامت 1، 2 و 3 میلی‌متر روی سقف سازه در فاصله 7.5 متری از محل انفجار قرار گرفته است. حداکثر جابه‌جایی نقطه میانی سقف سازه در شکل 5 نمایش داده شده است.

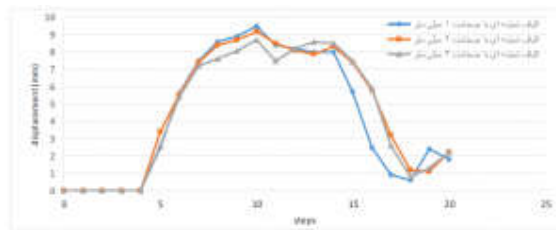
(ج) در این بررسی GFRP با ضخامت 1، 2 و 3 میلی‌متر روی سقف سازه در فاصله 12.5 متری از محل انفجار قرار گرفته است. حداکثر جابه‌جایی نقطه میانی سقف سازه در شکل 6 نمایش داده شده است.



شکل 4: نمودار جابه‌جایی با ورق شیشه‌ای در فاصله 5 متری از انفجار

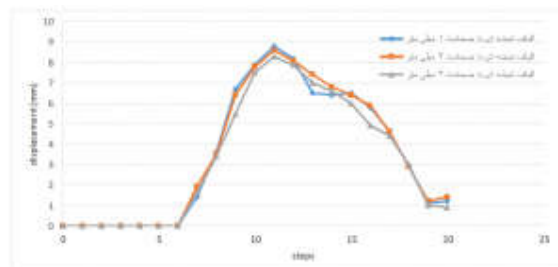


همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود پس از گذشت 0.05 ثانیه از آغاز انفجار، جابه‌جایی نقطه وسط سقف سازه با افزایش ضخامت GFRP کاهش داشته است. میانگین جابه‌جایی این نقطه از سازه برای GFRP با ضخامت 1، 2 و 3 به ترتیب 5.27، 4.5 و 4.38 و حداکثر جابه‌جایی نیز به ترتیب 10.1، 9.6 و 9.4 میلی‌متر است.



شکل 5: نمودار جابه‌جایی با ورق شیشه‌ای در فاصله 7.5 متری از انفجار

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود با افزایش GFRP و افزایش فاصله انفجار تا سازه، جابه‌جایی نقطه وسط سازه پایین آمده است. میانگین جابه‌جایی این نقطه از سازه برای GFRP با ضخامت 1، 2 و 3 به ترتیب 27.4، 4.58 و 4.41 و حداکثر جابه‌جایی نیز به ترتیب 9.5، 9.2 و 8.7 میلی‌متر است.



شکل 6: نمودار جابه‌جایی با ورق شیشه‌ای در فاصله 12.5 متری از انفجار

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود با افزایش عمق، سازه دیرتر دچار جابه‌جایی می‌شود اما تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در جابه‌جایی نقطه روی سازه ندارد و همچنین با افزایش ضخامت GFRP مشاهده می‌شود که مقدار جابه‌جایی رو به کاهش است. میانگین جابه‌جایی این نقطه از سازه برای GFRP با ضخامت 1، 2 و 3 به ترتیب 3.40، 45.3 و 3.23 و حداکثر جابه‌جایی نیز به ترتیب 8.8، 8.6 و 8.3 میلی‌متر است.

### نتیجه‌گیری

مدل ارائه شده در این تحقیق به بررسی اثر GFRP بر کاهش بار انفجار و میزان خرابی سازه، می‌پردازد و با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، نتایج زیر حاصل می‌گردد:

1. مقاومت‌سازی با استفاده از ورق‌های GFRP بر عملکرد سازه در برابر بار انفجار مؤثر بوده و در کاهش مقادیر جابه‌جایی نیز تأثیر مثبت دارد.
  2. با افزایش فاصله سازه تا مرکز انفجار، در کاهش مقادیر جابه‌جایی تأثیر مثبت دارد، اما تأثیر قابل توجهی در جابه‌جایی ندارد و به صرفه نیست.
- لازم به ذکر است که نتایج حاصله مربوط به خصوصیات ذکر شده است و با تغییر خصوصیات مصالح ممکن است نتایج حاصل نیز تغییر نماید و البته استفاده از آزمایش‌های تجربی می‌تواند ضمن تأیید صحت این مدل‌سازی، در شناسایی خطاهای احتمالی مفید واقع شود.

منابع

1. بهزاد جلیلی قاضی‌زاده، سید مجتبی موحدی، «مقاوم‌سازی سازه‌های مترو با استفاده از ورق‌های شیشه‌ای در مقابل بارهای انفجاری»، International Conference on researches in Science and Engineering, 2017.

2. علیرضا رهایی، سعید نعمتی، 1383، "ارزیابی عملکرد و روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی"، انتشارات فدک ایساتیس.
3. محیا فاضلی پور، محمدرضا توکلی زاده «بررسی اثر چیدمان ورق‌های GFRP در مقاوم‌سازی دیوارهای بتنی در برابر بار انفجار»، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران 6 و 7 اردیبهشت 1390، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

یکی از روش‌هایی که اخیراً برای مقابله با خوردگی سازه به کار گرفته شده است استفاده از مواد کامپوزیتی FRP می‌باشد. که در بسیاری موارد در عرشه پل‌ها و سایر اجزای سازه‌ای به کار گرفته شده است و نتایج مطلوبی نیز حاصل شده است. میلگردهای FRP با توجه به مقاوم بودن در برابر خوردگی و علاوه بر آن بزرگ بودن مقاومت کششی نسبت به میلگردهای فولادی به جایگزینی مناسب برای میلگردهای فولادی تبدیل شده‌اند.

### خوردگی در پل‌ها

#### خوردگی

خوردگی را می‌توان به صورت از بین رفتن فلز توسط یک پروسه اکسیداسیون شیمیایی و یا الکتروشیمیایی دانست. خوردگی در فلزات شکلی از اکسیداسیون است که توسط جریان الکتریسته از یک قسمت از سطح فلز به قسمت دیگری از سطح همان فلز به وجود می‌آید که نتیجه آن تبدیل آهن به اکسید آهن می‌باشد. خوردگی باعث کاهش سطح مقطع عضو فولادی شده و نهایتاً منجر به کاهش ظرفیت سازه‌ای می‌گردد. برای اینکه در فولاد خوردگی به وجود آید. باید عوامل زیر وجود داشته باشد که با حذف یک یا گروهی از آن‌ها می‌توان خوردگی را کندتر کرد:

1. اکسیژن
  2. یک الکترولیت برای انتقال جریان
  3. یک ناحیه روی سطح فلزی با بار الکتریکی مثبت (آند)
- ضایعات ناشی از خوردگی به طور کلی از یک طرف موجب افزایش مقدار تنش در اعضای سازه‌ای به دلیل کاهش سطح مقطع می‌گردد و از سوی دیگر کاهش سختی اعضا نیز موجب افزایش تغییر شکل در آن‌ها شده که به نوبه خود موجب تغییر خواص دینامیکی پل‌ها می‌گردد.

### خوردگی پل‌های بتنی ایران واقع در خلیج فارس

پل‌ها اکثراً عمر مفیدی بیش از 100 سال دارند. در ایران معمولاً در ساخت پل‌های بتنی نسبت آب به سیمان از حداکثر مجاز بالاتر می‌باشد که باعث می‌شود این بتن‌ها نفوذپذیری بالایی داشته باشند. نزدیکی به دریا، حمل کلرید و رطوبت از دریا به ساحل و نفوذ آن در داخل این بتن‌ها که نفوذپذیری نسبتاً بالایی دارند عامل اصلی و مهم در خوردگی آرماتورها در این پل‌های بتنی می‌باشد در نتیجه بروز خوردگی، اغلب پوشش کم بتنی روی آرماتورها ترک خورده و ریخته و آرماتورهای زنگ زده نمایان گشته و این رویداد در بعضی پل‌ها در زمان بین 5 تا 6 سال اتفاق افتاده است. لذا نخستین و مهم‌ترین مسئله در دوام بتن توجه به نفوذپذیری آن است.

در طراحی پل‌ها در حاشیه خلیج فارس اغلب فولاد با درصد بالا و به صورت انبوه در نظر گرفته شده است. نفوذ یون کلرید از پوشش کم و رسیدن آن به فولادها و وجود درصد بالای فولاد در مقطع سبب خوردگی شدید این فولادها و ایجاد فشار به بتن مجاور و نهایتاً بروز ترک و ریختن بتنی که روی آن است گشته است. چنین خرابی به صورت وسیع در اکثر پل‌های بتنی در این مناطق اتفاق افتاده است.

پایش سلامت پل‌های بتنی در برابر خوردگی

فرآیند پایش خوردگی، کربناته شدن و میزان کلرید متفاوت با سایر روش‌های پایش توسعه یافته است. گرچه این‌ها پدیده‌های دائمی هستند اما انجام پایش دائمی نتایج رضایت بخشی تولید نمی‌کند دلیل اصلی این موضوع آن است که عمر مفید سازه و عمر مفید سیستم پایش سلامت حداقل ده برابر با هم اختلاف دارند. سیستم‌های بسیار جالبی برای پایش خوردگی سازه‌های بزرگی که دارای پی‌های عظیم در تماس با آب هستند طراحی و به کار رفته‌اند به عنوان مثال پروژه‌های بزرگ پل‌سازی هنگ‌کنگ. با این وجود در پروژه‌هایی که به خوبی طراحی شده و بحث خوردگی در آن‌ها به شکل مناسبی لحاظ شده است سیستم پایش تنها نشانگر صحت ملاحظات است. عمده مسائل خوردگی در مورد پل‌های قدیمی است که پوشش و کیفیت بتن، الزامات کنونی را ارضاء نمی‌کند. روش‌هایی برای تشخیص خوردگی در سازه‌های موجود وجود دارد اما این روش‌ها پر هزینه بوده و نیازمند دسترسی نزدیک به المان‌های سازه‌ای هستند و مستلزم اختلال مداوم در ترافیک لذا توصیه شده است که فرآیند پایش بروی عملکرد کلی سازه بدون توجه به دلیل وقوع یک آسیب خاص تمرکز شود. به عبارت دیگر این که یک میلگرد به دلیل خوردگی یا دلیل ترک‌های ناشی از خستگی آسیب‌دیده یا از بین رفته باشد چندان مهم نیست بلکه آن چیزی که اهمیت دارد این است که چه المان‌هایی نیاز به تعمیر و یا تعویض دارند و این اقدامات با چه فوریتی انجام شود. لذا انتظار نمی‌رود هیچ یک از سیستم‌های پایش خوردگی به صورت دائمی مورد استفاده وسیع قرار گیرند.

### مواد کامپوزیت FRP

#### خصوصیات کلی الیاف پلیمری (FRP)

استفاده از مواد کامپوزیت FRP برای بهسازی روشی است که هم اکنون در اکثر کشورهای جهان برای بهسازی سازه‌های بتنی آسیب‌پذیر به کار می‌رود. از آنجا که صفحات فولادی دچار خوردگی شده و منجر به تخریب چسبندگی بین فولاد و بتن می‌شوند و همچنین نصب آن‌ها بسیار مشکل است و احتیاج به تجهیزات سنگینی دارند، محققان FRP را به عنوان جایگزینی مناسب برای فولاد در نظر گرفتند. مزیت اصلی مصالح FRP، نسبت زیاد مقاومت به وزن و مقاومت زیاد آن در برابر خوردگی است. مقاومت زیاد آن‌ها در عین حال که وزن کمی دارند، باعث می‌گردد که جابجایی و حمل‌ونقل آن‌ها راحت تر باشد و هزینه استفاده از آن‌ها و نیروی کار، کاهش یابد. همچنین مقاوم بودن آن‌ها در برابر خوردگی، سبب دوام و پایا بودن عملکرد آن‌هاست. محدودیت استفاده و کاربرد آن‌ها در مهندسی ساختمان به دلیل قیمت زیاد آن‌هاست. البته هزینه و قیمت آن‌ها رو به کاهش است و به این ترتیب استفاده از آن‌ها بیشتر خواهد شد. استفاده از آن‌ها در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌ها، هر چند پر هزینه بوده اما با توجه به هزینه اجرای کم و نیز سایر مزایای FRP، در کل به عنوان یکی از مؤثرترین راه‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی به شمار می‌رود. بسته به نوع الیاف مصرفی FRP به سه نوع CFRP، GFRP و AFRP دسته‌بندی می‌شوند.

جدول 1: مقایسه کیفی بین الیاف شیشه، کربن با مقاومت زیاد و آرامید

ویسیت ورق های کامپوزیت			
AFRP	CFRP	GFRP	مشکله
حاصل خوب	حاصل خوب	حاصل خوب	مقاومت کشش
نامناسب	حاصل خوب	خوب	مقاومت فشاری
خوب	حاصل خوب	نامناسب	ضربه آستانه
خوب	خوب	نامناسب	مقاومت دراز مدت
خوب	خوب	نامناسب	عملکرد در نقاط حساس
خوب	حاصل خوب	نامناسب	مقاومت در برابر آتش‌فشان
نامناسب	نامناسب	حاصل خوب	قیمت

#### میلگردهای کامپوزیتی FRP

میلگردهای کامپوزیتی FRP از نظر شکل ظاهری مشابه میلگردهای متداول هستند ولی به جای فولاد از الیاف مخصوص با مقاومت بسیار بالا نسبت به فولاد به همراه یک نوع رزین پلیمری ساخته شده‌اند. میلگردهای کامپوزیت FRP به عنوان جایگزینی مناسب برای میلگردهای فولادی در بسیاری از سازه‌های بتنی به کار می‌روند.

انواع میلگردهای کامپوزیت FRP شامل میلگردهای کامپوزیت یا آرماتور CFRP با الیاف کربن، میلگرد کامپوزیت AFRP با الیاف آرامید و میلگرد کامپوزیت BFRP با الیاف بازالت و میلگرد کامپوزیت GFRP با الیاف شیشه می‌باشد که نوع آخر ارزان‌تر از انواع دیگر است و از انواع دیگر متداول‌تر می‌باشد.

میلگردهای FRP خصوصیتی را دارا هستند که در سایر مصالح وجود ندارد به دلیل اینکه این کامپوزیت‌ها از رزین‌های همراه با الیاف شیشه، کربن و آرامید ساخته شده‌اند در برابر نیروهای مغناطیسی ایمن می‌باشند. به علت خصوصیات غیر مغناطیسی بودن استفاده از میلگردهای FRP در سازه‌های تحت تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی نظیر رآکتورها، فرودگاه‌ها، بخش‌های MRI بیمارستان‌ها و لابراتوارها توصیه می‌شوند. همچنین میلگردهای FRP نارسانا هستند که این امر آن‌ها را به گزینه مناسبی برای سازه‌هایی که در آن‌ها خطرات برق گرفتگی وجود دارد تبدیل می‌کند. نمونه‌هایی از این کاربردها عبارت‌اند از استفاده از میلگردهای FRP در ساخت دکل‌های بتنی انتقال نیرو، استفاده از میلگردهای FRP در ساخت تیرهای انتقال برق و پایه پست ولتاژ بالا و ...

میلگردهای FRP بسیار سبک‌تر از میلگردهای رایج هستند. این کاهش چگالی می‌تواند منجر به کاهش هزینه حمل‌ونقل، آسانی در جابجایی مصالح و همچنین کاهش بار مرده سازه گردد. لذا استفاده از میلگردهای FRP در بسیاری از پروژه‌ها منجر به اقتصادی‌تر شدن پروژه می‌گردد. با وجود مزایای میلگردهای FRP این میلگردها خالی از ضعف نیستند از جمله مشکلات میلگردهای FRP عبارتند از هزینه اولیه بیشتر، کاهش مقاومت باگذشت زمان، مدول الاستیسیته کمتر و شکست ترد. میلگردهای FRP به دلیل ماهیت رفتار ترد خود در سازه‌هایی که به شکل‌پذیری و قابلیت استهلاک انرژی نیاز دارند عملکرد مناسبی ندارد. به‌عنوان مثال در زلزله‌های حوزه نزدیک که به علت حرکت پالس گونه نیروی واردشده برسازه به صورت ضربه‌ای می‌باشد که باعث بروز رفتار ترد در سازه می‌شود استفاده از میلگردهای FRP با رفتار ترد مشکل را دوچندان خواهد کرد. به کارگیری آلیاژهای شکل‌پذیر حافظه‌دار با رفتار غیرخطی الاستیک خود به عنوان مسلح‌کننده همراه با میلگردهای به صورت ترکیبی (SMA-FRP) می‌تواند راه‌حل مناسبی برای این مشکل باشد.

با وجود مزایای بسیار میلگردهای FRP نسبت به میلگردهای فولادی رفتار ترد الاستیک، کرنش گسیختگی محدود و مدول الاستیسیته کمتر نسبت به فولاد، شکل‌پذیری و قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها را تحت تأثیر قرار داده در این مورد عملکرد رضایت‌بخشی ندارد که همین فقدان شکل‌پذیری و قابلیت استهلاک انرژی، استفاده از میلگردهای FRP را در کاربردهای لرزه‌ای محدود کرده است. میلگردهای مسلح‌کننده SMA-FRP متشکل از رزین‌های پلیمری FRP است که بوسیله الیاف قطری آلیاژ شکل‌پذیری حافظه‌دار کوچک با خاصیت فوق‌ارتجاعی مسلح شده است. از این رو میلگردهای SMA-FRP هم خاصیت ضدخوردگی مواد کامپوزیت FRP را دارا می‌باشد و هم به واسطه آلیاژ شکل‌پذیر حافظه‌دار، همانند میلگرد فولادی رفتار شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهد با این مزیت که در میلگردهای فولادی به علت عدم وجود خاصیت حافظه داری، فولاد بعد از اعمال تغییر شکل ماندگار به حالت اولیه خود باز نمی‌گردد اما در آلیاژهای شکل‌پذیر به واسطه ویژگی حافظه داری شکلی (SMA) به معنی قابلیت برگشت به شکل اولیه، میلگرد SMA-FRP بعد از باربرداری بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند قابل توجه به شکل اولیه خود باز خواهد گشت و مقدار قابل توجهی انرژی را بدون تغییر شکل ماندگار مستهلک خواهد کرد. با وجود این استفاده از میلگردها SMA-FRP به دلیل قیمت بالای آن هنوز در صنایع ساختمان‌سازی به طور گسترده مرسوم نگشته است، اما ویژگی‌های منحصر به فرد آن محققان را تشویق به مطالعه کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران کرده است.

جدول 2: مقایسه خصوصیات مکانیکی میلگردهای FRP و فولادی

ویسیت ورت های کامپوزیت		
میلگرد FRP	میلگرد فولادی (A400C)	میلگرد فولادی
1100 Mpa	440 Mpa	440 Mpa
22000 Mpa	20000 Mpa	20000 Mpa
عزیمت	رسانا	رسانا
عزیمت	رسانا	رسانا
عزیمت	رسانا	رسانا
عزیمت	رسانا	رسانا

### کاربرد میلگردهای FRP در پل ها و پروژه های انجام گرفته

خرابی عرشه پل ها یکی از رایج ترین نقطه ضعف ها در سیستم یک پل می باشد. عرشه پل بتنی نسبت به سایر اجزای آن زودتر دچار خرابی می شود که این به دلیل این می باشد که عرشه پل در تماس مستقیم با محیط می باشد و همچنین از دلایل دیگر می توان به بار ترافیکی اشاره کرد مشکل اصلی در مورد عرشه پل مربوط به خوردگی می باشد که سهم بزرگی از هزینه بهسازی را در بر می گیرد. در ادامه دو مورد از پروژه هایی که در آن ها از میلگردهای FRP در تسطیح پل بتنی مورد استفاده قرار گرفته است آورده شده است که این پل ها در کبک کانادا می باشند.

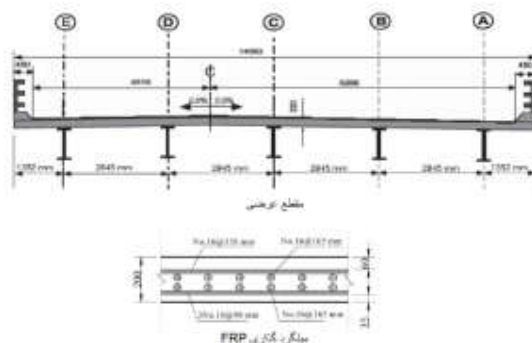
عرشه این پل های تیر و شاه تیر بتنی به وسیله میلگردهای FRP داخلی مسلح شده اند. پل ها در طول دهانه، ضخامت عرشه و نوع پل متفاوت هستند. مشخصات کششی میلگردهای فولادی و FRP (CFRP و GFRP) که در عرشه این پل ها به کار رفته اند در جدول (3) نمایش داده شده اند.

جدول 3: مشخصات میلگردهای FRP و فولادی به کار رفته در این پل ها

نوع میلگرد	کشش نامی (G)	مقاومت کششی (mpa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مساحت میلگرد (mm <sup>2</sup> )	قطر میلگرد (mm)
CFRP	1.8	1263±31	113±5	78	9.5
GFRP	1.87±0.1	755±27	74±1	198	15.9
GFRP	1.29±0.1	612±24	72±1	245	19.1
فولاد	E <sub>s</sub> =200	E <sub>y</sub> =360	200	200	15.9

### پل ماگوگ – کانادا

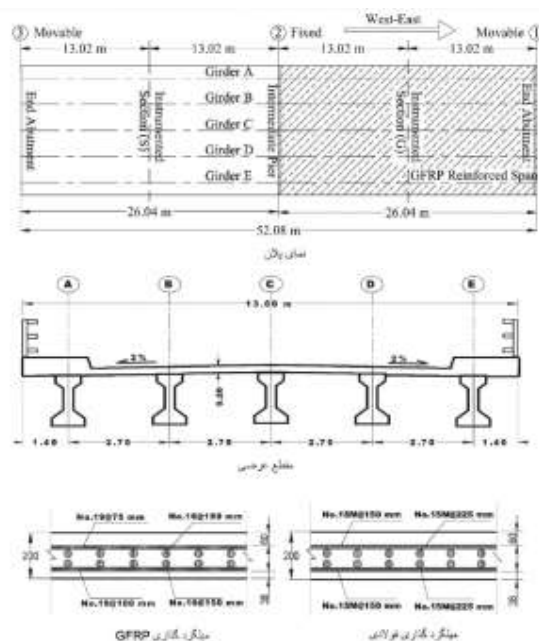
پل ماگوگ واقع بر رودخانه ماگوگ در خارج از شهر ماگوگ می باشد. طول کلی شاه تیر این پل 83.7 متر بوده که شامل 5 شاه تیر اصلی می باشد. ضخامت دال بتنی عرشه 220 mm می باشد. میلگردهای CFRP در پایین شبکه میلگرد گذاری و میلگردهای GFRP در سایر جهات این شبکه به کار رفته اند. این پل در اکتبر 2002 مورد بهره برداری قرار گرفت.



شکل 1: جزئیات میلگرد گذاری و ابعاد پل ماگوگ

### پل کوک شایر – ایتون (کانادا)

پل کوک شایر – ایتون پلی شاه تیری بوده که بروی رودخانه ایتون در مرکز شهر کوک شایر واقع شده است. پل دارای 5 شاه تیر اصلی بوده به همراه عرشه با دال بتنی با ضخامت 200 mm که به وسیله میلگردهای GFRP مسلح شده است. ساخت این پل در سپتامبر 2003 شروع و فوریه 2004 مورد بهره برداری قرار گرفت. که جزئیات میلگرد گذاری و ابعاد این پل در شکل (2) نشان داده شده است.



شکل 2: جزئیات میلگرد گذاری و ابعاد پل کوک شایر - ایتون

### نتیجه گیری

در این مقاله به موضوع آسیب پذیری پل ها در برابر خوردگی و معرفی الیاف پلیمری (FRP) و نقش میلگردهای FRP در بهسازی پل های در معرض خوردگی پرداخته شد. همچنین در مورد ویژگی های میلگرد FRP و نیز برخی پروژه های اجرا شده در این زمینه اشاره گردید. به طور کلی می توان از مباحث گفته شده نتایج زیر را بر شمرد:

1. خوردگی به عنوان مهم ترین عامل در خرابی عرشه پل ها باید مورد توجه ویژه قرار گرفته و طراحان و مجریان طرح باید نسبت به مقاوم ساختن پل در برابر خوردگی توجه ویژه مبذول دارند.
2. نتایج استفاده از میلگردهای FRP به عنوان جایگزین میلگردهای فولادی برای مقاوم ساختن عرشه پل ها در برابر خوردگی در پروژه های اجرا شده رضایت بخش بوده و این میلگردها را به عنوان جایگزین مناسبی برای میلگردهای فولادی مطرح نموده است.
3. با اینکه هزینه اولیه میلگردهای FRP از میلگردهای فولادی بیشتر است ولی با استفاده از میلگردهای FRP به عنوان یک روش اقتصادی مؤثر، دیگر نیازی به صرف هزینه بسیار برای تعمیر و بهسازی اساسی سازه های ساخته شده با میلگردهای فولادی نیست لذا هزینه تمام شده ساخت و مراقبت بعد از ساخت، کاهش می یابد.
4. استفاده از میلگردهای FRP به علت مقاوم بودن در برابر خوردگی باعث کاهش پوشش بتنی و محافظ خوردگی که صرف محافظت از میلگردهای فولادی می شد می گردد.
5. عملکرد مطلوب میلگردهای FRP در کرنش، ترک خوردگی و خیز به میلگردهای فولادی نزدیک بوده و از این لحاظ ضعیفی نسبت به میلگردهای فولادی ندارد.
6. رفتار ترد میلگردهای FRP مانع از نشان دادن شکل پذیری و استهلاک انرژی از طرف سازه شده که این مشکل را می توان با استفاده از میلگردهای ترکیبی SMA-FRP بر طرف نمود لیکن استفاده از این میلگردها نیازمند تحقیقات بیشتر است که باید صورت گیرد.

### منابع

1. کاربرد میلگردهای FRP در کاهش آسیب پذیری پل های بتنی در مقابل خوردگی؛ امیر مظفر بن شمس ، محمد صالح لباف زاده ، مصباح سایبانی، فرزاد حاتمی.
2. بررسی عملکرد آسیب پذیری و بهسازی پل ها ؛ رهایی، علیرضا، فیروزی، افشین؛ انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ؛ 1384.

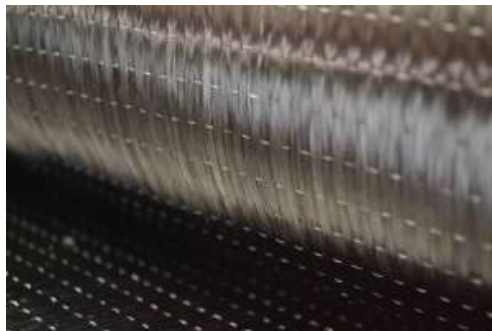
3. Zafar, A.Andwares,B.,Seismic Behavior of shape Memory composite Bars in RC Moment frames, 15th world conference of earthquake engineering, Lisbon,2012.1

### مقاوم سازی ستون فولادی کوتاه قوطی شکل دارای نقص

در سال های اخیر توجه به **مقاوم سازی** سازه های فرسوده، بهسازی لرزه ای و بالا بردن ظرفیت خمشی اعضای فولادی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین جهت بهبود و اصلاح روش های سنتی، روش های نوین مقاوم سازی در جهت سهولت مقاوم سازی و بالا بردن ظرفیت سازه ها جایگزین شده اند و باعث شده تا مهندسين سازه به استفاده از سیستم های پلیمری تقویت شده با الیاف تقویت کننده پلیمری روی بیاورند. اکثر تحقیقات صورت گرفته در جهت تقویت سازه های فولادی با CFRP، بر روی تیرهای فولادی و جهت تقویت خمشی و برشی بوده است. تقویت اعضای فولادی با بارگذاری محوری کمتر مورد تحقیق قرار گرفته است. لذا در این تحقیق به بررسی ظرفیت بار فشاری ستون فولادی کوتاه قوطی شکل تقویت شده با CFRP پرداخته شده است. استفاده از FRP به شرط تأمین شرایطی نظیر مقاومت چسبندگی، نه تنها برای بازیابی مقاومت از دست رفته مقطع فولادی تحت اثر خوردگی، بلکه برای افزایش ظرفیت باربری مقاطع سالم، افزایش عمر خستگی و جلوگیری از رشد ترک نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد. علیرغم آنچه تصور می شود ، پارامترهای مربوط به بار و مقاومت در طراحی اعضای سازه ای کمیتهای قطعی نیستند و متغیرهای تصادفی هستند ، بنابراین طراحی سازه ای کاملاً ایمن غیر ممکن است و استفاده از رویکرد احتمالاتی برای محاسبه قابلیت اطمینان اعضای سازه ای در طراحی امری اجتناب ناپذیر است.

### مقاوم سازی با الیاف CFRP

الیاف (Fiber Reinforced Polymer) FRP نوعی کامپوزیت است که به آن پلیمر الیاف مصنوعی نیز گویند که از فیبر یا الیاف تقویتی و ماتریس (ماده دربرگیرنده) یا رزین از جنس پلیمر تشکیل شده است.



شکل 1 : ورقه FRP ساخته شده از فیبرهای ناهمسانگرد یک طرفه، عمده تنش بوسیله فیبر تحمل می شود.

### بررسی و مطالعه راهکارهای مقاوم سازی ستون

ستون ها اجزایی از ساختمان فلزی هستند که قسمت اعظم نیروهای وارد به آن ها فشاری می باشد و اغلب به صورت عمود بر سطح زمین قرار دارد. عمده خرابی موجود در ستون های فولادی شامل کمانش موضعی و کلی و گسیختگی در محل درزها و وصله ها می باشد.

راهکارهای متداول برای مقاوم سازی ستون های قوطی شکل کوتاه فلزی

اضافه نمودن ورق های پوششی به بال ستون

عامل اصلی کاهش تغییر شکل، افزایش ضخامت بال ستون متصل به اتصال صلب می‌باشد. از جمله راه‌های افزایش ظرفیت خمشی و محوری ستون، اضافه نمودن ورق‌های پوششی به بال ستون می‌باشد. در این روش با افزایش ضخامت بال از کمناش موضعی بال ستون نیز جلوگیری می‌گردد.

#### استفاده از ورق‌های سخت‌کننده در داخل ستون

استفاده از ورق‌های سخت‌کننده در داخل ستون میزان تغییر شکل‌های ایجادشده در جداره ستون را در محل اتصال به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و بهترین راه‌حل برای کنترل تغییر شکل‌های جداره ستون می‌باشد.

#### استفاده از ورق‌های تقویتی در داخل ستون

برای تقویت ستون می‌توان جداره آن را با ورق‌های تقویتی پوشاند. در این روش استفاده از ورق تقویتی در محل اتصال صلب تا حدود 20٪ ارتفاع ستون، به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر شکل‌های ستون را کاهش می‌دهد لذا به‌عنوان دومین ارجحیت از دیدگاه اقتصادی پس از استفاده از سخت‌کننده می‌توان به تقویت ستون در محل اتصال تیر بصورت موضعی پرداخت. ورق تقویتی فوق‌الذکر بر روی بال ستون در محل اتصال نصب می‌گردد که اتصال آن به بال ستون می‌تواند توسط جوش گوشه و یا جوش گوشه توأم با جوش کام یا انگشتانه صورت گیرد.

#### استفاده از روکش بتنی

با افزودن میلگردهای طولی و خاموت‌های عرضی و یک پوشش بتنی در اطراف ستون می‌توان ستون را تقویت کرد. این عمل باعث افزایش سختی، مقاومت و شکل‌پذیری ستون می‌شود.

#### استفاده از روکش FRP

استفاده از این مصالح در مقاطع بسته همانند مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی می‌باشد که در آن الیاف به طور دورپیچ ستون‌های فولادی را محصور می‌کند و باعث افزایش مقاومت فشاری آن‌ها می‌گردد. این امر همچنین باعث افزایش شکل‌پذیری اعضا تحت ترکیب نیروهای محوری و خمشی می‌شود. بعضی از سخت‌کننده‌ها برای افزایش مقاومت در زمان حمل FRP و برخی برای جلوگیری از واکنش‌های سطحی و حساس باید در فرآیند تولید FRP به ماتریس اپوکسی اضافه شوند.

#### تحلیل قابلیت اطمینان در سازه‌های فولادی

تعریف قابلیت اطمینان بر تعریف وقوع خرابی بنا شده‌است. برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان یک سیستم ابتدا سیستم به اجزایی شکسته می‌شود و قابلیت اطمینان سیستم برحسب قابلیت اطمینان اجزای آن بیان می‌گردد. برای محاسبه قابلیت اطمینان هر جزء بر اساس داده‌های آماری در دسترس، مدلی برای نرخ وقوع خرابی انتخاب می‌شود و پارامترهای آن بر اساس داده‌های موجود تخمین زده می‌شوند.

ارزیابی قابلیت اعتماد ساختمان‌های موجود می‌تواند به دلایل متعددی انجام گیرد که از جمله آن‌ها موارد زیر است :

1. کاربری از سازه که مستلزم افزایش بار می‌باشد .
2. نگرانی در رابطه با خطاهای طراحی و ساخت و یا کیفیت مصالح ساختمانی
3. ارزیابی اثرات استهلاک در سازه
4. ارزیابی آسیب‌ها و خسارات ناشی از حوادث طبیعی و غیر مترقبه(همچون طوفان یا زمین‌لرزه)

#### تابع شرایط حدی و معیار خرابی:

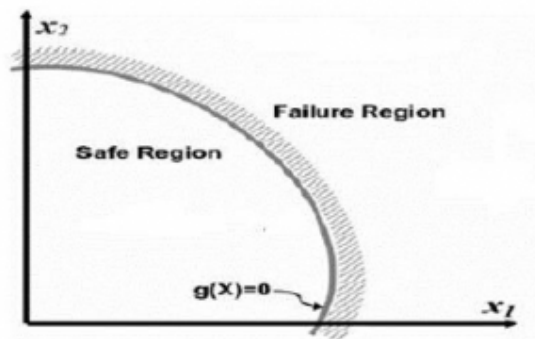
برای بیان احتمال خرابی معمولاً از یک تابع شرایط حدی به شرح زیر معادله استفاده می‌شود:

$$g(R,Q)=R-Q$$

که در آن  $g(R,Q)$  تابع شرایط حدی،  $R$  تابع مقاومت سازه و  $Q$  تابع اثرات بار بر سازه است. در معادله بالا هر یک از دو تابع مقاومت و بار متشکل از چند متغیر تصادفی با توابع توزیع احتمال متفاوت می‌باشند که به ماهیت ابعاد و نوع



مصالح مورد استفاده بستگی داشته و بر اساس آن انتخاب می‌گردند. برای این تابع می‌تواند سه حالت مطابق شکل (2) به وجود آید که هر یک بیانگر وضعیت خاصی از سازه از حیث خرابی و سلامتی است.



شکل (2) : نمایش شماتیک تابع شرایط حدی و مرز خرابی و ایمنی

مدل‌سازی به روش اجزای محدود، معرفی نمونه‌ها و تحلیل نتایج با نرم‌افزار آباکوس

المان محدود امروزه کاربردهای فراوانی در شاخه‌های مختلف مهندسی پیدا کرده است. اگرچه در ابتدا برای محاسبات سازه‌ها از آن استفاده شد اما هم‌اکنون در بسیاری از علوم مهندسی در محاسبات انتقال حرارت، مکانیک سیالات، الکترومغناطیس و رفتار مصالح فواید خود را نشان داده است. به طور کلی برای حل فیزیکی مسائل سه روش موجود است :

(Solution Exact) روش تحلیلی دقیق

(Solution Numerical) روش عددی دقیق

(Method Experimental) روش تجربی

**کارهای آزمایشگاهی :**

مراحل گام‌به‌گام اجرای الیاف FRP برای تقویت و مقاوم‌سازی به شرح زیر است.

1. آماده‌سازی سازه مقاوم‌سازی : سازه مورد نظر قبل از نصب و اجرای FRP باید آماده باشد. مشکل زنگ‌زدگی و خرابی و پوسیدگی نداشته باشد .
2. آماده‌سازی سطح : پس از تعمیر سازه آسیب‌دیده، سطح آن کاملاً صاف شده و نامنظمی‌ها و زوایای تند و تیز گوشه‌ها به وسیله ماسه پاشی سند بلست، و یا غیره گرد می‌شود.
3. تمیز کردن و کاربرد مصالح : FRP الیاف را با دقت با استفاده از استون تمیز کرده شکل (3) و روی سطح هموار و بدون هیچ‌گونه آلودگی مانند نداشتن هیچ‌گونه حباب هوای محبوس به صورت کاملاً صاف و مستقیم دقیق می‌چسبانند .
4. بریدن شیت : FRP بر روی یک سطح تمیز آماده که عاری از هر گونه آلودگی، چسب و ناصافی است ورقه FRP مطابق مشخصات و جزئیات ارائه شده بریده می‌شود.



شکل (3) : تمیز کردن FRP با استفاده از استون

در این پژوهش جهت تقویت ستون‌های فولادی قوطی شکل تحت بارگذاری فشاری، از الیاف کربن CFRP با مدول الاستیسیته 238000 مگاپاسکال با ضخامت 0.131 میلی‌متر به منظور تقویت عملکرد عضو فشاری استفاده شده است. خصوصیات الیاف کربنی در جدول (1) نمایش داده شده است.

جدول (1) : الیاف کربن CFRP

کرنش نهایی %	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (Mpa)	دانسیته g/cm <sup>3</sup>	ضخامت (mm)
1.7	238000	4300	1.76	0.131

5. چسب اپوکسی دو جزئی : رزین‌های اپوکسی epoxy resin مصالحی دو جزئی (ترکیب رزین اپوکسی و هارنر) با خاصیت چسبندگی بسیار خوب به بسترهای مختلف و مقاومت شیمیایی (به‌ویژه در محیط‌های شدید اسیدی و قلیایی)، کششی، فشاری و خمشی بالا می‌باشند. چسب مورد استفاده در این تحقیق به منظور تقویت عملکرد ستون‌های قوطی شکل با الیاف کربنی CFRP استفاده شده است.

#### مشخصات فولاد انتخابی :

سه نمونه فولاد بکار رفته شده در ساخت عضو فشاری کوتاه، توسط آزمایش کشش ساده که در شکل (4) نشان داده شده است در آزمایشگاه مکانیک خاک مورد بررسی قرار گرفت. تصویر نتیجه آزمایش در شکل (5) آورده شده است. فولادها دارای مقاومت نهایی 401 – 395 – 403 مگاپاسکال و کرنش نهایی 32 – 34 – 30 درصد می‌باشند که به صورت غیر خطی در نرم‌افزار مدل شده است. مدول الاستیسیته فولاد 200 گیگاپاسکال بوده و نسبت پواسون 0 / 3. در نظر گرفته شده است. برای تعریف خصوصیات فولاد با این خصوصیات در محیط نرم افزار، از گزینه‌ی کشسان خطی برای مدلسازی قسمت خطی فولاد با فرض ایزوتروپیک بودن آن و برای قسمت غیر خطی نمودار تنش-کرنش، در قسمت غیر کشسان فولاد استفاده می‌شود.



شکل (4) : نمونه فولادی جهت تست

ردیف	شماره آزمایشگاهی نمونه	مشخصات نمونه	نوع آزمایش		نوع بار		نوع آرماتور	نوع بتن	نوع سازه	نوع آرماتور	نوع بتن	نوع سازه
			مقاومت در برابر بار	مقاومت در برابر بار	کشش	فشار						
1	113.13	مقاومت در برابر بار	کشش	20	کشش	20	کشش	20	کشش	20	کشش	20
2	113.13	مقاومت در برابر بار	کشش	20	کشش	20	کشش	20	کشش	20	کشش	20
3	113.13	مقاومت در برابر بار	کشش	20	کشش	20	کشش	20	کشش	20	کشش	20

شکل (5) : تصویر نتیجه آزمایش فولاد مقطع انتخابی

### نحوه چسباندن FRP

مخلوط چسب آماده را همانند شکل (6) به مقدار لازم در قسمتی که FRP چسبانده می شود قرار می دهیم؛ به کمک کاردک چسب را به در تمام قسمت آن پخش کرده و بعد از آن FRP را نصب می کنیم.



شکل (6) : مراحل چسباندن FRP به نمونه ستون فولادی

بارگذاری نمونه در آزمایشگاه :

نمونه‌ها برای دو حالت بدون الیاف CFRP و با الیاف CFRP در آزمایشگاه مقاومت مصالح تحت بارگذاری قرار گرفته که نمونه‌ای از نتیجه این آزمایشات در شکل (7) نشان داده شده است .

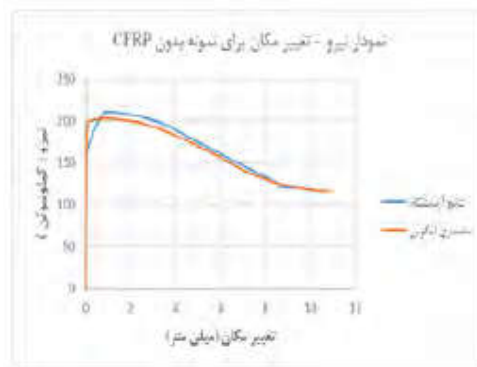


شکل (7): نتایج حاصل از بارگذاری ستون‌ها در آزمایشگاه

شکل (8): مقایسه تنش به ترتیب از راست به چپ در نمونه بدون FRP و نمونه با FRP در نرم‌افزار آباکوس



شکل (9): مقایسه نمودار نیرو - تغییر مکان در حالت مقاوم‌سازی شده



شکل (10): مقایسه نمودار نیرو - تغییر مکان در حالت بدون مقاوم‌سازی

نتیجه

در این تحقیق روشی ساده و کارآمد برای مقاوم‌سازی اعضای قوطی شکل فولادی دارای نقص با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS ارائه شده است. در این مدل‌سازی عضو فشاری با استفاده از المان Solid چهار وجهی و به صورت تحلیل استاتیکی غیر خطی مدل شده است. عضو فشاری با سطح مقطع  $90 \times 90$  میلی‌متر و ارتفاع 300 میلی‌متر و با ایجاد نقص‌های متفاوت در عرض با ارتفاع یکسان تحلیل شد و به کمک دو لایه الیاف CFRP مقاوم‌سازی گردید. هدف اصلی این پژوهش، ارائه الگوی مقاوم‌سازی مناسبی جهت جبران کاهش مقاومت ایجاد شده در عضو فولادی بر اثر نقص می‌باشد.

پس از تحلیل 46 نمونه نرم‌افزاری (از نرم‌افزار ABAQUS استفاده گردیده است) و مقایسه نتایج نمونه‌ها با یکدیگر، از طریق صحت‌سنجی نرم‌افزار با نمونه‌های آزمایشگاهی، موارد زیر حاصل گردید.

- الیاف CFRP با محصور کردن قوطی فولادی باعث به تأخیر انداختن کماتش موضعی شده و در نتیجه ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. تعداد لایه‌های بیشتر CFRP تأثیر بسیار خوبی از خود در برطرف کردن ضعف ایجاد شده نشان داد.
- مدهای شکست در نمونه شاهد کماتش پافیلی و در نمونه‌های دارای نقص بدون CFRP کماتش موضعی در اطراف نقص می‌باشد. در خصوص نمونه‌های مقاوم‌سازی شده پارگی الیاف در اطراف نقص و جداشدگی در بالای نمونه‌ها مشاهده شد.
- با استفاده از دو لایه CFRP افزایش PCR در کلیه نمونه‌ها مشاهده گردید که در محدوده 20٪ الی 31.47٪ افزایش را شاهد بودیم.
- برای دستیابی به ماکزیمم نیروی مقاومتی با توجه به مدلسازی و نتایج حاصله ابعاد ستون CDB 47.33-2F پیشنهاد می‌گردد.

## منابع

1. تعیین ظرفیت ستون فولادی کوتاه قوطی شکل دارای نقص مقاوم سازی شده با الیاف CFRP، بهاره کشوری، مهدی شهرکی، کامبیز نرماشیری، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، 1396.
2. Ramli Sulong, N. H. Failure Modes of CFRP & Narmashiri, K., Jumaat, M. Z. Flexural Strengthened Steel I-Beams. Key Engineering Materials 2011, 471-472, 590-595.
3. کاربرد مصالح FRP به عنوان روشی نوین در مقاوم سازی سازه های فولادی، حیدری، محسن، اولین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، 1391.

## مقایسه شکل پذیری و ظرفیت باربری تیرهای فولادی RBS و تقویت شده با FRP

با توجه به فرارگیری ایران در منطقه‌ای لرزه‌خیز و خدمات وارده در سال‌های اخیر، لزوم افزایش سطح اطلاعات در رابطه با لرزه‌خیزی کشور، آموزش و ترویج فرهنگ ایمنی، آسیب‌شناسی و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و ساخت اصولی سازه‌های جدید بسیار احساس می‌شود. در این بین روش‌های بسیاری جهت مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها موجود است که استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری FRP از جدید و کاربردی‌ترین آن‌هاست. این مصالح با مقاومت و شکل‌پذیری بالا در المان‌های مختلف سازه و حتی اتصالات به کار می‌روند و همچنین به جهت ضدخوردگی بودن آن‌ان، در سازه‌های دریایی نیز استفاده می‌شوند. جنس الیاف می‌تواند از شیشه، کربن، آرامید یا بازالت باشد که FRP ساخته شده با هر یک از این مواد را به ترتیب CFRP، GFRP، AFRP و BFRP می‌نامند.

استفاده از این الیاف یکی از روش‌های افزایش شکل‌پذیری و انتقال مفصل پلاستیک به داخل تیر است. در اتصالات صلب هدف انتقال مفصل پلاستیک به داخل تیر و به یک فاصله معین از بر ستون است. به‌گونه‌ای که در این اتصالات دور ساختن مفصل پلاستیک از بر ستون، باعث کاهش تمرکز کرنش به وجود آمده در ناحیه جوش شده و در نتیجه باعث کاهش میزان ترک‌خوردگی جوش و در نتیجه کاهش شکست ترد در اتصالات می‌شود. روش‌های متعددی برای انتقال مفصل پلاستیک پیشنهاد می‌شود. در تحقیقات صورت گرفته درباره زلزله نورت‌ریج به طور کلی این روش‌ها به دو دسته عمده تقسیم می‌شود.

1. یکسری از اتصالات پس از زلزله نورت‌ریج بگونه‌ای طراحی شده‌اند که با افزودن اجزای وی به اتصال باعث افزایش مقاومت تیر در ناحیه اتصال شده و باعث کاهش تنش در اتصال می‌شود. در نتیجه باعث انتقال مفصل پلاستیک به داخل تیر می‌شود و از چرخش اجزای اتصال نسبت به هم (تیر نسبت به ستون) جلوگیری می‌کنند که در نتیجه تنش کمتری در ناحیه جوش ایجاد می‌شود.
  2. ضعیف کردن مقطع تیر در ناحیه مفصل پلاستیک. در گروه الف از جزئیات خاصی برای حد فاصله بین محل تشکیل مفصل پلاستیک در داخل تیر تا بر ستون استفاده می‌شود.
- برای گروه دوم در فاصله مشخصی از بر ستون، یک ضعیف‌شدگی در بال یا جان تیر ایجاد می‌شود تا مفصل پلاستیک در خارج از ناحیه اتصال تیر به ستون تشکیل شود و این ضعیف‌شدگی همان اتصال RBS است. برای مقاوم‌سازی و یا بهسازی رفتار اتصالات در برابر نیروی زلزله از هر دو روش می‌توان استفاده کرد. هر کدام از این دو روش دارای مزایا و معایبی هستند که قبل از انتخاب جزئیات مناسب برای بهسازی لرزه‌ای اتصال باید به طور کامل بررسی شوند. اتصال RBS باعث می‌شود مفصل پلاستیک در از اتصال تیر به ستون و در خود تیر ایجاد می‌شود و از شکست در اتصال و جوش بال تیر به ستون جلوگیری می‌گردد.

### پیشینه تحقیق

تکنولوژی استفاده از ورق‌های FRP در مهندسی عمران اولین بار در سال 1894 در سوئیس مورد آزمایش قرار گرفت که در آن ورق‌های CFRP و Carbon FRP جهت مقاوم‌سازی تیرهای بتنی آزمایش شدند. طرح RBS نیز ابتدا در اروپا در سال 1881 و با کاهش ثابت در بال تیر همراه با یک ناحیه انتقالی باریک شده ابداع شد. سپس شکل آن با توجه به نمودار لنگر خمشی تحت اثر بارهای جانبی اصلاح شد و اتصال RBS خطی به وجود آمد. پس از آن، بدلیل تمرکز تنش در لبه‌های RBS خطی و به منظور ایجاد نواحی انتقالی صاف و هموار، اتصال RBS خطی شعاعی در اواخر سال 1889 معرفی گردید. در نهایت، به دلیل مشکلات اجرایی و سخت بودن فرم برش بال‌ها در اتصال RBS خطی شعاعی، اتصال RBS با برش شعاعی پیشنهاد گردید. رفتار طراحی اتصالات RBS با تیرهای کامپوزیتی ارزیابی و پتانسیل شکستگی برای اتصالات RBS در انتهای تیر فولادی، با افزایش فشار بر آن‌ها آزمایش شد و از یک مدل ریاضی برای اتصالات RBS با تیرهای کامپوزیتی استفاده شود. با این مدل ریاضی یک سری فاکتورهای تقویت ارائه و تأثیر ابعاد صفحات ضخیم، ابعاد میله‌های فولادی، خواص ماده مورد نظر و نیروهای اعمالی بر فاکتورهای تقویت ارائه شده با مدل ریاضی بررسی گردید و همچنین این مدل ریاضی ساده با مدل تأیید شده آلمان محدود مقایسه گردید. این مدل ریاضی نتایج رضایت‌بخشی را نشان داده است. رفتار الاست-پلاستیک تیرهای فولادی تقویت شده توسط FRP و رابطه بین فولاد و نوار FRP به ویژه تعامل بین تغییر شکل پلاستیک و فرآیند جداشدگی مورد بررسی قرار گرفته شدند. ابتدا روش عددی برای ارزیابی نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی از طریق اصل شناخته شده از کار مجازی نشان داده شده و سپس انتقال تنش ناشی از تغییر شکل پلاستیک سازه‌های فلزی استاتیکی نامعین ارزیابی گردیدند. سپس یک روش مبتنی بر تعادل مقطعی فشار و سازگاری و پویش بینی تنش محوری FRP و رابطه تنش برش از تیر فولادی تقویت‌شده توسط FRP و در نهایت تمرکز تنش برشی لایه چسب در بخش مهم و شرایط شکست از طریق مثال عددی ارزیابی شده است.

### آشنایی با مصالح کامپوزیتی (FRP)

الیاف پلیمری مرکب (FRP) از جمله مصالح روز دنیاست که در صنایع مختلف مانند صنعت هواپیماسازی، پزشکی، لوازم ورزشی، صنعت اتومبیل‌سازی و ساخت قایق‌های کوچک به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر نیز استفاده از این کامپوزیت در جهت استفاده صنایع ساختمانی رواج یافته است. ماده جدید FRP سال‌هاست که به سبب ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در موارد خمشی و برشی و دورگیری و مقاومت بالا در برابر خوردگی و ... در مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها بکار می‌رود. FRP به عنوان یک جایگزین مناسب برای آرماتورهای فولادی در سازه‌های دریایی، پارکینگ‌ها، عرشه پل‌ها، ساخت بزرگراه‌های که به طور زیادی تحت تأثیر عوامل محیطی هستند و در نهایت سازه‌هایی که در برابر خوردگی و میدان مغناطیسی حساسیت زیادی دارند پیشنهاد می‌شود.

### مدل‌سازی:

در این تحقیق پارامترهای موجود در جدول شماره 2 مورد بررسی قرار می‌گیرند. مشخصات مصالح به شرح زیر می‌باشد.

$$E=200GPa$$

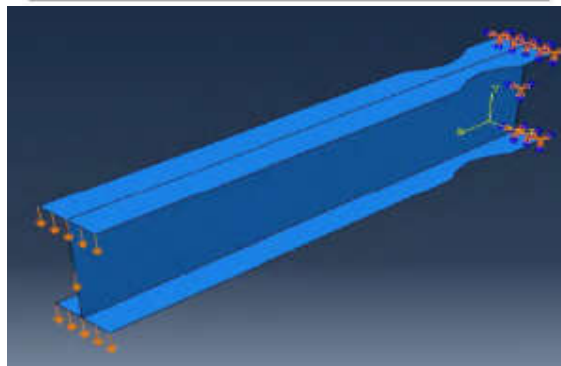
$$\nu=0.30$$

$$\rho=7850kg/m^3$$

که در آن  $E$  و  $\nu$  به ترتیب مدول الاستیسیته و نسبت پواسون و  $\rho$  چگالی هستند.

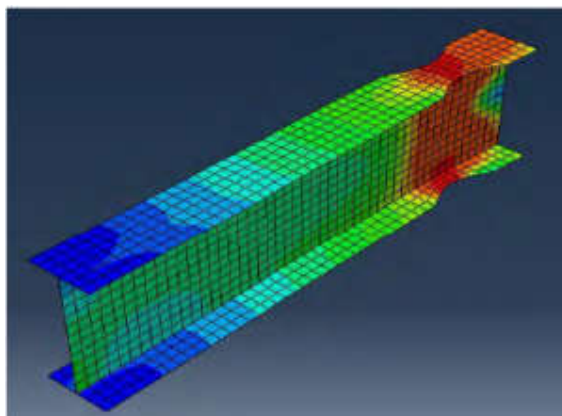
جدول 1: مشخصات پلاستیک فولاد

Yeild stress (Mpa)	Plastic strain
365	0
370	0.02
375	0.03
410	0.04
430	0.06
450	0.06
460	0.1
463	0.12
465	0.14
467	0.15



### شکل 1: هندسه تیر RBS

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود تیر RBS به صورت یک سر گیردار و یک سر آزاد بوده که در انتهای آزاد آن تغییر مکان 3 سانتی‌متر اعمال شده است. بعد از مش بندی و قبل از مرحله پردازش باید خروجی‌های مد نظر مشخص شود. خروجی‌ها شامل نمودارهای بار - تغییر مکان و دوران پلاستیک است. شکل 2 مدل تغییر یافته تیر با مقطع کاهش یافته است و همانطور که ملاحظه می‌شود تغییر فرم واقعی سازه نمایش داده شده است. کانتور تنش مشاهده شده کانتور تنش فون میسز می‌باشد. نتایج تحلیل شامل نمودار بار - تغییر مکان، نمودار مقایسه دوران پلاستیک از بر تکیه‌گاه در تیرهای RBS و FRP با تغییر در ضخامت، طول FRP و سطح بال تیر است.



شکل 2: مدل تغییر فرم یافته تیر با مقطع کاهش یافته

### مدل‌سازی شماره یک

در این تحقیق نخست سه مدل تیر RBS طبق مشخصات جدول شماره 3 یک بار به صورت RBS و در مرحله دوم با تقویت ورق FRP مدل‌سازی و تحلیل شدند. در این مدل‌سازی روش تحلیل بار افزون یک تیر با بال کاهش یافته و همان تیر تقویت شده با FRP به روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار Abaqus، انجام گرفته است. در تحلیل بار افزون تیر تحت تغییر مکان سه سانتی‌متری، نمودارهای ظرفیت باربری و شکل‌پذیری به دست آمده و در پایان، نتایج این نمونه با نتایج تیر تقویت شده در نزدیک تکیه‌گاه با ورق FRP مقایسه می‌شوند.

جدول 2: پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق

d	ارتفاع بال تیر
$b_{fr}$	عرض بال تیر
s	ضخامت جان
t	ضخامت بال
R	شعاع برش
a	فاصله از بر تکیه‌گاه
b	ناحیه کاهش یافته
c	مقدار تورفتگی
L	طول تیر
$L_f$	طول FRP
$T_f$	ضخامت FRP
$A_f$	مساحت بال تیر
A	فاصله محل ایجاد مفصل پلاستیک از بر اتصال



جدول 3: مشخصات مدل‌های تیر RBS (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

A	c	b	a	t	s	b <sub>bf</sub>	d	L	IPE
140	20	140	65	8	5/3	91	180	1218	IPE 180
150	25	150	70	8/5	5/6	100	200	1218	IPE200
210	35	210	110	10/7	7/1	150	300	1218	IPE300

#### مدل‌سازی نمونه دوم

در این مرحله تیرهای فلزی تقویت‌شده با ورق FRP با مدل‌سازی طبق جدول شماره 4 با مشخصات قبل، مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند. مشخصات پلاستیک در جدول 1 داده شده است. ورق FRP به ابعاد 21\*15 سانتی‌متر و به ضخامت یک سانتی‌متر در مدل مورد بحث بوده که در مدل‌های دیگر طول و ضخامت آن را تغییر داده‌ایم. لازم به ذکر است از آنجا که FRP مورد استفاده در بسیاری از موارد متشکل از الیاف یک جهته بوده، فرض حالت ایزوتروپیک برای آن دور از واقعیت می‌باشد. به عبارت دیگر خواص مکانیکی این مصالح در جهات مختلف متفاوت خواهد بود. معمولاً این الیاف را بصورت چند لایه و همراه با رزین اپوکسی بصورت متعامد بر روی عضو سازه‌ای می‌چسبانند و به این ترتیب در دو راستای متعامد، خواص مکانیکی آن یکسان خواهد بود. در این مثال مقدار جرم حجمی FRP برابر 1800 کیلوگرم بر مترمکعب و سایر خصوصیات مورد نظر طبق جدول 5 می‌باشند.

جدول 4: مشخصات مدل‌های تیر مقاوم‌سازی شده با FRP (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

IPE	d	L	b <sub>bf</sub>	s	t	L <sub>f</sub>	T <sub>f</sub>	A <sub>f</sub>	A
IPE180	180	1218	91	5/3	8	140	1.5	110838	155
							4.5		159
							7.5		163
							10		164
IPE200	200	1218	100	5/6	8/5	150	1.5	121800	171
							4.5		176
							7.5		178
							10		179
IPE300	300	1218	150	7/1	10/7	210	1.5	182700	230
							4.5		236
							7.5		239
							10		243

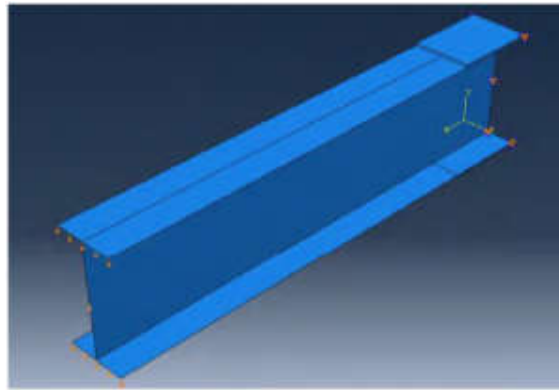
جدول 5: خصوصیات FRP (واحد بر حسب مگاپاسگال)

G23	G13	G12	v 12	E2	E1
1860	3270	0.003270	0.22	62000	62000

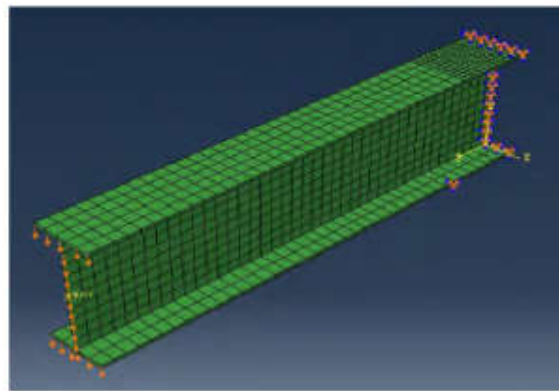
پارامترهای G-NU-E به ترتیب، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و مدول برشی جهات مربوطه می‌باشند. اعداد 1، 2، 3 نیز راستاهای 3 محور اصلی بوده که با توجه به پیش فرض نرم‌افزار مطابق با جهت‌گیری دستگاه مختصات کلی می‌باشد. در ادامه مقاومت‌های کششی، فشاری و برشی را در جهات مختلف طبق جدول 6 تعریف می‌کنیم. لازم به ذکر است برای تعیین خصوصیات مکانیکی FRP در جهات مختلف لازم است آزمایش‌های استاندارد بر روی مصالح انجام گیرد. ترسیم هندسه مدل با ورق FRP در شکل 3 نمایش داده شده است و مانند شکل 4 محل اعمال بار را انتخاب کرده‌ایم.

جدول 6: مقاومت FRP (واحد بر حسب مگاپاسگال)

Strength	Strength	Strength	Strength	Strength	Strength
48	96	74	74	958	958

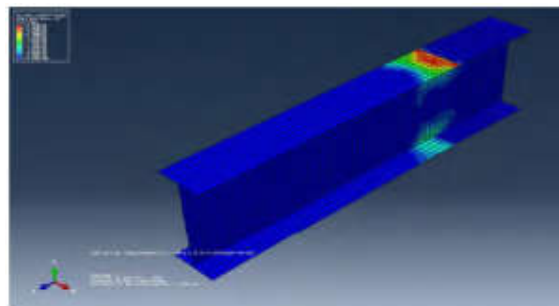


شکل 3: تیر فلزی با ورق FRP



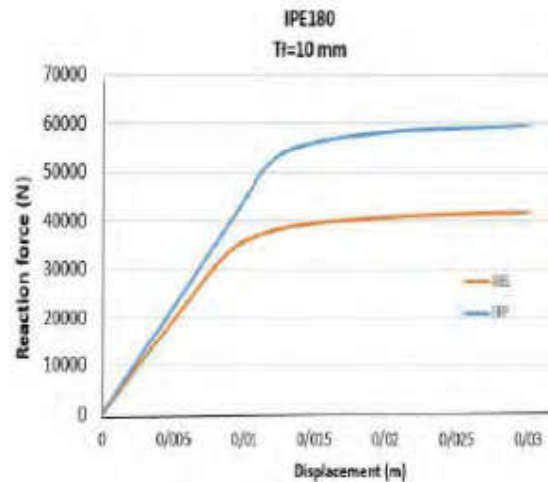
شکل 4: انتخاب محل اعمال بار

بعد از مش بندی و قبل از مرحله پردازش باید خروجی های مد نظر مشخص شود که خروجی ها شامل عکس العمل تکیه گاهی، تغییر مکان انتهای آزاد تیر (نمودار بار تغییر مکان) و محل تشکیل مفصل پلاستیک است. سپس در این مرحله مدل ساخته شده که تحت بارگذاری قرار گرفته تحلیل می شود. مدل تغییر فرم یافته با تقویت ورق FRP در شکل 5 مشاهده می شود.

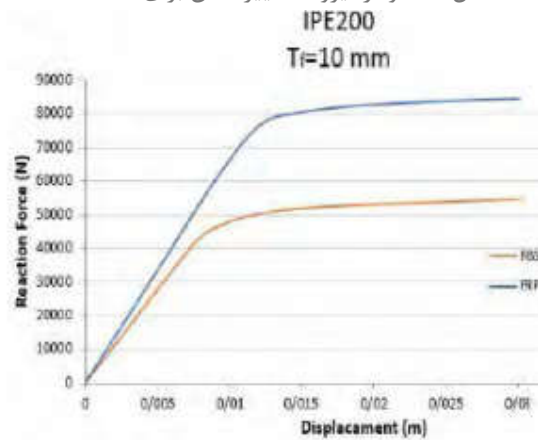


شکل 5: مدل تغییر فرم یافته تیر با تقویت ورق FRP

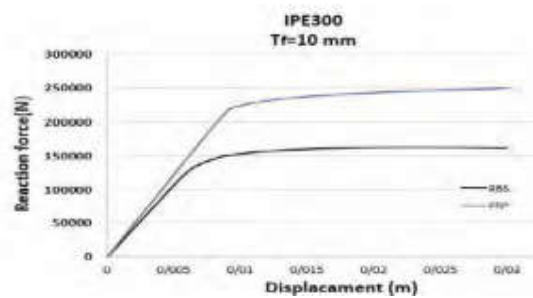
با استفاده از نتایج مدل‌های انجام شده با آباکوس، نمودارهای ترسیم شده در اشکال 6 الی 8 بدست آمده‌اند که در مدل تیر فلزی تقویت شده با ورق FRP ظرفیت باربری افزایش یافته و افزایش ضخامت ورق FRP تأثیری در بهبود رفتار ندارد (شکل 9). همچنین نمودارهای شکل‌پذیری و دوران پلاستیک برای تیرهای RBS و FRP در مدل‌های مختلف مورد مقایسه قرار داده شده‌اند (شکل 11-16).



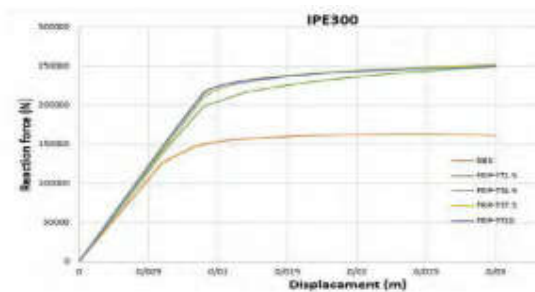
شکل 6: نمودار نیرو- تغییر مکان برای IPE180



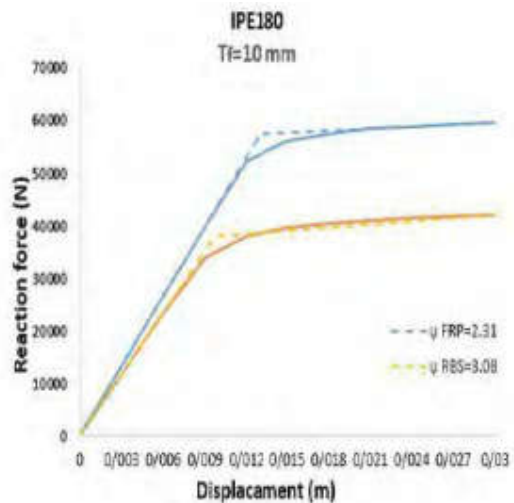
شکل 7: نمودار نیرو-تغییر مکان برای IPE200



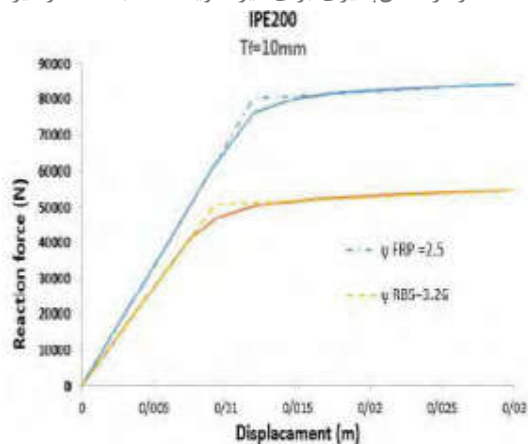
شکل 8: نمودار نیرو- تغییر مکان برای IPE300



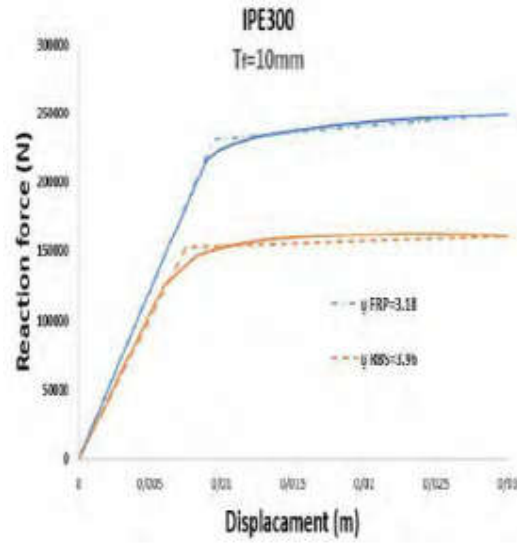
شکل 9: نمودار نیرو - تغییر مکان برای IPE300 با ضخامت‌های مختلف FRP



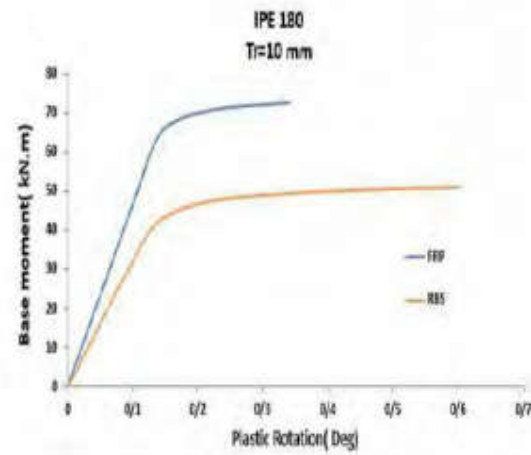
شکل 10: نمودار شکل‌پذیری برای تیر تقویت‌شده با FRP و تیر RBS



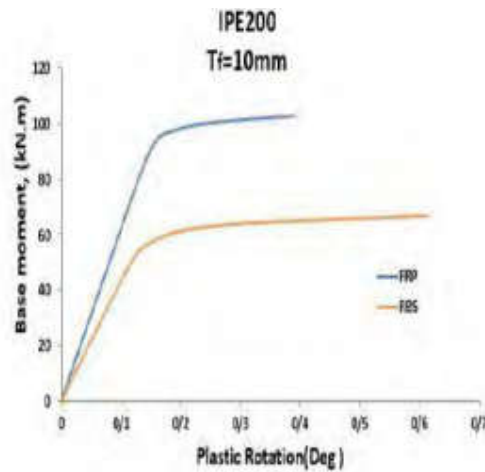
شکل 11: نمودار شکل‌پذیری برای تیر تقویت‌شده با FRP و تیر RBS



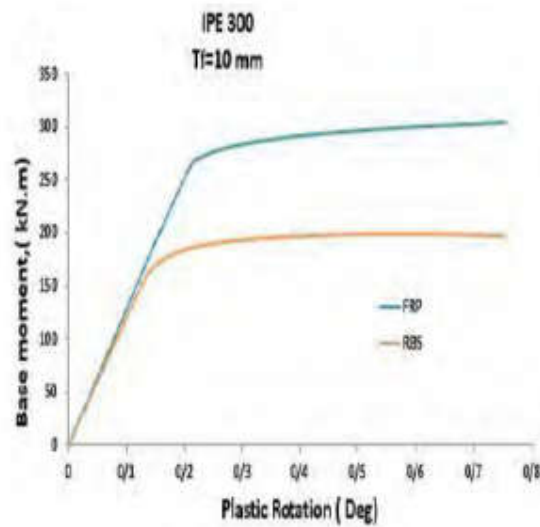
شکل 12: نمودار شکل پذیری برای تیر تقویت شده با FRP و تیر RBS



شکل 13: نمودار دوران پلاستیک برای تیر تقویت شده با FRP و تیر RBS



شکل 14: نمودار دوران پلاستیک برای تیر تقویت شده با FRP و تیر RBS



شکل 15: نمودار دوران دوران پلاستیک برای تیر تقویت شده با FRP و تیر RBS



شکل 16: نمودار مقایسه ضریب شکل پذیری مدل های مورد مطالعه

### نتیجه گیری

نوع، ابعاد و ترکیبات الیاف FRP مورد نظر در مقاوم سازی نقش مهمی در افزایش مقاومت نهایی اتصال دارد. نتایج تحلیل المان محدود غیرخطی حاکی از آن بود که این مدل سازی به خوبی می تواند رفتار و ظرفیت باربری سازه ها و اتصالات را بخصوص در اهداف مقاوم سازی بیش بینی کرده و همین طور باعث جابجایی مفصل پلاستیک به سمت درون دهانه تیر می شود. نتایج حاصل از تحلیل تیر RBS نشان داد، با جابه جایی محل تشکیل مفصل پلاستیک و بهبود شکل پذیری باعث کاهش شکست در اتصالات شده و فلسفه تیر ضعیف ستون قوی به خوبی انجام گرفته و اما ظرفیت باربری کاهش می یابد. در ضخامت های کم FRP، مفصل پلاستیک جابه جا شده و ظرفیت نیرو افزایش می یابد. در نتیجه افزایش ضخامت تأثیری در بهبود رفتار ندارد. ظرفیت باربری الاستیک FRP با توجه به خواص آن نسبت به RBS افزایش یافته اما شکل پذیری RBS بیشتر می باشد.

### مراجع

1. مقایسه شکل پذیری و ظرفیت باربری تیرهای فولادی RBS و تقویت شده با FRP، محمد رضا فاضل زاده، چهارمین کنفرانس بین المللی فناوری های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، مهر 1396.
2. ضیاءالحق، ح. علایی، 1931، ارزیابی تحلیلی عملکرد لرزه ای قاب های بتن مسلح مقاوم شده با FRP، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

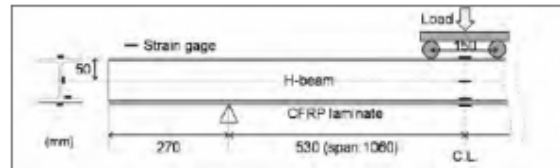
Ronagh, H. R. (2015, August). Development of a nonlinear & .Baji, H., Eslami, A .3  
 FE modelling approach for FRP-strengthened RC beam-column connections. In  
 Structures (Vol. 3, pp. 272-281). Elsevier

#### تیرهای فولادی تقویت شده توسط الیاف FRP

امروزه استفاده از روش‌های جدید **مقاوم‌سازی** سازه‌ها با توجه به پیشرفت تکنولوژی و افزایش توجه به ایمن‌سازی سازه‌ها، کاربرد فراوانی دارند. از جمله این روش‌ها استفاده از کامپوزیت‌های پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) است. این کامپوزیت‌ها دارای مزایای بسیاری مانند مقاومت و مدول الاستیسیته بالا، خواص ضد خوردگی، نصب آسان، وزن کم و هزینه مناسب می‌باشند. ورق‌های FRP به طور معمول حداقل دو برابر و حتی می‌توانند ده برابر مقاومت ورق‌های فولادی را داشته باشند در صورتی که وزن آن‌ها تنها 22٪ وزن ورق‌های فولادی را داشته باشند. از کامپوزیت‌های FRP در تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی استفاده می‌شود. در این پژوهش به بررسی لذا شناخت رفتار مصالح فولادی و مصالح CFRP پرداخته و رفتار تیرهای فولادی بعلاوه CFRP در معرض تغییرات حرارت بررسی شده است. به دلیل رفتار متفاوت دو ماده در برابر تغییرات حرارتی، ممکن هست نامنظمی‌های رفتاری در محل تماس دو ماده به وجود آید که به بررسی عملکرد دو ماده در کنار هم پرداخته می‌شود.

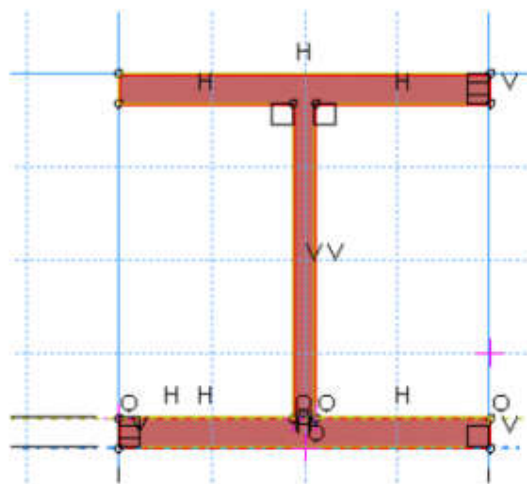
#### روش حل

بارگذاری روی تیر فولادی مورد نظر در شکل زیر مشخص شده است. شرایط گیرداری تیر ثابت فرض خواهد شد و نمودار حداکثر بار وارده قابل تحمل به تیر در برابر جابجایی ترسیم شده است.



شکل 1: اعمال بارگذاری خمشی به قطعه

- ابعاد تیرهای انتخابی برای تحقیق حاضر مطابق با جدول 1 می‌باشد، این جدول به گونه‌ای تعبیه شده است تا بتوان اثر طول، ضخامت و ابعاد مختلف تیر را در درجه حرارت‌های مختلف پوشش داد. شکل 2 نمایی از سطح مقطع تیر را نشان می‌دهد به منظور بررسی اثر افزایش CFRP در این تحقیق ابعاد تیر ثابت در نظر گرفته می‌شود و دمای بحرانی 200، 400 و 800 در نظر گرفته خواهد شد. متغیرهای اصلی تحقیق حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:
- بار 100 کیلو نیوتن در نظر گرفته شده و در صورتیکه تیر قادر به تحمل بار وارده نباشد میزان بار بحرانی قابل تحمل تیر کاهش پیدا می‌کند.
  - در مرحله اول پلیت‌ها به صورت سرتاسری در زیر و روی طول تیر به کار گرفته می‌شود.
  - در مرحله‌ی دوم شرایط گیرداری تیر تغییر می‌کند و تیر به صورت یک سر مفصل – یکسر گیردار لحاظ می‌گردد.
  - در مرحله‌ی سوم پلیت در زیر محل اعمال بار حذف شده و در قسمت زیرین تیر تنها یک پلیت سرتاسری به کار گرفته می‌شود.
  - در مرحله‌ی چهارم پلیت به مساحت یک چهارم طول کلی تیر در ابتدا و انتهای تیر به کار گرفته می‌شود و در رو و زیر تیر به کار گرفته می‌شود.
  - در مرحله پنجم، چهار پلیت در نواحی مختلف به کار گرفته می‌شود که مجموع طول پلیت‌ها نصف طول تیر می‌باشد.
  - در مرحله ششم هم به تغییر در ضخامت ورق پرداخته می‌شود و ضخامت آن 2.1 برابر مرحله‌ی چهارم به کار گرفته خواهد شد.



شکل 2: سطح مقطع تیر فولادی انتخابی برای طراحی

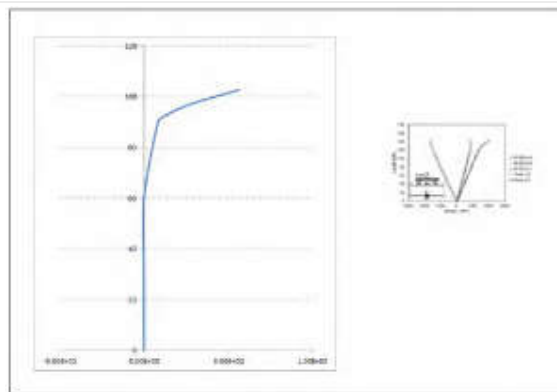
در جدول 1 مشخصات تیر آهن انتخابی و طول تیر آهن و همچنین طول ورق انتخابی که منجر به تغییر در مساحت پلیت ها شده، نشان داده شده است. ضخامت ورق در تمامی حالت ها یک میلی متر در نظر گرفته شده است که در مرحله آخر به تغییر در ضخامت ورق پرداخته شده است و اثر آن در زمانی که پلیت ها کمترین کمک را به تیر آهن می کند سنجیده شده است. دمای بحرانی تیر 200 و 400 و 800 درجه در نظر گرفته شده است. در نهایت با تغییر مساحت پلیت ها عملکرد تیر سنجیده می شود و همچنین با تغییر در محل قرارگیری پلیت بهترین محل معرفی می گردد.

جدول 1: ابعاد انتخابی مقطع برای تیر فولادی - ابعاد ورق

شماره نمونه	طول بال (میلی متر)	طول جان (میلی متر)	ضخامت جان (میلی متر)	طول تیر (میلی متر)	طول ورق CFRP	ضخامت ورق CFRP	دمای تیر	شرایط گیرداری
1	100	100	6	1600	سرتاسری	1	200/400/800	مفصلی غلتکی
2	100	100	6	1600	سرتاسری	1	200/400/80	مفصلی



غلطکی	0	ی						
مفصلی	200/400/80 0	1	عدد 2 با طول 400	1600	6	100	100	3
مفصلی	200/400/80 0	1	عدد 4 با طول 200	1600	6	100	100	4
مفصلی	200/400/80 0	1.5	عدد 2 با طول 400	1600	6	100	100	5



شکل 3: میزان تنش ایجاد شده در قطعه و مقایسه آن با مرجع

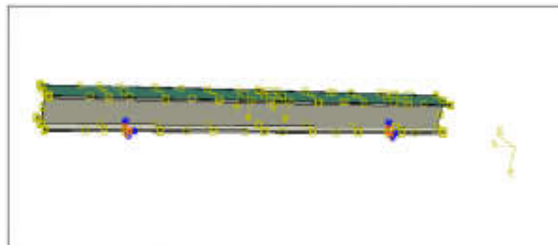
در اینجا به بررسی تغییرات دمایی مختلف تیر فولاد پرداخته و نتایج به وسیله نرم افزار آباکوس تحلیل گرمایی و حرارتی شده است. پس از آن تیر با ابعاد مشخص و قرار گیری ورق در طول تیر تحت بارگذاری مشخص قرار گرفته شده است و میزان بار بحرانی در برابر کرنش وارده محاسبه شده است.

### ارائه نتایج

از آنجا که هدف ارزیابی عملکرد حرارتی CFRP و فولاد می باشد. میزان تنش اعمالی و همچنین جابجایی در درجه حرارت های بحرانی نمایش داده می شود و همچنین نمودار بار – جابجایی برای نمونه های مختلف ترسیم می گردد.

### نمونه های شماره 1 الی 5:

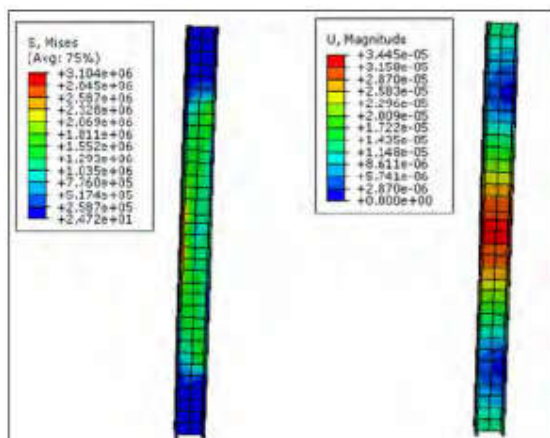
هدف از بررسی نمونه های شماره 1 تا 5، اشاره به این مهم می باشد که تغییر در ابعاد و شرایط گیرداری تیر تا چه حد می تواند در افزایش و یا کاهش مقاومت تیر در برابر دما وارده مؤثر باشد، لذا ابعاد مقطع فولادی ثابت و میزان بار بحرانی در درجه حرارت های مختلف 200، 400 و 800 سنجیده می شود. همان طور که مشاهده می شود تغییر در تعداد پلیت ها و همچنین شرایط گیرداری تیر منجر به تغییر در میزان جابجایی و تنش وارده به تیر می گردد. شکل 4 در ادامه تیر فولادی ترسیم شده در نرم افزار آباکوس و شرایط گیرداری را نشان می دهد.



شکل 4: حرارت - بارگذاری خمشی وارده بر تیر

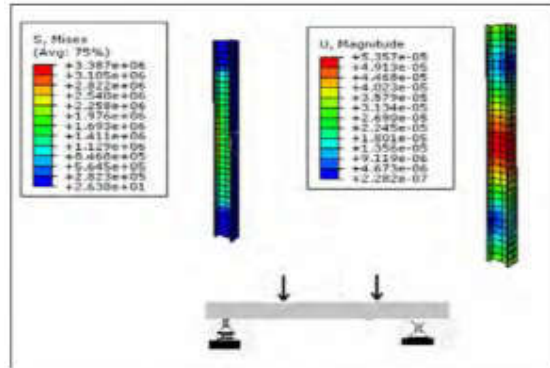
### تیر شماره 1 :

تیر به وسیله دو ورق CFRP در قسمت بالایی و تحتانی و در دماهای مختلف 200، 400 و 800 درجه سانتی گراد مدل سازی شده است، مطابق شکل، میزان حداکثر جابجایی و تنش در نقاط میانی تیر به وجود آمده است. دما در مراحل بعدی افزایش یافته و افزایش دما منجر شده است که تنش های بیشتری به سازه اعمال گردد در حقیقت لایه CFRP به دلیل بحران تنش در مقطع فولادی از خود عملکرد بیشتری نشان داده و این لایه با توجه به محل قرارگیری آن که در مدل های اولیه به صورت سرتاسری بوده است توانسته است در دماهای بالا از تیر فولادی محافظت نماید و با جذب بار اعمالی به عملکرد بهتر تیر کمک کند. در دمای 400 درجه سانتی گراد میزان تنش وارده به لایه CFRP و تیر فولادی در شرایط مفصلی به 2.41 برابر حالت قبل رسیده است که نشان می دهد در دماهای بالاتر تنش وارده به تیر بیشتر می باشد و لزوم مقاوم سازی آن جهت بارگذاری حرارتی - گرمایی ضروری می باشد. دمای بحرانی افزایش می یابد و این بار مقدار 800 درجه سانتی گراد انتخاب می شود، میزان تنش تقریباً 3 برابر تیر فولادی زمانی که در دمای 200 درجه در شرایط مفصلی قرار داشت می رسد، از طرفی بار وارده در چهار نقطه به صورت متمرکز 15 کیلو نیوتن بوده است که تیر فولادی قادر به تحمل این دما تنها برای دمای 200 درجه بوده است و پس از آن المان های تیر و لایه CFRP نابود شده اند، شکل 5 تغییرات تنش و کانتورهای جابجایی را در سرتاسر تیر نشان می دهد.



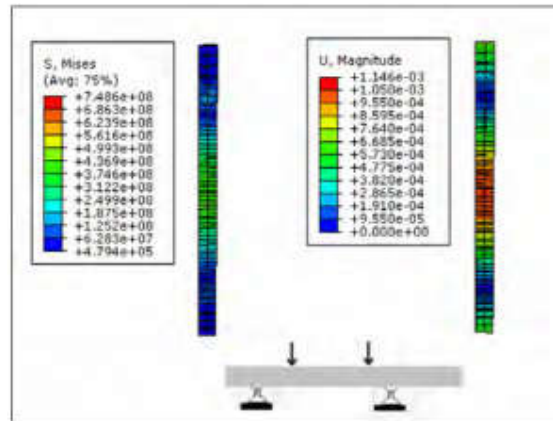
شکل 5: تنش - جابجایی خمشی وارده بر تیر دمای 200 درجه

این بار تیر به صورت یک سر مفصل - یک سر غلتکی مدل شده است. میزان تنش وارد شده در صورت تغییر شرایط گیرداری و همچنین میزان جابجایی افزایش یافته است.



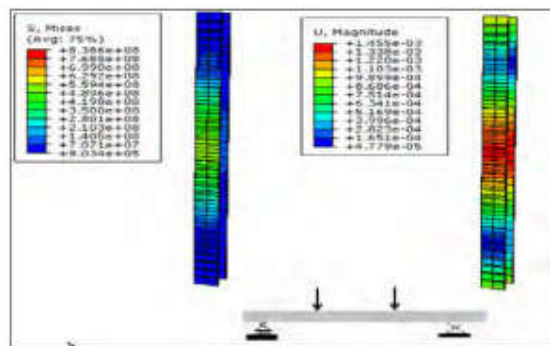
شکل 6: تنش - جابجایی خمشی وارده بر تیر دمای 200 درجه

بررسی نتایج در مورد تیرهای فولادی حاکی از این حقیقت می باشد که میزان جابجایی در این تیرها پایین می باشد افزایش دما با افزایش تنش در دمای 400 درجه و کاهش جابجایی همراه بوده است. میزان حداکثر جابجایی در نقاط میانی تیر محل اعمال بارها رخ داده است که به تغییر شرایط گیرداری پرداخته می شود و عملکرد تیر در دمای 400 درجه بررسی می شود شکل 7 و شکل 8 میزان جابجایی و تنش وارده به دست آمده است.



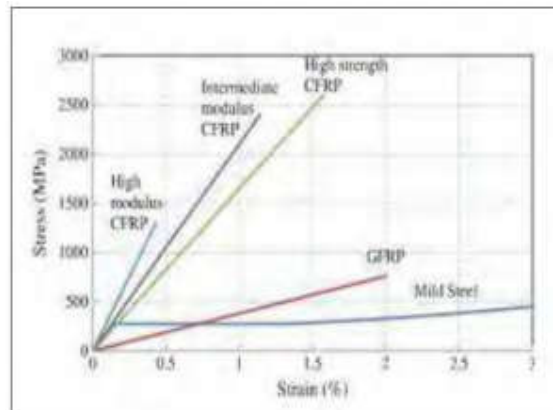
شکل 7: تنش - جابجایی خمشی وارده بر تیر دمای 400 درجه

میزان تنش در این مرحله 12.1 برابر حالت قبلی شده است و همچنین میزان جابجایی 0.99 برابر حالت مفصلی به دست آمده است. همانطور ورق CFRP منجر شده است که تنش حداکثر به ورق وارد شود و جهت کاهش تنش حرارتی و همچنین خمشی در طول تیر فولادی بسیار مؤثر بوده است. لازم به ذکر است، تیر بدون ورق CFRP در این درجه حرارت قادر به تحمل بار وارده نیست.

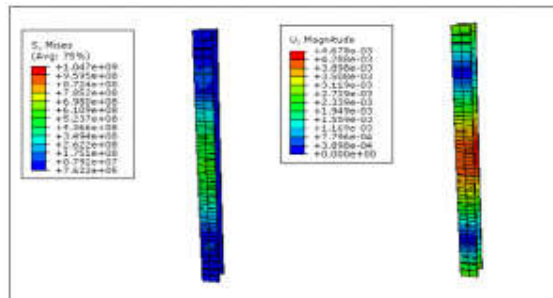


شکل 8: تنش - جابجایی خمشی وارده بر تیر دمای 400 درجه

با افزایش دما تا 800 درجه المان‌های تیر تحت بار وارده نابود می‌شوند، اما تنش وارده بر تیر افزایش می‌یابد چرا که دمای بحرانی افزایش یافته است و فولاد و لایه CFRP مجبور می‌باشند که تحت بارگذاری وارده حداکثر مقاومت را از خود نشان دهند، این تنش بحرانی نشان از این مهم می‌باشد که تا چه حد می‌تواند این لایه و تیر تنش بحرانی را تحمل کند که همانطور که در شکل نشان داده شده است، استفاده از لایه CFRP در دماهای بالا منجر به افزایش تغییرات تنش بیشتری در دمای 200 به 400 درجه شده است تا دمای 400 تا 800 درجه، لذا می‌توان گفت استفاده از این لایه در دماهای 0 تا 400 درجه تا حدودی مؤثرتر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ورق‌های CFRP منجر می‌شود مقاومت سازه در برابر آتش در دماهای بالا افزایش یابد و اضافه تنش وارده به فولاد که توانایی تحمل آن را ندارد به سازه CFRP وارد گردد. نمودار زیر میزان مقاومت انواع سازه‌های CFRP را نشان می‌دهد که همانطور که در شکل پیداست CFRPها قادر به تحمل تنش تا 3000 مگاپاسکال هستند که نسبت به سایر مصالح تنش قابل تحمل بالایی دارند، لذا در زمانی که فولاد در درجه حرارت‌های بالا با افت عملکرد روبه رو می‌شود و قادر به تحمل تنش اضافی نمی‌باشد این ورق‌ها منجر می‌شوند قدرت تحمل فولاد افزایش یابد. شکل 9 میزان تنش بحرانی وارده شده برای انواع FRP و فولاد نشان می‌دهد که همانطور که نشان داده شده است CFRP بالاترین مقاومت را نسبت به سایر FRP ها داشته است.



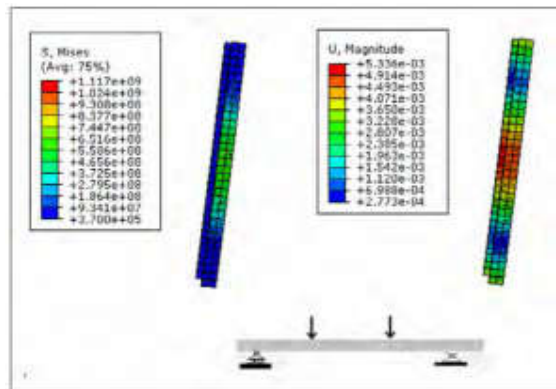
شکل 9: میزان تنش - کرنش CFRP



شکل 10: تنش - جابجایی وارده بر تیر دمای 800 درجه

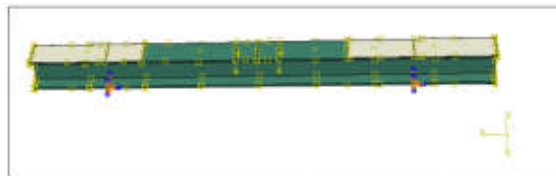
شکل 10 و همچنین 11 عملکرد تیرهای فولادی را در دمای 800 درجه با ورق CFRP نشان می‌دهد؛ همانطور که در این اشکال مشخص می‌باشد تغییر در نوع شرایط گیرداری تیر منجر می‌شود تا میزان تنش در تیر در حالت غلتکی - مفصلی به 1.06 برابر حالت مفصلی در دمای 800 درجه برسد و همچنین میزان جابجایی 1.14 برابر حالت مفصلی گردد. در نقاط میانی تیر بیشترین مقدار تنش و جابجایی رخ داده است که دلیل این مهم قرار گرفتن در زیر نقطه می‌باشد که بار بدان وارد شده است و در نقاط تکیه‌گاهی کمترین مقدار جابجایی به وجود آمده است. در تکیه‌گاه

مفصلی – غلتکی کانتور های رنگی آبی جابجایی به آبی کم رنگ تبدیل شده است که نشان از جابجایی تقریبی تیر در این نقاط می باشد در حالیکه در تکیه گاه مفصلی هیچ گونه جابجایی مشاهده نمی شود .



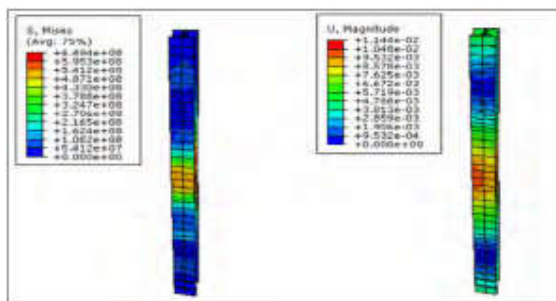
شکل 11: تنش – جابجایی خمشی وارده بر تیر دمای 800 درجه نمونه ی شماره 3 :

در این دو نمونه طول ورق تقویتی متغیر در نظر گرفته خواهد شد و با کاهش آن عملکرد آن نسبت به حالت قبل سنجیده می شود، نتایج این قسمت نشان دهنده ی این مهم می باشد که کاهش در مقدار طول ورق تقویتی منجر به کاهش بار قابل تحمل تیر گردیده است، از طرفی در طول یکسان استفاده از تعدد ورق ها منجر به افزایش تحمل تیر شده است، شکل 12 مدل سازی تیر را در نرم افزار آباکوس نشان می دهد .



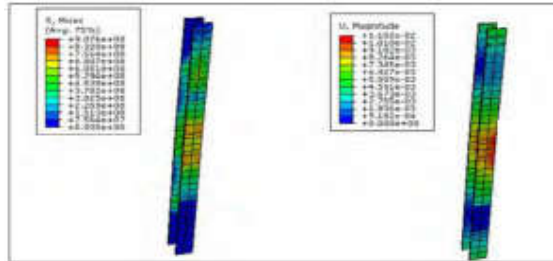
شکل 12: شکل مدل شده در نرم افزار آباکوس تیر فولادی بعلاوه ورق CFRP

در این قسمت از تحقیق به بحث و بررسی پیرامون ورق های CFRP که در دو طرف تیر قرار گرفته است خواهد شد، محل اعمال تنش نهایی و جابجایی در نقاط وسطی تیر می باشد، این نقطه مکانی می باشد که بار به آن وارد نشده است، ابعاد این تیر همانند نمونه شماره یک در نظر گرفته شده است، میزان تنش در این تیر حدوداً ۸۲.۲ برابر تیر با ورق سرتاسری شده است، نتیجه نشان دهنده ی این مهم می باشد که کاهش مساحت ورق منجر شده است که تنش نهایی در تیر افزایش یابد و همچنین میزان جابجایی به شدت افزایش یافته است ، لذا می توان گفت استفاده از ورق CFRP به صورت سرتاسری در کاهش تنش ها و جابجایی ها بسیار مؤثر بوده است. شکل 12 تا 11 نتایج مدل سازی این تیر را در نرم افزار آباکوس نشان می دهد که میزان تغییر شکل تیر نسبت به گروه نمونه های قبلی افزایش یافته است.



شکل 13: تنش – جابجایی خمشی وارده بر تیر در دمای 200 درجه

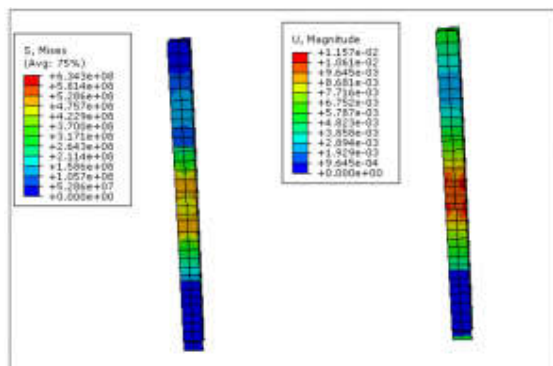
دمای بحرانی تیر افزایش یافته است و به مقدار ۱۲۲ درجه سانتی گراد رسیده است، نتایج در شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی این مهم می‌باشد که کانتورهای بحرانی تنش در نقاط میانی‌تر رو به گسترش می‌باشد میزان تنش بحرانی تقریباً ۲.۱ برابر حالت قبل شده است که به دلیل بالا رفتن دما و عدم توانایی تیر در تحمل مقدار دمای بحرانی بوده است. همچنین میزان تنش بحرانی ۹.۱ برابر گروه نمونه یک در دمای ۱۲۲ درجه شده است. استفاده از این ورق‌ها در تیر در ماهای بالا به طور جدی در کاهش جابجایی و کنترل تنش مؤثر بوده است.



شکل ۱۴: تنش - جابجایی خمشی وارده بر تیر دمای ۴۰۰ درجه - ۸۰۰

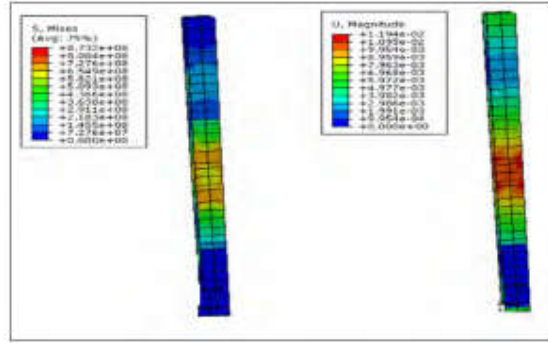
این ستون قادر به تحمل تغییرات دما تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد می‌باشد و پس از آن هیچ تأثیر و تغییری در جابجایی و تنش آن به وجود نمی‌آید. لذا می‌توان گفت استفاده از ورق‌های سرتاسری در تیرهای در کنترل تنش و جابجایی مؤثر می‌باشد حتی استفاده از این گونه ورق‌ها در بهبود رفتار تیر در دمای ۸۰۰ درجه منجر به افزایش تنش قابل تحمل تیر گردیده است درحالی‌که در گروه نمونه‌های شماره ۳، در دماهای بالا تنش‌ها تغییر نکرده‌اند لذا کاهش مساحت منجر شده که تیر تنها بتواند تا آستانه‌ی ۴۰۰ درجه مقاومت کند و پس از آن المان‌ها نابود شده‌اند. نمونه‌ی شماره ۵: افزایش ضخامت

شکل‌های نتایج حاصل از افزایش ضخامت ورق در نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار آباکوس می‌باشد، نتایج نشان داده است که افزایش ضخامت ورق منجر به افزایش نیروی قابل تحمل توسط تیر در درجه حرارت‌های مختلف خواهد شد. لذا می‌توان گفت طول و ابعاد ورق‌های تقویتی دو فاکتور مهم در افزایش قدرت تحمل تیرهای فولادی در برابر بارگذاری حرارتی می‌باشد.



شکل ۱۵: تنش - جابجایی وارده بر تیر دمای ۲۰۰ درجه - دو پلیت

شکل ۱۵ نتایج جابجایی و تنش در دمای ۲۰۰ درجه نشان می‌دهد که با ضخامت ۱.۵ میلی‌متر تحت بارگذاری حرارت قرار گرفته است و همین‌طور دما افزایش یافته است و در دمای ۴۰۰ درجه میزان جابجایی و تنش در تیر به دست آمده است و پس از آن المان‌های تیر قادر نخواهد بود میران بار وارده را تحمل کند و المان‌های تیر Aborted شده است.



شکل 16: تنش - جابجایی وارده بر تیر دمای 400 و 800 درجه - دو پلیت

### نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مساحت انتخابی ورق‌های CFRP، بهترین عملکرد را در بارگذاری حرارت و آتش از خود نشان داده است، همچنین در مساحت برابر زمانی که ورق در ناحیه بحرانی (حداکثر جابجایی) قرار گرفته است بیشترین تأثیر را داشته است و می‌توان بار اعمالی را تا 6 برابر افزایش داد. نتایج تحقیق نشان داده است که استفاده از ورق CFRP در کاهش تنش‌های وارده به تیرهای فولادی مؤثر بوده است و هرچه قدر مساحت ورق بیشتر گردد تأثیر آن بیشتر می‌شود.

- هر چه قدر ضخامت ورق CFRP افزایش یابد میزان بار قابل تحمل توسط تیر افزایش می‌یابد.
- هرچه قدر میزان مساحت ورق CFRP افزایش یابد میزان بار بحرانی ورق CFRP افزایش می‌یابد.
- قرارگیری ورق CFRP در مکانی که حداکثر جابجایی در آن رخ می‌دهد (زیر تیر) منجر به عملکرد بهتر تیر آهن می‌گردد.
- استفاده از ورق CFRP به منظور بهتر کردن عملکرد تیر در شرایط دمایی مختلف در دماهای بالا مؤثر بوده است.

### منابع

1. ارزیابی عملکرد حرارتی تیرهای فولادی مقاوم شده با ورق‌های CFRP. بهرام مرادی آثار، محمود هرسچیان، چهارمین کنفرانس بین‌المللی فناوری‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، مهر ماه 1396.
2. Bandyopadhyay, S. (2014). & Liu, H. B., Zhao, X. L., Bai, Y., Singh, R. K., Rizkalla, S. The effect of elevated temperature on the bond between high modulus carbon fibre reinforced polymer sheet and steel. Australian Journal of Structural Engineering, 15(4), 355-366
3. Liu, M. (2016). Fire resistance of stainless steel & Fan, S., Chen, G., Xia, X., Ding, Z. beams with rectangular hollow section: Numerical investigation and design. Fire Safety Journal, 79, 69-90

### مقاوم سازی ستون‌های بتن آرمه

با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی ارتقای کیفیت زیرساختی ساختمان‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است. ضعف و خرابی در دال‌ها، ستون‌های بتن آرمه، تیرها و ... تحت تأثیر عواملی مانند ضعف در اجرا یا طراحی، بالا رفتن سن سازه، تغییر کاربری و افزایش بارگذاری و یا حوادثی همچون زلزله می‌باشد.

سازه‌ها با روش‌های مختلفی مقاوم‌سازی می‌شوند. دیوارهای برشی، قاب‌های مقاوم خمشی، مهاربندهای برون محور فولادی هر کدام ویژگی گسیختگی خاص خود را دارند. یکی از روش‌های نسبتاً جدید تقویت اجزاء بتنی، محصورشدگی مناطق تحت تنش و برش با CFRP، GFRP و AFRP. این روش تقویت به علت خصوصیات مواد کامپوزیتی نظیر وزن

سبک، رفتار الاستیک خطی تا نقطه گسستگی، مقاومت کششی و خستگی خیلی بالا، مدول الاستیسیته بالا، خواص ضد خوردگی و سهولت انطباق با هندسه المان‌های تقویت‌شده و ... خیلی مرسوم گردیده‌اند. بکار بردن سیستم سازه‌های بتنی پیش‌تنیده راه‌حلی برای نداشتن ترک‌های دائمی، کاهش وزن سازه، داشتن دهانه‌های بزرگ و داشتن معماری خاص در سازه می‌باشد.

پیش‌تنیده کردن مواد کامپوزیتی راه‌حل اساسی جهت افزایش ظرفیت باربری و استفاده مطلوب از ورق‌های CFRP است. می‌توان از FRP های پیش‌تنیده در تقویت سازه‌های موجود و بستن ترک‌های ایجاد شده در سازه‌های موجود نیز استفاده کرد. اتلاف انرژی و سلسله مراتب شکست دو فاکتور مهم در عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی می‌باشد. در بسیاری از ساختمان‌ها که براساس آیین‌نامه‌های قدیمی طراحی شده‌اند مفصل‌های پلاستیک در نزدیکی اتصالات و در بر ستون تشکیل می‌گردد که می‌تواند منجر به ناپایداری کلی در سازه‌ها گردد. به همین دلیل در بسیاری از آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده است که اصل ستون قوی-تیر ضعیف به منظور انتقال مفاصل پلاستیک از بر ستون‌ها مد نظر قرار گیرد. طی دهه‌های اخیر، تحقیقات گوناگونی باهدف انتقال مفاصل پلاستیک به داخل تیر و بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن آرمه صورت پذیرفته است. اما بیشتر این روش‌ها، مانند افزودن المان به سازه و یا بهبود جزئیات آرماتوربندی تیرها، تنها می‌تواند برای ساختمان‌های در حال احداث استفاده شود.

### اجزای تشکیل‌دهنده FRP

در مواد مرکب پلیمری عموماً سه ناحیه متمایز شامل فاز پیوسته (ماتریس)، فاز ناپیوسته (تقویت‌کننده) و لایه مرزی بین این دو فاز وجود دارد که تعیین‌کننده خواص و مشخصه‌های ماده مرکب می‌باشد. الیاف، نقش اصلی در مقاومت و مشخصات مکانیکی ماده مرکب دارد. ماتریس، نقش توزیع بار بین الیاف و محافظت آن در برابر عوامل محیطی دارد. عوامل اصلی مؤثر در خواص فیزیکی کامپوزیت‌های FRP عبارتند از:

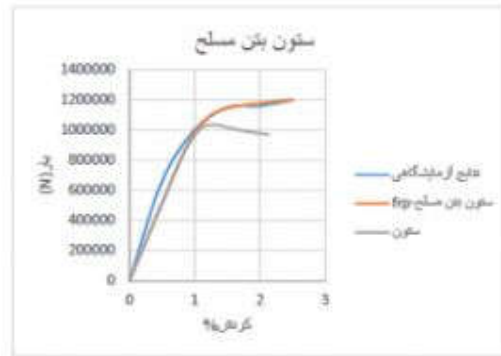
- خواص مکانیکی الیاف
- آرایش الیاف
- طول و جنس الیاف
- درصد ترکیب الیاف
- خواص مکانیکی ماتریس پلیمری
- چسبندگی و پیوند الیاف و ماتریس

استفاده از صفحات فولادی روشی بسیار رایج در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح بوده است که این تکنیک برای پل‌ها و ساختمان‌ها و سطوح کششی و فشاری بتن بکار میرفته است. معایب این روش عبارت بودند از: 1). تخریب اتصال در حمل اتصال فولاد به بتن به دلیل خردگی فولاد 2). دشوار بودن کارکردی با صفحات در محل ساخت 3). ایجاد اتصالات نامناسب با توجه به محدودیت در حمل و نقل صفحات طویل. این معایب منجر به جایگزینی صفحات FRP بجای صفحات فولادی شد. صفحات FRP همچنین به طور گسترده جهت مقاوم‌سازی ستون‌ها توسط دور پیچ کردن استفاده می‌شوند.

### محصورشدگی

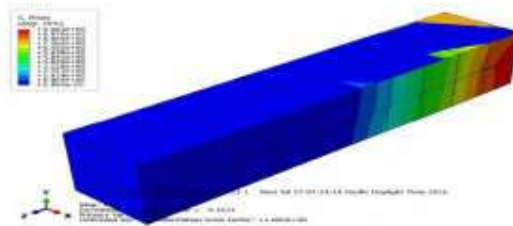
محصور شدن بتن از روش‌های بسیار مؤثر در بالا بردن کرنش شکست و افزایش مقاومت و همچنین جذب انرژی است. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، نمودار تنش - کرنش محوری شکل 1 به دست آمده است که همان‌گونه که قابل مشاهده است، با استفاده از پوشش CFRP در ازای با 1200 کیلو نیوتن، کرنش شکست به 2/5٪ می‌رسد. در صورتی که در ستون بتن مسلح فاقد پوشش در ازای بار تقریباً 1000 کیلو نیوتن کرنش شکست تقریباً به 2٪ می‌رسد.



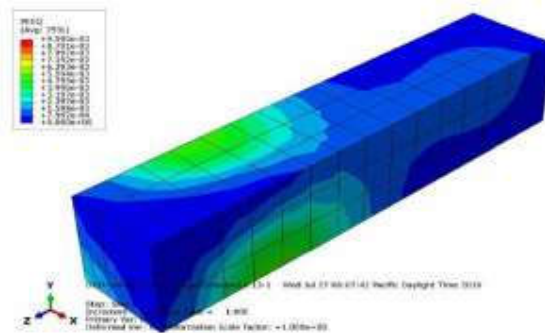


برای مدلسازی و صحت سنجی ستون بتن آرمه از آزمایشات انجام شده استفاده شده است. رفتار ستون‌های بتنی با ابعاد و درصد آرماتورهای مختلف که با پوشش‌های کامپوزیتی تقویت شده‌اند تحت بارگذاری فشاری بررسی گردید و نتایج حاصله مبنی بر افزایش مقاومت و ظرفیت باربری می‌باشد و برای بررسی عملکرد ستون تقویت شده با پوشش‌های کامپوزیتی در برابر بار جانبی مدل مفروض طبق آیین‌نامه ATC-24 تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و منحنی چرخه‌ای در دو حالت با پوشش و بدون پوشش ترسیم شده است.

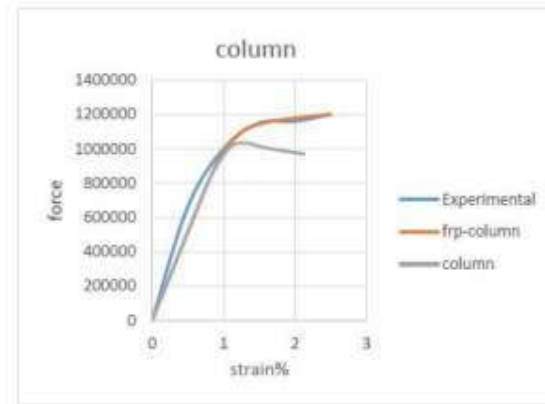
شکل 1: توزیع تنش فون میزز ستون بتن مسلح به همراه پوشش CFRP



شکل 2: توزیع کرنش پلاستیک ستون بتن مسلح با پوشش CFRP



شکل 3: منحنی بار محوری - کرنش محوری ستون بتن مسلح



## نتایج

با توجه به نتایج قابل مشاهده در منحنی بار محوری - کرنش محوری ستون که نتیجه حاصل از مدل سازی در نرم افزار اباکوس مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و در کل افزایش ظرفیت باربری ستون تقویت شده با دولایه CFRP را نشان می‌دهد، حداکثر بار قابل تحمل مدل فاقد پوشش تقریباً KN96 بوده است و وقتی نمونه توسط دو لایه تقویت می‌شود، حداکثر بار قابل تحمل به KN120 افزایش می‌یابد. یعنی در حدود 25 درصد افزایش ظرفیت باربری را به همراه دارد و افزایش کرنش محوری مبین افزایش شکل پذیری و جذب انرژی می‌باشد.

رفتار تک محوری بتن در فشار به دلیل وجود و گسترش ترک‌های ریز معمولاً به صورت غیر خطی می‌باشد تا زمانیکه بار وارده به بتن کمتر از 31 درصد ظرفیت باربری آن باشد ترک‌های موجود نسبتاً پایدار بوده و گسترش نمی‌یابند، بنابراین رفتار بتن در این ناحیه خطی است با افزایش بار تا نقطه‌ی ماکزیمم این ترک‌های موئی رشد کرده و سختی بتن را کاهش می‌دهند و موجب رفتار غیر خطی می‌شوند. افزایش ترک‌های موئی در داخل ملات افزایش یافته و سرانجام در هنگام خرابی ترک‌های موجود در ملات و ترک‌های انتقال به هم متصل گشته و سبب تخریب نمونه می‌گردند. منحنی تنش - کرنش فشاری بتن پس از نقطه‌ی اوج شیب نزولی دارد که بیانگر سختی و انعطاف پذیری کم و از دست رفتن پایداری در این منطقه است. که استفاده از ورق‌های FRP ضمن ایجاد محصورشدگی و افزایش ظرفیت جذب بار، باعث افزایش شکل پذیری و جلوگیری از شکست ناگهانی عضو می‌شوند.

منابع

1. ارزیابی عملکرد ستون بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP در برابر بارگذاری جانبی، علی نیکخواه سمیرا زنجانی، کنفرانس بین المللی عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط زیست در هزاره سوم، شهریور 1395.
2. نشریه 345، "راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، 1385.

## 4-1-1- استفاده از روش مقاوم سازی با مصالح FRP

سابقه استفاده از مصالح در صنعت ساختمان کشور ایران به حدود یک دهه می‌رسد اما امروزه استفاده از کامپوزیت های با زمینه پلیمری در بهسازی سازه ها از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است که دلیل اصلی آن نیاز به افزایش عمر بهره برداری و ارتقای اساسی زیرساخت ها در تمامی نقاط دنیا می باشد. الیاف FRP ساخت شرکت [CTech-LLC](#) آلمان می توانند توسط روش های دستی، دورپیچی با دستگاه مکانیزه، دستگاه آغشته ساز الیاف و ... بر روی المان های مورد نظر نصب گردند.

1. آماده سازی سازه مقاوم سازی: قبل از هرگونه اقدام به تقویت با [ورقه های FRP](#) بایستی در صورت نیاز بتن تخریب شده را جدا کرده و در صورت رسیدن به آرمانتور خورد شده اقدامات مربوط به ترمیم و یا تعویض آن ها را صورت دهیم.

2. به کار بردن آستری یا پرایمر FRP: برای افزایش چسبندگی و جلوگیری از جدایش ورقه FRP از لایه چسب یا [رزین اپوکسی](#) بین بتن و ورقه، با غلتک یک لایه اپوکسی FRP با لزجت کم به طور موضعی روی سطح مورد نظر به عنوان پرایمر می مالند.
3. بتونه کردن سطح مقاوم سازی: یک لایه چسب FRP با ویسکوزیته بالا برای پرکردن خلل و فرج و فرورفتگیها در محل‌های مورد نیاز به کار برده می شود. چسبندگی مناسب الیاف یا لمینت FRP با اجرای مستقیم مصالح ترمیم بر روی لایه زیرین که به درستی آماده شده است حاصل می شود.
4. بریدن شیت بر روی یک سطح تمیز و آماده که عاری از هر گونه آلودگی، چسب و ناصافی است ورقه FRP مطابق مشخصات و جزئیات ارائه شده بریده می شود.
5. اشباع کردن الیاف FRP: در پروژه های بزرگ مقاوم سازی ورقه ها با دستگاه های گرداننده خاص در کارخانه اشباع می شوند و لایه اپوکسی یا ماتریس رزین به آن اضافه می شود و فقط کافی است در محل مورد نظر چسبانده شود ولی در کارهای کوچکتر در محل کارگاه رزین FRP روی سطح موردنظر مالیده شده سپس ورقه FRP خشک و بدون چسب بر روی سطح چسبانده می شود.
6. نظارت بر کنترل کیفی FRP: در زمان عمل آوری 2 تا 6 ساعت بسته به شرایط حاکم، سطح مقاوم سازی شده با FRP چک و کنترل می شوند تا هیچ گونه حباب هوا بین لایه FRP و بتن حبس نشده باشد و خم شدگی یا بیرون زدگی وجود نداشته باشد.
7. اطمینان از کیفیت اجرای [مقاوم سازی با FRP](#): گزارش های کنترل کیفیت تهیه شده و به خوبی نگهداری می شوند تا اطمینان از اجرای موفقیت آمیز ترمیم، تقویت و تعمیر با FRP حاصل شود.
8. لایه رویه FRP: پس از عمل آوری و نظارت بر کیفیت اجرای مقاوم سازی، ورقه های FRP به منظور حفاظت، نگهداری و حفظ زیبایی و معماری با یک لایه بتن رویین یا ماده ای دیگر پوشانده می شوند.

#### مقاوم سازی دیوار برشی

دیوارهای برشی که جهت [مقاوم سازی](#) سازه‌ها کاربرد دارند، در اشکال مختلفی ساخته می‌شوند که رایج‌ترین نوع آن‌ها دیوار برشی بتن آرمه می‌باشد. طراحی این دیوارها بر اساس ظرفیت تغییر شکل و عملکرد تخریب می‌باشد. معمولاً در دهانه‌های بزرگ طبقات پایینی قاب‌ها، عوارض شدیدی رخ می‌دهد و مکانی است که دیوارها باید به شکلی طراحی گردند که جا به جایی جانبی سازه را محدود کنند. با توجه به محدودیت نسبت نیروی محوری و آرما توره‌های عرضی مورد نیاز در المان‌های مرزی، مقدار فولاد مورد نیاز در این مقاطع زیاد خواهد بود که موجب تراکم بالای میلگرد در اجزای مرزی شده و مشکلاتی در بتن‌ریزی در پی خواهد داشت.

از دیگر معایب استفاده از این دیوارها ضخامت زیاد آن‌ها خصوصاً در طبقات زیرین که نیروهای محوری بزرگ می‌باشد، است که باعث اشغال فضای مفید طبقه می‌شود. از آنجایی که در بحث مقاوم‌سازی معیارهای معماری همواره باید مورد توجه قرار گیرند، ممکن است استفاده از این نوع دیوارها با توجه به ضخامت آن‌ها موجب بروز مشکلاتی گردد. با گذشت زمان، نوع دیگری از دیوارهای برشی فولادی به عنوان جایگزینی برای دیوارهای برشی بتن آرمه مورد استفاده قرار گرفتند. این دیوارها قابلیت شکل‌پذیری بالایی نسبت به دیوارهای بتن آرمه داشته و همچنین با کمانش ورق فولادی میدان کشش قطری در دیوارها به وجود می‌آید. دیوارهای فولادی مقاومت بالایی در تحمل بارهای جانبی دارند و وزن آن‌ها نیز کم می‌باشد. مشکل این دیوارها کمانش ورق فولادی قبل از رسیدن به مقاومت نهایی فولاد است و برای جلوگیری از این امر استفاده از سخت‌کننده‌ها رواج یافت اما بعد از آن به دلیل هزینه بالای سخت‌کننده‌ها، از بتن یا الیاف پلیمری برای جلوگیری از کمانش ورق استفاده شد که سیستم دیوار برشی فولادی کامپوزیتی نامیده می‌شوند. در دیوارهای برشی فولادی کامپوزیتی از بتن یا ورقه‌های پلیمری برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی استفاده می‌گردد. مزیت این سیستم‌ها ظرفیت انتقال بار بالا و استهلاک انرژی زیاد آن‌ها می‌باشد و بسته به شکل این

دیوارها ممکن است از ظرفیت شکل‌پذیری بالایی نیز برخوردار باشند و عملکرد لرزه‌ای مطلوبی دارند. با توجه به ضخامت کم این دیوارها به رغم رفتار لرزه‌ای مطلوب آن‌ها می‌توان در بحث مقاومت‌سازی از این سیستم‌ها استفاده کرد.

### تحقیقات پیشین

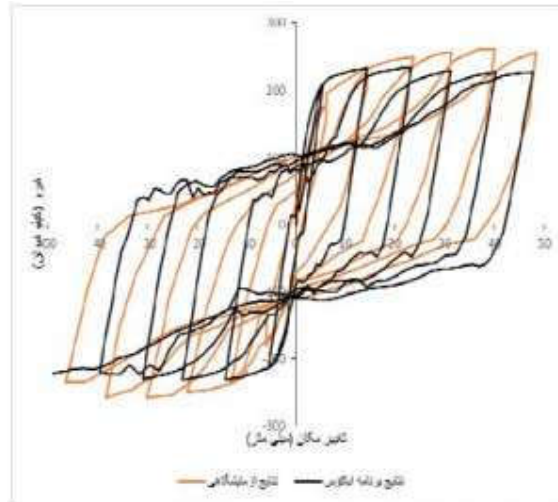
در صورت استفاده از سخت‌کننده‌ها جهت جلوگیری از کمانش ورق فولادی قبل از رسیدن به تسلیم هزینه‌های ساخت افزایش زیادی می‌یافت لذا جایگزینی برای این سیستم که استفاده از کامپوزیت در این دیوارها می‌باشد، ساخته شد که در این دیوارها از پوشش بتنی یا ورقه‌هایی از جنس الیاف پلیمری برای تقویت ورق فولادی استفاده می‌گردد. این دیوارها عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوار برشی فولادی دارند. همانطور که در ابتدا ذکر شده بود برای جلوگیری از کمانش دیوار برشی فولادی می‌توان از پوشش بتنی در یک یا هر دو سمت ورق فولادی استفاده نمود. این پوشش بتنی می‌تواند به صورت درجا اجرا شود که برای اتصال آن به فولاد باید از برش گیرها استفاده شود یا می‌تواند به صورت پیش ساخته باشد و به وسیله بولت به دیوار فولادی متصل گردد. این امر موجب جلوگیری از کمانش خارج صفحه‌ای ورق فولادی می‌شود و همچنین مقاومت برشی و استهلاک انرژی سیستم را بهبود می‌بخشد. در سیستم نوین پانل بتنی با قاب اطرافش درگیر نیست و یک فاصله بین دیوار بتنی و المان‌های مرزی وجود دارد. مطالعات انجام شده نشان می‌داد که هر دو سیستم، کارآمد و با شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بالا می‌باشند فقط سیستم نوین رفتار شکل‌پذیرتری داشت ولی مقاومت برشی و سختی سیستم سنتی کمی بیشتر بود. در سال 2009، هوو و دونگ رفتار هیستریک دیوار برشی فولادی کمانش تاب را تحلیل کردند و مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می‌داد که استفاده از فولاد کمانش تاب نمی‌تواند روند کمانش و جا به جایی خارج از صفحه را به تنهایی محدود کند ولی از لایه بتنی در برابر آسیب‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای محافظت می‌کند.

در سال‌های اخیر محققان سیستم جدیدی را معرفی کرده‌اند و مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی آن‌ها انجام داده‌اند و نتایج به دست آمده را با مدل‌های المان محدود که توسط نرم افزارهای انسیس و آباکوس ایجاد شده بودند مقایسه و اعتبارسنجی کرده‌اند. در سال 2008 تأثیر استفاده از لایه FRP بر روی دیوار برشی فولادی را به صورت عددی، آزمایشگاهی و تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی شد و نتایج نشان می‌داد که صفحه FRP نقش یک قید جانبی را برای ورق فولادی بازی می‌کند. همچنین صفحه FRP توانست تنش‌های برشی را به تمامی نقاط ورق فولادی گسترش دهد و موجب افزایش در سختی و جذب انرژی گردید ولی شکل‌پذیری دیوار را به میزان اندکی کاهش داد. در سال 2012 دیوارهای برشی فولادی که با استفاده از الیاف پلیمری کربنی مقاوم شده بودند تحت بررسی و ارزیابی قرار گرفتند و طی فرآیندی رفتار غیرخطی این دیوار را با دیوار برشی فولادی مقایسه شده که نتایج نشان داد اضافه کردن لایه پلیمری باعث افزایش در جذب انرژی، سختی و مقاومت شده ولی باعث کاهش شکل‌پذیری دیوار می‌شود. در سال 2012 در تحقیقی تجربی به بررسی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای پرداخته شد. الیاف کربنی در برابر خوردگی مقاوم بوده ولی در صورت تماس با فلزات ممکن است که عمل گالوانیزه شدن بین فلز و الیاف رخ دهد همچنین پیوند الیاف شیشه‌ای با فلزات مستحکم‌تر از الیاف کربنی می‌باشد و کرنش شکست الیاف شیشه‌ای از کربن بیشتر است. در سال 2014 تأثیر الیاف FRP بر عملکرد دیوارهای برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین مورد تحقیق قرار گرفت و طبق آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی، دیوارهای با نقطه تسلیم پایین مشخصات بهتری در هر دو محدوده الاستیک و غیر الاستیک نسبت به دیوارهای فولادی معمولی دارا می‌باشند. همچنین افزودن لایه کربن به این نوع دیوارها پارامترهای لرزه‌ای چون سختی، جذب انرژی، ظرفیت برشی و مقدار مقاومت اضافه را افزایش می‌دهد. در سال 2015 چندین مدل که با نرم افزار انسیس و به صورت غیر خطی مدل شده بودند مورد بررسی قرار گرفتند و این مدل‌ها دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با الیاف شیشه بودند. افزودن لایه پلیمری سختی و ظرفیت برشی و جذب انرژی را افزایش داد ولی شکل‌پذیری با کاهش کمی همراه بود. همچنین تأثیر نحوه قرارگیری زوایای الیاف نشان داد که در زاویه 60 درجه جذب انرژی اندکی افزایش می‌یابد و در زاویه 90 درجه با کاهش 15 درصدی همراه است و با

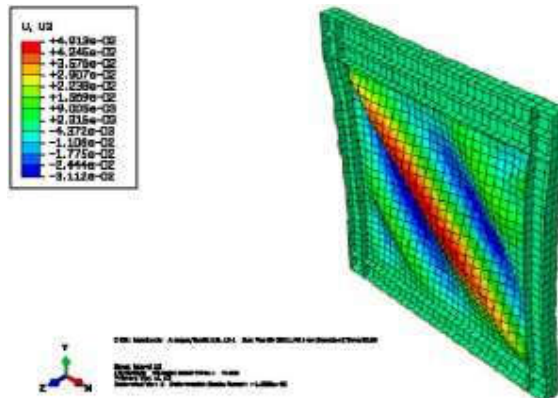
تغییر مصالح فولادی و جهت چرخش الیاف به 45 و 30 درجه متغیر خواهد بود. با توجه به مطالب عنوان شده و مزیت‌های قابل توجه سیستم‌های تقویت شده با الیاف پلیمری مطالعه روی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیتی و رفتار لرزه‌ای سازه‌هایی که دارای این نوع از دیوارهای برشی هستند در این پژوهش مورد توجه می‌باشد.

### صحت سنجی

برای صحت سنجی و مقایسه نتایج به دست آمده از نرم افزار مدل آزمایشگاهی لوبل و همکاران در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی گشت. این نمونه دارای اتصالات صلب می‌باشد و برای تیرها و ستون‌ها از مقطع استفاده شده است. ورق فولادی مورد استفاده به ابعاد میلی‌متر مربع و ضخامتی برابر 1.5 میلی‌متر دارد. برای مدل‌سازی تمامی اجزا از المان پوسته سه بعدی و چهار گره‌ای استفاده شده است. به علاوه تمامی قیدهای تکیه‌گاهی در محل اتصال به زمین گیردار بوده و رفتار فولاد به صورت غیر خطی، دوخطی می‌باشد. برای تعریف مصالح فولاد تیر و ستون و همچنین ورق فولادی از گزینه Bi-Linear Kinematic material استفاده شده است. این دیوار تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. بارگذاری تحت پروتکل ATC-24 انجام گرفت و آنالیز به صورت Dynamic Explicit انجام شد. همچنین به دلیل اینکه در آزمایش کمانش تیر و ستون گزارش نشده است جا به جایی خارج از صفحه این المان‌ها بسته شده است. نمودار 1 مقایسه نمودار هیستریزیس به دست آمده از آزمایش و نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



نمودار 1: مقایسه نمودار هیستریزیس به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و آباکوس



شکل 1: تنش‌های به وجود آمده ورق فولادی دیوار

نمونه‌های مدل‌سازی شده با الیاف در نرم‌افزار

برای بررسی پارامترهای مختلف از جمله جنس الیاف به کار رفته، تعداد لایه‌ها و زوایای قرارگیری الیاف بر عملکرد لرزه‌ای دیوار 7 نمونه مدلسازی شد. نمونه‌ها با الیاف از جنس کربن (CFRP)، آرامید (AFRP) و شیشه (GFRP) و یا زوایای 60، 30، 45، 90 در 4 و 2 لایه تقویت شدند. جدول 1 شامل اطلاعات مربوط به نمونه‌های مدلسازی می‌باشد. برای متصل کردن الیاف پلیمری به ورق فولادی از رزین استفاده می‌شود. در مدلسازی برای اتصال الیاف و دیوار فولادی از قید tie استفاده شده است. از اثر جدادگی بین رزین و الیاف صرف نظر شده است. به عبارت دیگر مقاومت برشی چسب از مقادیر نیازهای برشی وارده بیشتر می‌باشد. رفتار الیاف به صورت خطی در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی مصالح FRP از گزینه Lamina material استفاده شده است. برای مدلسازی آن‌ها از المان سه بعدی پوسته چهار گره‌ای استفاده شده است. مشخصات الیاف به کار رفته به ترتیب در جداول 2 و 3 ذکر شده است.

جدول 1: اطلاعات مربوط به نمونه‌های ساخته شده در نرم‌افزار

نمونه	تعداد لایه‌ها	ضخامت ورقه‌های FRP	زوایای الیاف
4 CFRP 60	4	0.75 mm	-60 & +60
4 CFRP 45	4	0.75 mm	+45 & -45
4 CFRP 30	4	0.75 mm	+30 & -30
4 CFRP 90	4	0.75 mm	0 & 90
4 AFRP 60	4	0.75 mm	+60 & -60
4 GFRP 60	4	0.75 mm	+60 & -60
2 CFRP 30	2	0.75 mm	+30 & -30

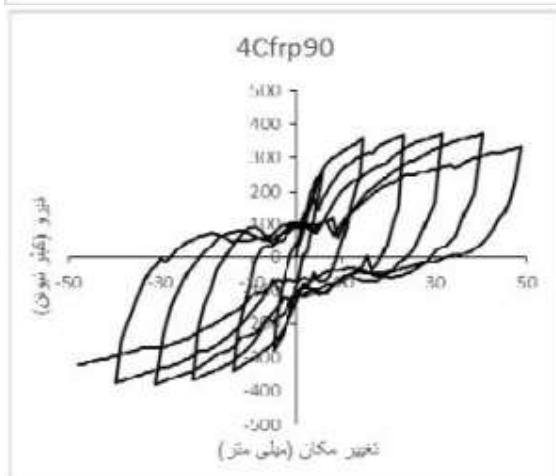
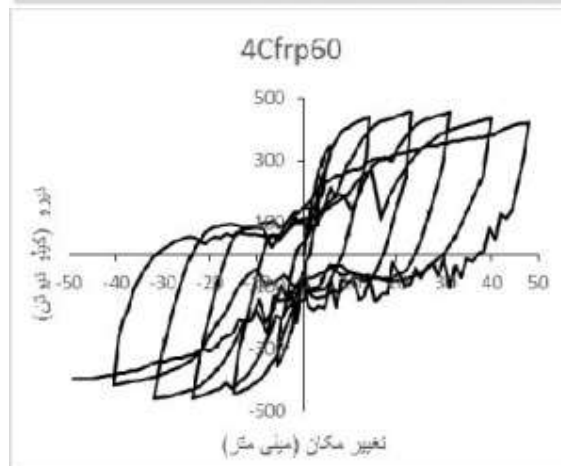
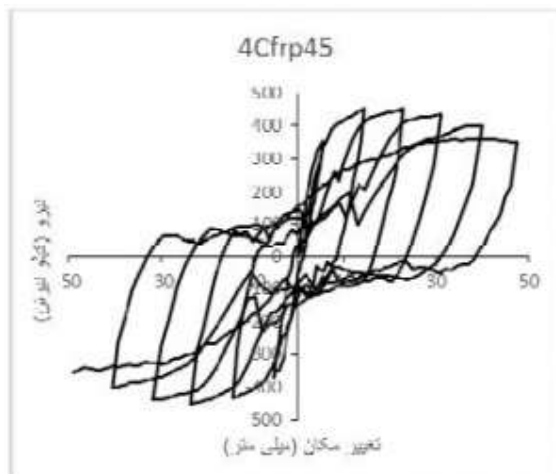
جدول 2: مشخصات مکانیکی ورقه‌های FRP

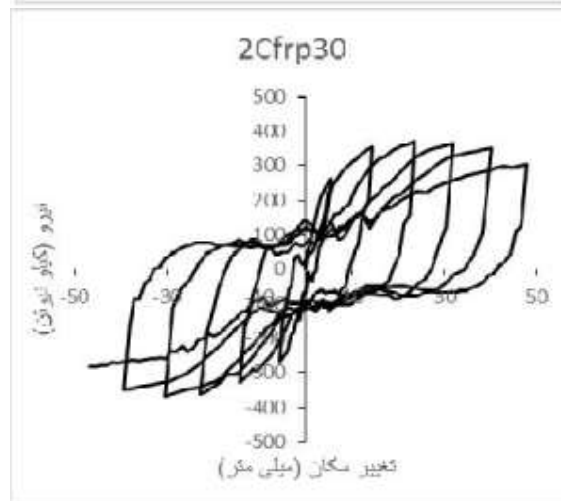
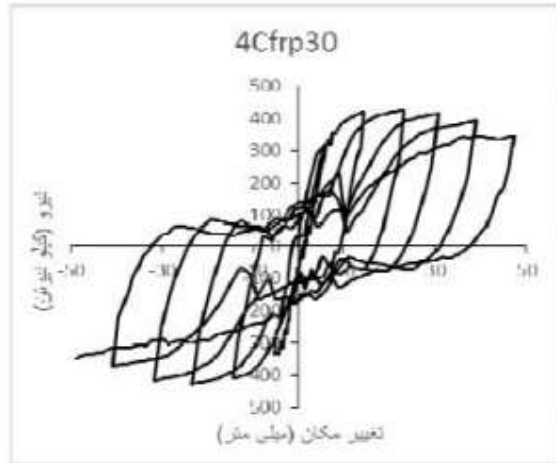
	چگالی	E1 (GPa)	E2 (GPa)	V12	G12 (GPa)	G13 (GPa)	G23 (GPa)
CFRP	1600	181	10.3	0.28	7.17	7.17	3.24
GFRP	1500	76	5.5	0.34	2.3	2.3	2
AFRP	2000	43	8.9	0.27	4.5	4.5	3.18

جدول 3: مقادیر کرنش‌های فروپاشی ورقه‌های FRP

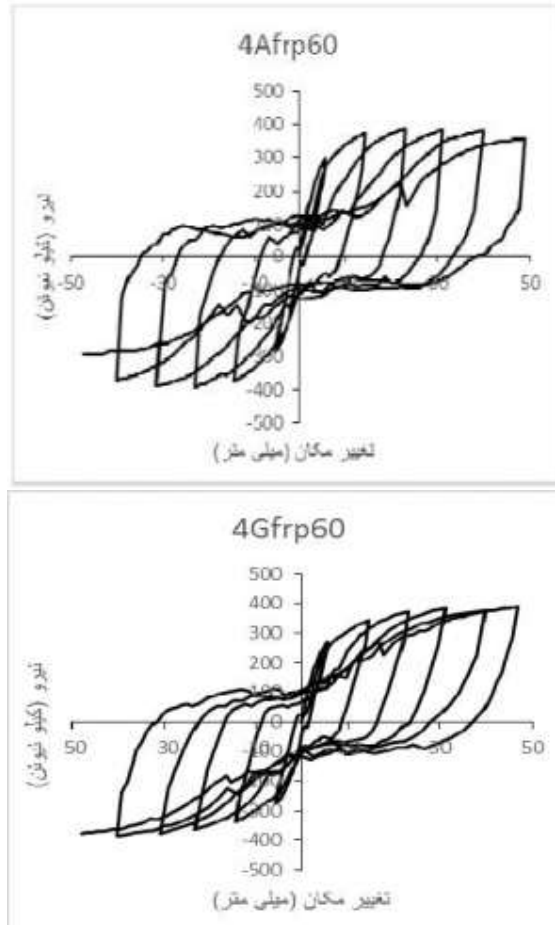
	کشش	فشار	کشش	فشار	برش
11E	11E	11E	11E	11E	11E
CFRP	0.01840	-0.00309	0.00218	-0.00063	0.01478
GFRP	0.00828	-0.00828	0.00388	-0.02388	0.00948
FRP	0.29767	-0.16000	0.00350	-0.02870	0.03000

نمودار 2: نمودارهای هیستریزیس نمونه‌های تقویت شده با الیاف





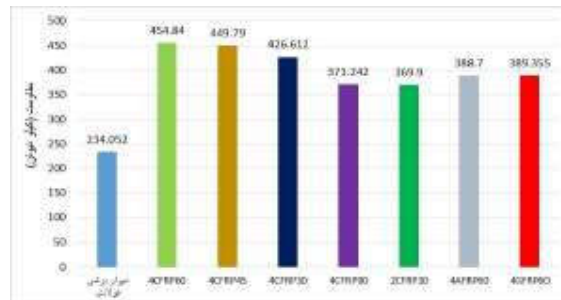




### مقاومت نمونه

طبق بررسی‌ها و نتایج به دست آمده از تحلیل المان محدود در این پژوهش مشخص گردید که استفاده از ورقه‌های FRP به میزان قابل توجهی مقاومت نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. بسته به نوع الیاف مصرفی و زوایای قرارگیری الیاف میزان افزایش مقاومت متفاوت خواهد بود. میزان افزایش مقاومت نمونه‌ها به ترتیب برای نمونه‌های CFRP604، 4CFRP30، 4CFRP45، 4CFRP60، 4CFRP90، 4AFRP60، 2CFRP30 برابر است با 94٪، 92٪، 82٪، 66٪، 58٪ و 58٪. نمودار میزان مقاومت حداکثری تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

نمودار 3: مقایسه مقاومت نمونه‌ها



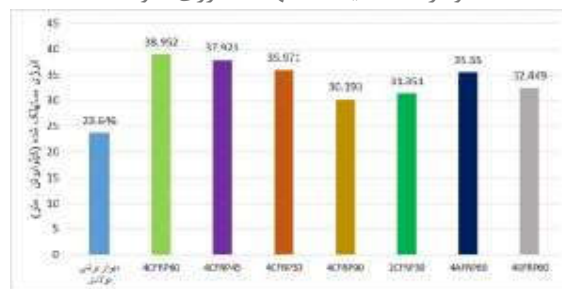
### استهلاک انرژی نمونه‌ها

استهلاک انرژی نمونه‌های تقویت شده با الیاف نسبت به نمونه تقویت نشده افزایش داشته است. استهلاک انرژی به دست آمده از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که همانطور که انتظار می‌رفت استهلاک انرژی با افزایش همراه شود

ولی این افزایش بستگی به عوامل متعددی دارد از جمله اینکه از چه جنس الیافی در تحلیل استفاده شود و یا اینکه جهت قرارگیری الیاف به چه صورت باشد. البته تعداد لایه‌های به کار رفته نیز می‌تواند در میزان افزایش انرژی مستهلک شده تأثیرگذار واقع شود. طبق نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها بیشترین افزایش میزان استهلاک انرژی در نمونه CFRP604 به میزان 64٪ و کمترین افزایش در نمونه CFRP904 با افزایش 27٪ رخ داده است. میزان افزایش استهلاک انرژی در باقی نمونه‌ها به ترتیب ذیل می‌باشد :

CFRP454 برابر 60٪، CFRP304 برابر 52٪، AFRP604 برابر 50٪، GFRP604 برابر 37٪، CFRP302 برابر 32٪. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از الیاف در بیشتر نمونه‌ها باعث افزایش 50 درصدی در میزان استهلاک انرژی گردیده است و این برای یک سیستم باربر جانبی می‌تواند یک مزیت محسوب شود. نمودار 4 شامل مقادیر استهلاک انرژی در نمونه‌های تقویت شده و دیوار برشی فولادی تقویت نشده می‌باشد.

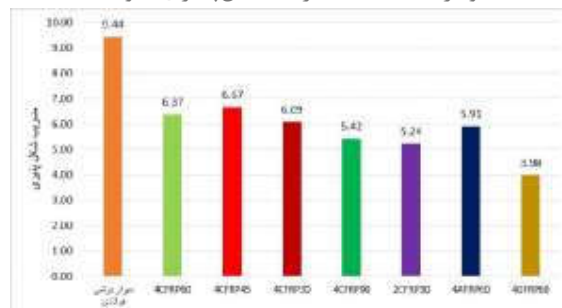
نمودار 4 : مقایسه استهلاک انرژی نمونه‌ها



#### ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ها

نمونه‌های تقویت شده با الیاف در مقایسه با دیوار برشی فولادی تقویت نشده با کاهش شکل‌پذیری همراه بودند. ضریب شکل‌پذیری با محاسبه نسبت جابه‌جایی حداکثری به جابه‌جایی در نقطه تسلیم به دست آمده است. کاهش ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ها به ترتیب برای نمونه‌های 4CFRP30، 4AFRP60، 4CFRP90، 2CFRP30، GFRP604، 4CFRP45، 4CFRP60 برابر 58٪، 44٪، 42٪، 37٪، 33٪، 32٪ و 29٪ می‌باشد. میزان مقادیر شکل‌پذیری برای تمامی نمونه‌های تحلیل شده در نمودار 5 ذکر شده است.

نمودار 5 : مقایسه ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ها



#### نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار دیوار برشی فولادی تقویت شده با ورقه‌های FRP تحت بارگذاری چرخه‌ای به روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین هدف از این مطالعات تحقیق درباره تأثیر جنس الیاف به کار برده، زوایای قرارگیری الیاف و تعداد لایه‌ها بر رفتار لرزه‌ای شامل مقاومت، استهلاک انرژی و شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی می‌باشد.

1. با استفاده از روش المان محدود مشخص شد که الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه و آرامید مقاومت و استهلاک انرژی دیوار را بیشتر افزایش می‌دهد همچنین شکل‌پذیری دیوار با الیاف شیشه بیشترین کاهش را داشته و با الیاف کربن شکل‌پذیری بیشتری را به همراه داشت. البته باید این نکته توجه داشت که الیافی که

- استفاده می‌شوند بسته به نوع آن‌ها خواص مکانیکی متفاوتی دارند یعنی ممکن است که نتایج با استفاده از نوع دیگری از الیاف شیشه یا کربن دچار تغییر شود. در این پژوهش میزان افزایش مقاومت و استهلاک انرژی برای نمونه تقویت‌شده با کربن به ترتیب برابر با 94٪ و 64٪ و کاهش شکل‌پذیری آن برابر با 32٪ است. این مقادیر برای الیاف شیشه به ترتیب برای افزایش مقاومت و استهلاک انرژی و کاهش شکل‌پذیری برابر با 66٪ و 37٪ و 58٪ می‌باشد.
2. از عوامل مهم دیگر نقش زاویه قرارگیری الیاف می‌باشد. مقاومت و استهلاک انرژی در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف با زاویه 60 درجه بیشترین افزایش را دارند (94٪ و 64٪) و بالعکس نمونه با زاویه 0 و 90 کمترین افزایش را در مقاومت و استهلاک انرژی دارند (58٪ و 27٪). در شکل‌پذیری نمونه تقویت شده با الیاف 0 و 90 درجه بیشترین کاهش را دارند (42٪) و نمونه تقویت شده با الیاف 45 درجه کمترین کاهش شکل‌پذیری را دارد (29٪).
3. تعداد لایه‌های الیاف به کار رفته در نمونه‌ها نیز در پارامترهای لرزه‌ای مؤثر است. نمونه تقویت شده با 2 لایه الیاف مقاومت، استهلاک انرژی و شکل‌پذیری کمتری نسبت به نمونه دارای 4 لایه دارد. افزایش مقاومت و استهلاک انرژی در نمونه با 2 لایه به ترتیب 58٪ و 32٪ و کاهش شکل‌پذیری آن برابر 44٪ می‌باشد در صورتیکه افزایش مقاومت و استهلاک انرژی در نمونه با 4 لایه به ترتیب 82٪ و 52٪ و کاهش شکل‌پذیری آن برابر 35٪ است.
4. با توجه به مبحث مقاوم‌سازی می‌توان از سیستم دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با کامپوزیت FRP برای تقویت ساختمان‌های موجود استفاده نمود. با توجه به الزامات ساختمانی که مورد مقاوم‌سازی قرار می‌گیرد می‌توان فاکتورهای مختلف از جمله جنس الیاف، تعداد لایه‌ها و زوایای قرارگیری آن‌ها را به طوری مورد استفاده قرار داد تا نیازهای لرزه‌ای و سازه‌ای فراهم شود.
- امروزه با شناخته شدن اهمیت تقویت و مقاوم‌سازی سازه در برابر زلزله و جلوگیری از خرابی سازه‌ها، روش‌های مقاوم‌سازی متعددی استفاده می‌شوند. رایج‌ترین این روش‌ها استفاده از کامپوزیت‌های FRP است که مزایای این روش به اختصار نام برده شده‌اند. مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری بالا، خواص ضد خوردگی خوب، سختی مناسب، وزن سبک، نصب آسان و تقریباً قابلیت نامحدود در اندازه، ابعاد و هندسه و کاهش هزینه‌ها و صرفه اقتصادی. در این پژوهش به بررسی اثر انواع الیاف در تقویت اتصالات سازه‌های بتن‌آرمه پرداخته شده است.
- انواع روش‌های تقویت اعضاء بتن‌آرمه**
- اعضا و المان‌های سازه به روش‌های مختلفی نظیر تقویت داخلی و تقویت خارجی مقاوم‌سازی و تعمیر می‌شوند. که در این قسمت به روش‌های مختلف تقویت خارجی اعضاء بتن‌آرمه پرداخته می‌شود. مقاوم‌سازی و تقویت یک عضو به معنای افزایش مقاومت و خصوصیات آن و رسیدن به ظرفیت بهره‌برداری بیش از گذشته می‌باشد. کامپوزیت‌ها به عنوان مواد تقویت‌کننده برای اعضاء بتن‌آرمه به دلیل نواقص موجود در روش‌های تقویت متداول موجود، کاربردی چشمگیر در دو دهه اخیر پیدا کرده است.
- یکی از رایج‌ترین شیوه‌های مقاوم‌سازی اعضاء بتن‌آرمه استفاده از ورق‌های فولادی با چسباندن به‌وسیله اپوکسی (رزین) در سطح خارجی تیر یا دال در منطقه کششی آن می‌باشد؛ این روش در کنار مزایا و سادگی طرح، دارای معایبی چون خوردگی فولاد و در پی آن فساد در چسب، نصب بسیار سخت ورق‌های سنگین در محل‌های با محدودیت فضا در سازه، احتیاج به داربست‌بندی، محدودیت در طول ورق، مواجهه است. نوارهای FRP می‌توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای پوشش و حل مشکلات یاد شده استفاده گردد.
- استفاده از ورق‌های فولادی پیش‌تنیده نیز برای تقویت مورد دیگری است که در این حالت نیز حفاظت در برابر خوردگی و آتش از مشکلات آن به حساب می‌آید.

از دیگر روش‌های معمول می‌توان به اجرای ژاکت بتنی مسلح (شاتکریت یا ریختن در محل)، اطراف عضو موجود است. این روش، افزایش مقاومت، شکل‌پذیری و سختی را به همراه داشته و به دلیل ضخامت فضای موجود را کاهش می‌دهد لذا سبب افزایش نامطلوب وزن و سختی اعضا خواهد شد. ژاکت‌ها همچنین ممکن است از فولاد باشند. اما در این مورد حفاظت در برابر خوردگی مسئله اصلی به شمار می‌رود. نوارها و محصولات FRP در این مورد جایگزین مناسبی خواهند بود، که افزایشی اساسی را بر روی مقاومت و شکل‌پذیری اعضا ایجاد می‌کنند.

### پلیمرهای مسلح به الیاف FRP

کامپوزیت FRP ترکیبی از الیاف غیرفلزی پیوسته‌ی جهت یافته‌ای هستند که با خواص و ویژگی‌های پیشرفت‌های از جنس کربن، شیشه و آرامید می‌باشند که به همراه چسب رزین (ماتریس) مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الیاف بار اعمالی یا تنش‌های اصلی ایجاد شده را تحمل می‌کنند و به عبارتی دیگر، الیاف‌ها، جزء باربر کامپوزیت به حساب می‌آیند؛ درحالیکه رزین نقش انتقال تنش‌ها را در میان الیاف و حفاظت از الیاف را به عهده دارد.



شکل 1: اشکال مختلف FRP

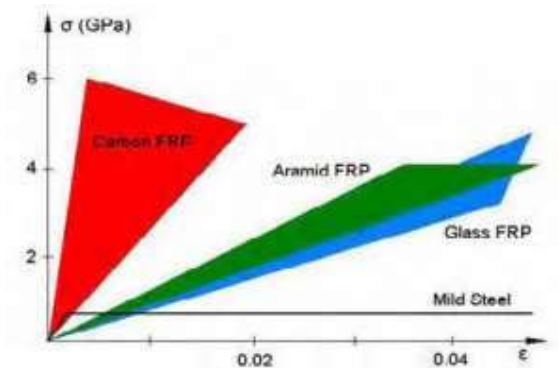
بسته به نوع الیاف، کامپوزیت‌های FRP به سه دسته زیر تقسیم می‌گردند:

1. CFRP (بر پایه الیاف کربن)

2. GFRP (بر پایه الیاف شیشه)

3. AFRP (بر پایه الیاف آرامید)

در شکل زیر، منحنی تنش- کرنش کامپوزیت‌های یک جهته تحت بارگذاری یکنواخت کوتاه مدت، در مقایسه با منحنی تنش- کرنش متناظر برای فولاد، قرار گرفته است. همانگونه که از شکل کاملاً مشخص است کامپوزیت‌های FRP رفتاری کاملاً الاستیک خطی تا مرحله گسیختگی خواهند داشت، از طرفی تمام الیاف ظرفیت تحمل تنش بالاتر از فولاد معمولی را دارا می‌باشند.



شکل 2: منحنی تنش-کرنش یک جهته برای کامپوزیت‌های FRP مختلف یک جهته

### خواص انواع الیاف FRP

الیاف شیشه: این الیاف ارزان‌تر از الیاف کربن و آرامید بوده و حساسیت بسیار بالایی به رطوبت دارد که در صورت انتخاب چسب مناسب می‌توان از آن محافظت به عمل آورد.

الیاف کربن: مقاومت بسیار خوبی در محیط‌های مضر شیمیایی و خورنده دارد. مدول الاستیسیته و مقاومت خستگی داشته و هیچگونه خزشی ندارد.

الیاف آرامید: یکی از انواع ساده پلی‌آمیدهای آروماتیک است و برای اولین بار تحت نام تجاری کولار تولید شد. ساختار الیاف آرامید ناهمسانگرد بود و دارای اثرژی شکست بالایی می‌باشد. این الیاف رفتار الاستیکی در کشش دارند اما رفتار غیرخطی و شکل‌پذیری در فشار نشان می‌دهند. همچنین به درجه حرارت‌های بالا، رطوبت و تشعشعات ماوراء بنفش حساس بوده و در نتیجه به طور وسیعی در مهندسی عمران کاربرد ندارد.

جدول 1 مشخصات عمومی برخی از الیاف یاد شده شامل، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی نهایی و همچنین کرنش نهایی آن‌ها را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد.

جدول 1: مشخصات عمومی الیاف

ماده	مدول الاستیسیته GPa	مقاومت نهایی کششی MPa	کرنش نهایی کششی MPa
کربن	165 – 700	2100 – 4800	0.2 – 2
شیشه	70 – 90	1900 – 4800	3 – 5.5
آرامید	70 – 130	3500 – 4100	2.5 – 5

در اینجا مشخصات خواص عمومی مواد بتن، فولاد و الیاف کربن در جدول 2 آورده شده است.

#### انواع چسب‌های کامپوزیت‌ها

چسب مسیر انتقال برش بین سطح بتن و مواد کامپوزیتی را تأمین می‌کند و عملکرد کامپوزیت را کامل می‌کند. رزین (ماتریس) بر دو نوع ترموست و یا ترموپلاستیک می‌باشند. ماتریس‌های ترموست (گرماسخت) پس از سخت شدن، با اعمال حرارت، دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند. در حالی که رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت مایع نموده و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. موادی مانند پلی‌استر و اپوکسی را می‌توان به عنوان رزین‌های ترموست.

خواص ماده پلی‌استر و اپوکسی در جدول 3 آورده شده است. اپوکسی دارای مقاومت، چسبندگی، خواص خزشی و مقاومت شیمیایی مناسبی می‌باشد، و سبب می‌شود که کامپوزیت FRP از خواص مکانیکی بالاتری برخوردار گردد.

جدول 2: خواص ماده رزین

ماده	دانسیته	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته کششی (Gpa)	درصد کرنش نهایی
پلی استر	1000 – 1450	20 – 100	2.1 – 4.1	1 – 6.5
اپوکسی	1100 – 1300	55 – 300	2.5 – 4.1	1.5 – 9

در واقع نقش رزین (ماتریس) عبارت است از:

1. حفاظت از الیاف در برابر ساییدگی و یا خوردگی محیطی
2. اتصال الیاف به همدیگر
3. پخش بار

ماتریس تأثیر مهمی بر روی خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیسیته و مقاومت، مقادیر برش و خصوصیات در فشار دارد.

### خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FRP

خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بستگی به نوع الیاف، رزین، مقدار الیاف و جهت الیاف دارد. الیاف ممکن است در یک جهت در کامپوزیت به کار روند، در آن صورت کامپوزیت، تک جهته خواهد شد. همچنین الیاف ممکن است در جهت‌های مختلف بافته و یا بر روی سطح چسبانده شوند که در آن صورت کامپوزیت‌ها، دو یا چند جهته خواهند گردید. برای موارد مقاوم‌سازی به طور معمول از کامپوزیت یک جهته استفاده می‌شود، به گونه‌ای که مقاومت و سختی کامپوزیت در راستای الیاف بالا بوده، و در جهت عمود بر الیاف ضعیف می‌باشد.

ورقه کامپوزیت یک جهته دارای سه صفحه عمود بر هم می‌باشد که در آن صفحات، مشخصات مکانیکی ورق تعریف می‌شود (صفحات  $XY$ ،  $XZ$  و  $YZ$ ). سیستم مختصات  $XYZ$  معمولاً به صورت مختصات اصلی ماده کامپوزیت تعریف می‌شود، به طوری که محور  $X$  معمولاً در راستای الیاف قرار دارد و محورهای  $Y$  و  $Z$  عمود بر راستای محور  $X$  هستند. به ماده‌ای مانند FRP که دارای رفتارهای مختلف در صفحات مختلف می‌باشد، اصطلاحاً ارتوتروپیک یا دو یا چند سانگرد گفته می‌شود در این تحقیق خواص ماده ارتوتروپیک در دو راستای عمود بر الیاف یکسان در نظر گرفته می‌شود. لذا خواص ماده کامپوزیت مورد بحث در راستای محور  $Y$  و  $Z$  یکسان است.

نکته مهم دیگر آن است که برای مدل‌سازی غیرخطی FRP، دانستن مقادیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و مدول برشی ماده لازم است.  $E_x$ ، مدول الاستیسیته ماده در راستای الیاف،  $E_y$  و  $E_z$ ، مدول الاستیسیته ماده کامپوزیت در جهت عمود بر الیاف است. مدول برشی کامپوزیت FRP نیز در سه صفحه به ترتیب  $G_{yz}$ ،  $G_{xy}$  و  $G_{zx}$  می‌باشد. ضریب پواسون برای مواد ارتوتروپیک نیز از جمله مواردی است که باید به دقت به آن توجه شود.  $\nu_{xy}$  ضریب پواسون اصلی نام داشته که عبارت است از نسبت کرنش در راستای  $y$  به کرنش در راستای  $x$ ، زمانی که تنش در راستای  $x$  اعمال شود.  $\nu_{yx}$  ضریب پواسون غیر اصلی نامیده شده و عبارت است از حاصل ضرب  $\nu_{xy}$  در نسبت  $E_y$  به  $E_x$  و مقدار آن کمتر از  $\nu_{xy}$  می‌باشد.

$$\nu_{yx} = (E_y / E_x) \nu_{xy}$$

حجم یا اندازه الیاف به کار رفته در کامپوزیت نیز بر خواص مکانیکی آن اثر می‌گذارد. درصد حجمی الیاف حجم  $V_f$  به طور معمول 30 تا 60 درصد بسته به ماده، روش اجرا و خواص مورد نظر می‌باشد. درصد حجمی الیاف بر اساس رابطه زیر قابل بیان است :

$$V_f = V_f / V_c$$

$V_f$  و  $V_c$  به ترتیب حجم الیاف و حجم کامپوزیت می‌باشند.

از طرفی با توجه به تک جهته بودن ماده کامپوزیت می‌توان خواص آن را در جهت عرضی ایزوتروپ در نظر گرفت و ساده‌سازی را اعمال کرد.

سختی یک کامپوزیت در جهت طولی الیاف، را می‌توان با در نظر گرفتن مجموع حاصل ضرب درصد الیاف در سختی الیاف و درصد رزین در سختی رزین، از رابطه زیر بدست آورد :

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m$$

که اندیس  $f$  برای الیاف و اندیس  $m$  برای (ماتریس) به کار می‌رود.

### دوام کامپوزیت‌ها

نصب صحیح سیستم FRP، و درواقع آماده‌سازی مناسب سطح زیرین و اتصال درست رزین و الیاف با سطح تأثیر بسزایی در دوام و عمر اقتصادی تخمین زده شده آن دارد، به گونه‌ای که دوام آن ممکن است به همان اندازه و یا بیشتر از چرخه عمر اقتصادی آن میسر گردد.

### حفاظت در برابر آتش

علت اصلی گسیختگی تقویت خارجی FRP در درجه حرارت‌های بسیار بالا، تضعیف لایه‌های چسب است. چسب به افزایش درجه حرارت بسیار حساس است، بنابراین اگر خطر آتش‌سوزی وجود داشته باشد، لازم است که کامپوزیت در مقابل آتش محافظت شود. هر چند ورقه‌های کامپوزیت FRP در مقایسه با ورق‌های فولادی، به دلیل هدایت گرمایی کم، زمان طولانی‌تری را در مقابل آتش مقاومت می‌نمایند.

### اشعه UV

مواد پلیمریک وقتی در معرض نور خورشید و اشعه ماوراء بنفش (A-UV و B-UV) قرار گیرند، خراب می‌شوند، این خرابی باعث جدایی در اتصال شیمیایی و یا چسب می‌گردد. به علاوه این موضوع باعث کاهش انتقال نور و تغییر رنگ در کامپوزیت می‌شود. اگر چه ماتریس ممکن است تحت اثر تشعشعات ماوراء بنفش خراب شود، ولی با استفاده از افزودنی‌های به خصوص، می‌توان آن را در مقابل تشعشعات ماوراء بنفش مقاوم کرد. همچنین می‌توان کامپوزیت را با رنگ کردن محافظت نمود.

### خستگی

در مقایسه با فولاد، کامپوزیت FRP عملکرد بسیار بالایی را در برابر خستگی نشان می‌دهد.

### خزش

FRP های کربن دچار خزش نمی‌شوند، اما تغییر شکل‌های طولانی مدت در کامپوزیت‌های AFRP، به طور قابل ملاحظه‌ای در هنگام خزش افزایش می‌یابد. مسئله مهم دیگر، رفتار بسیار ضعیف GFRP تحت بار دائم است. الیاف شیشه در کشش تحت تنش‌های دائمی به صورت زودرس دچار گسیختگی می‌شوند. مقاومت کششی کامپوزیت شیشه تحت کشش دائمی به 23 درصد از مقدار ماکزیمم آن کاهش می‌یابد.

### ضربه

فقط الیاف آرامید مقاومت بالایی در برابر ضربه از خود نشان می‌دهند. این ماده به دلیل سختی بالا و انرژی گسیختگی بالا برای ساخت جلیقه زرهی استفاده می‌گردد، بنابراین الیاف آرامید می‌تواند برای حالاتی استفاده گردد که نیاز به محافظت و تقویت سازه در برابر خطر انفجار باشد. همچنین الیاف آرامید می‌توانند برای تقویت پل‌ها که در معرض خطر تصادف وسایل نقلیه قرار می‌گیرند، استفاده شوند.

### حرارت

معمولاً ورق‌های FRP، جهت تقویت مقاطع بتنی ترک خورده (خسارت‌دیده) استفاده می‌شود، از این رو حضور حفرات در سطح بتن - FRP بدیهی است. زمانی که آب درون این حفرات محصور شده باشد، انبساط آب در حرارت بالا، ممکن است باعث جدا شدن (ورقه ورقه شدن) FRP از سطح اتصال گردد. بنابراین، تأثیر چرخه منجمد شدن و ذوب شدن در تقویت سازه، پدیده‌ای است که باید مد نظر قرار گیرد.

### رطوبت

کربن و شیشه به ترتیب نسبت به جذب آب بی‌اثرند، در حالی که آرامید تا 13 درصد وزن خود رطوبت را جذب می‌کند. لازم به ذکر است که اپوکسی برخلاف سایر پلیمرها، آب چندانی جذب نمی‌کند.

### قلیایی / اسیدی

مطابق آنچه در جدول 4 مشاهده شد، الیاف کربن در هر دو محیط‌های قلیایی و اسیدی مقاومت بالایی نشان می‌دهد، در حالی که الیاف شیشه و در بعضی از نمونه‌ها، الیاف آرامید مقاومتی ندارند. هر چند استفاده صحیح از رزین، می‌تواند از الیاف محافظت به عمل آورد.

جدول 3 : مقاومت الیاف مختلف در برابر خوردگی

Carbon	Aramid	AR-glass	E-glass	فاکتورهای خوردگی
--------	--------	----------	---------	------------------

جذب آب (درصد در 24 ساعت)	-	-	0.05	-
محیط اسیدی کم	مقاومت کم	مقاومت بالا	مقاومت بالا	مقاومت بالا
محیط اسیدی زیاد	بدون مقاومت	مقاومت کم	مقاومت کم	مقاومت بالا
محیط قلیایی کم	بدون مقاومت	مقاومت بالا	مقاومت بالا	مقاومت بالا
محیط قلیایی زیاد	بدون مقاومت	مقاومت کم	مقاومت کم	مقاومت بالا
حرارت	مقاومت بالا	مقاومت بالا	بدون مقاومت	مقاومت بالا
اشعه ماوراءبنفش	مقاومت بالا	مقاومت بالا	بدون مقاومت	مقاومت بالا

#### ارزیابی قاب بتن آرمه با نوعی از الیاف CFRP و GFRP

در این مرحله یک قاب بتن آرمه با دو نوع الیاف CFRP و GFRP را مورد ارزیابی قرار داده و با توجه به نتایج حاصله و خصوصیات کیفی و مقایسه کاربری بین الیافها بهترین نوع الیاف که الیاف CFRP می باشد، پرداخته شده است.

#### شرح کامل مدل قاب و نتایج حاصل از آنالیز

در این مدل قاب موردنظر با استفاده از المانهای C3D8R و T3D2 مدل سازی می شوند :

المان C3D8R : این المان سه بعدی هشت گرهی برای مدل سازی قاب و تیر و ستون بتنی استفاده می شود.

المان T3D2 : این المان سه بعدی دو گرهی برای مدلسازی آرماتورهای طولی و عرضی استفاده می شود.

در ستون های قاب مذکور از 8 میلگرد نمره 16 و در تیرها نیز از 6 میلگرد نمره 16 به صورت سرتاسری استفاده شده است، در اتصالات نیز میلگردهای طولی قرار داده شده است. در ضمن با افزایش مدول الاستیسیته به مقدار اندکی و با توجه به اینکه المان C3D8R در برنامه ABAQUS توزیع حجمی آرماتورها را در بتن فرض می کند، بنابراین اثرات آرماتورهای عرضی لحاظ گردیده است. مشخصات مصالح موردنظر در مدل (اعم از بتن و فولاد) به شرح جدول 5 می باشد.

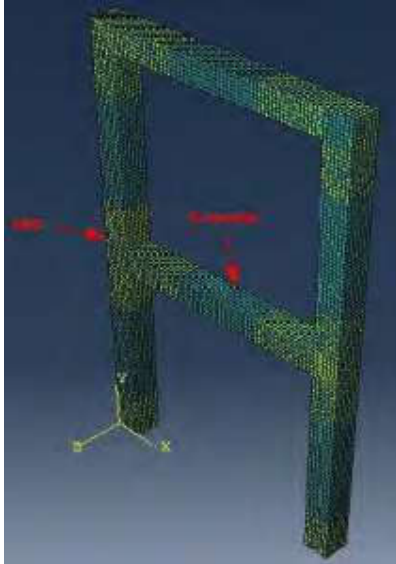
جدول 4 : مشخصات مصالح

مصالح	$E_c$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	$F_c$ (MPa)	$\rho$ (Mass Density) (Kg/m <sup>3</sup> )
بتن	2817	200000	-	4187	2817	2400
فولاد	-	-	235	-	-	7850

#### شرح کامل مدل و آنالیز مربوطه به تقویت اتصالات سازه های بتن آرمه FRP

با توجه به اینکه بارهای جانبی وارده غالباً در اتصالات قاب های بتن آرمه وارد می گردد و اتصالات نقش انتقال بار از تیرها به ستون ها را دارند پس در جذب بارهای اعمال شده نیز نقش مهمی ایفا می کنند؛ بنابراین جهت جلوگیری از اثرات خردشدگی موضعی در اثر بارهای سیکلی و همچنین عدم تمرکز تنش و نیز ازدحام آرماتور در ناحیه اتصال و به دنبال آن گسیختگی؛ بایستی اتصالات قاب های بتن آرمه با ورقه های FRP با دور کامل دور پیچ و پوشانده شوند.

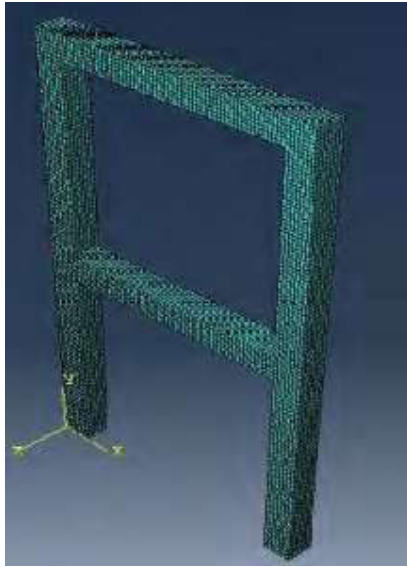




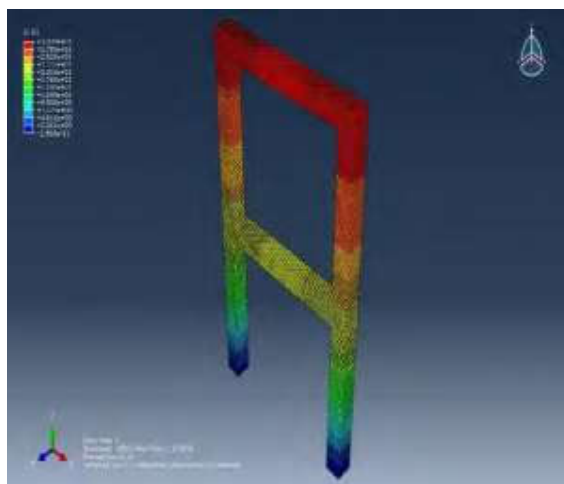
شکل 3: مدل اجزا محدود قاب موردنظر

### حداکثر تغییر مکان جانبی مجاز

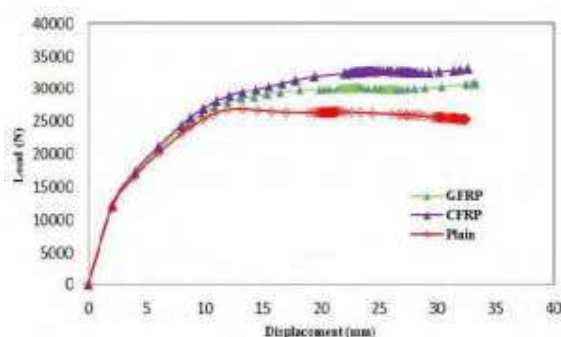
با توجه به حجم بالای مدل و مش بندی ریز پس از رسیدن به تغییر مکان حدود 30 میلی متر با واگرایی مواجه می شویم که نتایج آنالیز قاب به صورت زیر می باشد.



شکل 4: مدل قاب بتن آرمه مش بندی شده



شکل 5: مقادیر جابه‌جایی قاب بتن آرمه تقویت نشده، تحت تغییر مکان 6.8 سانتی‌متر در جهت X



شکل 6: نمودار بار - تغییر مکان قاب تقویت شده و تقویت نشده در اتصالات با یک لایه FRP تحت تغییر مکان 6.8 سانتی‌متر

کامپوزیت	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (MPa)	مدول برشی (MPa)	ضخامت هر لایه FRP بر حسب mm
CFRP	$E_x = 62000$ $E_y = 4800$ $E_z = 4800$	$\nu_{xy} = 0.22$ $\nu_{yz} = 0.22$ $\nu_{xz} = 0.30$	958	$G_{xy} = 3270$ $G_{yz} = 3270$ $G_{xz} = 1860$	1.0

جدول 5: خواص الیاف CFRP

کامپوزیت	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون بزرگتر	مقاومت کششی (MPa)	مدول برشی (MPa)	ضخامت هر لایه FRP بر حسب mm
GFRP	$E_x = 25579$ $E_y = 2136$ $E_z = 2136$	$\nu_{xy} = 0.20$ $\nu_{yz} = 0.20$ $\nu_{xz} = 0.30$	552	$G_{xy} = 1450$ $G_{yz} = 1450$ $G_{xz} = 825$	1.0

جدول 6: خواص الیاف GFRP

### نتیجه‌گیری

یکی از عوامل آسیب‌پذیری سازه‌های بتن آرمه در برابر زلزله عدم رعایت آئین‌نامه در مرحله طراحی جهت استفاده از اصل ستون قوی- تیر ضعیف، می‌باشد که متعاقباً باعث ایجاد مفصل پلاستیک در ستون‌ها و آسیب‌های جدی در هنگام وقوع زلزله می‌شود لذا در طراحی باید ایجاد مفصل پلاستیک در تیرها در نظر گرفته شود. این امر با تقویت اتصالات تیر و ستون انجام‌پذیر است. در این راستا این اتصالات با استفاده از ورق‌های FRP تقویت می‌شوند. یک روش مقاوم‌سازی شامل تقویت جان تیر با بهره‌گیری از ورق‌های FRP در محل اتصالات بتنی، جهت دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون به کار گرفته می‌شود. جهت انتخاب نوع الیاف مصرفی برای نیل به این هدف بررسی‌هایی انجام شد که پس از مقایسه رفتار قاب با تأثیر دو الیاف CFRP و GFRP روی آن نتایج زیر مشاهده شد :

1. استفاده از الیاف FRP تا زمانی که نقاط ضعف سازه را برطرف می‌نماید، به صورت محسوسی شکل‌پذیری سازه را افزایش می‌دهد.
2. سطح زیر نمودار بار - تغییر مکان بیانگر جذب انرژی می‌باشد که افزایش ظرفیت باربری قابل مشاهده می‌باشد.
3. با توجه به مقاومت کششی بالای الیاف CFRP نسبت به GFRP و خصوصیات کیفی و کاربردی که این الیاف نسبت به الیاف GFRP دارد. بهترین نوع الیاف برای سازه‌های بتنی الیاف کربن می‌باشد

### مقاوم سازی دال بتن

بر اثر عوامل متعددی نظیر خرابی‌های ناشی از خوردگی، کپولت سن سازه، خطاهای طراحی و اجرا، تغییر کاربری، ضعف آئین‌نامه قدیمی و .. ممکن است سازه‌های ساخته شده و به خصوص دال بتن سازه‌ها فاقد مقاومت و شکل‌پذیری لازم در مقابل بارهای اعمالی باشند. لذا تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های مورد نظر از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. به‌طور کلی تقویت سازه‌ها در اغلب موارد دارای اقتصادی بیشتری نسبت به ساخت مجدد آن می‌باشد.

مهم‌ترین هدف تقویت سازه، افزایش مقاومت و بهبود شکل‌پذیری رفتار اعضای موجود می‌باشد. از مهم‌ترین المان‌های نیازمند تقویت سازی دال‌های بتنی هستند که کاربرد گسترده در پروژه‌های عمرانی دارند. تقویت خمشی دال بتن آرمه به روش‌های مختلف همچون تقویت با ورق‌های فولادی، الیاف پلیمری مسلح و یا تقویت با آرماتورهای خارجی انجام می‌شود. این تقویت‌ها می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت خمشی و برشی سازه شوند. دال‌ها در ساختمان‌ها و عرشه‌ی پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همان‌طور که گفته شد تقویت سازی با الیاف پلیمری یکی از روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌هاست که با برطرف نمودن نقاط ضعف سیستم مقاوم‌سازی با ورق‌های فولادی در سال‌های اخیر بسیار رواج یافته است. در سال‌های اخیر با ایجاد فن‌های جدیدی در تولید کامپوزیت FRP از قبیل کامپوزیت‌های مختلط (هیبرید) و کامپوزیت‌های پیش‌تنیده کاربری آن‌ها توسعه یافته است. مزیت این روش را می‌توان اینگونه بیان کرد که دال بتنی ساخته شده نیازی به میلگرد نداشته و در محیط‌های در معرض خوردگی مقاوم هستند. ضخامت کم و وزن سبک نیز طرح را مقصدانه‌تر کرده و حمل‌ونقل نیز آسان شده است.

با رایج شدن این طرح انقلاب بزرگی در صنعت ساخت‌وساز رخ خواهد داد چرا که با حذف آرماتور در دال‌های پیش ساخته بتنی و کاهش قابل توجه در ضخامت آن و با در نظر گرفتن هزینه‌های بالای میلگرد و بتن و نیز کاهش روز افزون قیمت ورق‌های CFRP دال بتنی سبک ارزان و مقاوم خواهیم داشت. موارد کاربرد ساخت دال بتنی پیش‌ساخته با ضخامت کم بدون میلگرد جهت پوشش کانال‌های آب و نیز کانال‌های شهری و محیط‌های در معرض خوردگی است.

در ادامه مروری بر چند پروژه مقاوم‌سازی با استفاده از کامپوزیت FRP خواهیم داشت :

پژوهش‌هایی که در زمینه‌ی استفاده از FRP ( Fiber Reinforced Polymer) در جهت کاهش ضخامت دال بتن دوطرفه انجام شدند از ترکیب دال بتنی و ورق‌های پلیمری استفاده نمودند. بدین صورت که ورق‌های پلیمری به کف دال چسبانده شده تا از ضخامت معین دال که در آیین‌نامه بتن ایران بیان شده، کم شود که به این ترتیب با کاهش ضخامت دال از وزن بار مرده ناشی از بتن دال کاسته خواهد شد. در یکی از پژوهش‌های نامبرده منظور ایشان مدل‌های دال بتنی در نرم‌افزار اباکوس (ABAQUS) با ورق‌های CFRP در الگوها و لایه‌های متفاوت مدل‌سازی کردند، در ابتدا هرکدام از دال‌ها با ضخامت تعیین شده از روابط آیین‌نامه مورد تحلیل قرار گرفته و پس از آن با کاهش ضخامت دال و استفاده از لایه‌های FRP به تحلیل و نتایج مربوط پرداخت شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این ورق‌های

پلیمری مقدار قابل توجهی از وزن دال بتنی دوطرفه را کاهش می‌دهد به‌طوری‌که ضخامت دال به اندازه 37.5٪ کاهش داده خواهد می‌شود.



### مدل‌سازی

در تحقیق حاضر، 7 عدد دال بتنی با استفاده از طرح اختلاط بتن سبک ساخته شده است، که 6 عدد آن را با استفاده از الیاف FRP تقویت شده و یک نمونه به عنوان دال شاهد می‌باشد. دال‌ها تحت بارگذاری 4 نقطه‌ای خمشی قرار گرفته است.

### بتن سبک با لیکا

برای دستیابی به بتنی با مقاومت بالا از افزودنی‌های معدنی و شیمیایی استفاده گردید. همچنین از پودر سنگ به منظور کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری استفاده شد. با در نظر داشتن جنبه‌های اجرایی این نوع از بتن، متغیرها در طرح‌های مختلف عبارت‌اند از: نسبت آب به مصالح سیمانی، مقدار دانه‌های سبک در کل حجم بتن، مقدار سیمان و پودر سنگ.

در اینجا به بررسی بتن سبک سازه‌ای با مقاومت بالا که برای کاهش وزن آن از دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) استفاده شده، می‌پردازیم. مهم‌ترین ویژگی‌های بتن لیکا شامل مواردی چون: وزن کم، حمل‌ونقل آسان، بهره‌وری بالا هنگام اجرا، سطح مناسب برای اندودکاری، مقاومت و باربری، عایق حرارت و صدا، مقاوم در برابر یخ‌زدگی، بازدارندگی در برابر نفوذ رطوبت و دوام در برابر مواد آهکی، متناسب با وزن و مقاومت مورد نظر از بتن سبک لیکا به عنوان پرکننده، عایق و یا باربر استفاده می‌شود.



بتن لیکا می‌تواند در جا ریخته شود و یا به‌صورت بلوک، اجزای ساختمانی و سایر قطعات پیش‌ساخته بکار رود. در هر مورد متناسب با کاربرد و روش اجرا از دانه بنده‌ای مناسب لیکا استفاده می‌شود. بتن‌های پرکننده و عایق اغلب در پی‌سازی و زیرسازی ساختمان، شیب بندی کف و بام، بلوک‌ها یا اجزای دیوارهای جداکننده و محیطی غیرباربر به کار می‌روند. از این نوع بتن، در ساخت اجزای مقاوم نظیر بلوک‌های باربر، پانل‌های دیواری و سقفی مسلح و نیز اسکلت بتن مسلح ساختمان‌ها استفاده می‌شود. قابل توجه است که به دلیل الزامات مقاومت و دانه‌بندی، تنها با استفاده از دانه‌های لیکا می‌توان در ایران بتن سبک سازه‌ای ساخت.

در جداول زیر مشخصات نمونه آزمایشگاهی آمده است :

جدول 1 : مشخصات طرح اختلاط برای یک متر مکعب

سیمان	میکروسیلیس	فوق روان کننده	آب	لیکا	درشت دانه	پودر سنگ
450kg	100kg	10kg	10kg	300kg	450kg	200kg

#### الیاف کربنی FRP

از اوایل قرن 80 میلادی استفاده از سیستم‌های FRP برای بهسازی و تقویت سازه‌های آغاز شد. تکنولوژی استفاده از ورق‌هایی FRP اولین بار در سال 1984 در سوئیس مورد استفاده قرار گرفت که در آن ورق‌های CFRP جهت مقاوم‌سازی تیرهای بتنی آزمایش شد. بزرگ‌ترین مزیت ورق‌های FRP داشتن نسبت مقاومت به وزن بالای آن‌ها می‌باشد. ورق‌های FRP به طور معمول حداقل دو برابر و حتی می‌تواند ده برابر مقاومت ورق‌های فولادی را داشته باشند. در صورتی که وزن آن‌ها تنها 20٪ وزن ورق‌های فولادی می‌باشد. پلیمرهای مسلح از الیاف بسیار نازکی تشکیل شده‌اند که توسط ماده زمینه محصور می‌شوند. الیاف دارای جنس‌های متفاوتی بوده و به صورت قطعات کوتاه، رشته‌های دراز و پارچه‌های بافته تولید می‌شود. زمینه در FRP ها نقش محافظت از الیاف و انتقال تنش بین آن‌ها را ایفا می‌کند و الیاف بافت تک جهته (کلیه الیاف در جهت اعمال نیرو یعنی صفر درجه) می‌باشد.








#### انتخاب FRP مناسب جهت مقاوم‌سازی دال بتن

به طور کلی جهت قرارگیری الیاف در یک یا چند راستا از صفر 45، 90 و 135 درجه می‌باشد. به همین ترتیب نوع بافت‌ها نیز می‌تواند متغیر و به صورت تک جهته (0درجه)، دو جهته (90/0 و 90/45) و سه جهته (0/45/90) و چهار جهته (0/45/90/135) باشد. با توجه به نمودار تنش کرنش الیاف FRP، بهترین روش بافت برای رسیدن به بیشترین ظرفیت الیاف مسلح کننده بافت تک جهته (کلیه الیاف در جهت اعمال نیرو یعنی حالت صفر درجه) می‌باشد.

جدول 2 : مشخصات مکانیکی الیاف FRP

نوع الیاف	مدول الاستیسیته کششی (Gpa)	مقاومت کششی نهایی (Mpa)	ضخامت الیاف (mm)
Glass Wrap System) GF)	76	2300	0.16
Carbon Wrap System) CF)	230	4900	0.11

جدول 3 : مشخصات نمونه‌ها

SLAB	FRP	Concrete Dimension	Concrete & CFRP Cross-Section
Slab 1	-	1000*200*30 Mm	
Slab 2	CFRP	1000*200*40 Mm	
Slab 3	CFRP	1000*200*30 Mm	
Slab 4	CFRP	1000*200*30 Mm	
Slab 5	CFRP	1000*200*40 Mm	
Slab 6	CFRP	1000*200*30 Mm	
Slab 7	CFRP	1000*200*40 Mm	

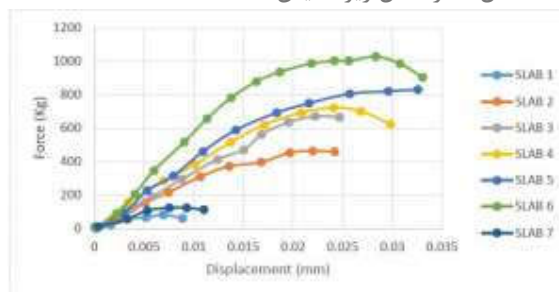
## آزمایش

از آنجایی که روش تولید و عمل آوری بتن تا حدی کاربرد آن را محدود می‌کند، هدف از انجام این آزمایش دستیابی به بتنی با کارایی مناسب و مقاومت بالا و سبک با استفاده از مصالح موجود در کشور می‌باشد. به این منظور با ایجاد تغییر در طرح مخلوط‌های اولیه طرح اختلاط نهایی با مقاومت مورد نظر بدست آمد. پس از ساخت دال‌ها و تقویت آن‌ها با الیاف FRP در آزمایشگاه تحت بارگذاری خمشی 4 نقطه‌ای قرار می‌گیرد. که نمودارها و شکل دال‌ها پس از شکست در ذیل نمایش داده شده است.



شکل 1: دستگاه بارگذاری

پس از شکستن نمونه‌های دال بتن (شکل 3) نیرو و جابجایی دال به دست می‌آید که در شکل زیر منحنی آن رسم شده است. همچنین نحوه شکست دال‌ها در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل 2: مقایسه دال‌های بتنی تحت آزمایش خمشی



شکل 3: دال‌های آزمایش شده

### نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر بر روی نمونه‌های دال بتن ساخته شده با بتن سبک و تقویت‌شده با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP و GFRP به روش‌های مختلفی انجام شده است. دالی که بیشترین تعداد لایه کربن و همچنین تقویت در کناره‌های دال را داشت بیشترین مقاومت را در خمش از خود نشان داد. یعنی زمان بسیاری جهت شکست این دال صرف شد. مقدار مقاومت خمشی این دال تقریباً بیش از نوزده برابر دال شاهد بود که نشان‌دهنده این بود که هر چه تعداد لایه‌ها بیشتر باشد مقاومت خمشی دال افزایش می‌یابد.

دلایل بسیاری در مراحل طراحی، اجرا و نگهداری موجب آسیب به اعضای سازه‌های بتنی شده که در پی آن امروزه سازه‌های زیربنایی متعددی به ترمیم و **مقاوم‌سازی** نیازمندند. ارائه یک طرح بهسازی و یا مقاوم سازی تیرهای بتنی و یا سایر اعضای سازه مستلزم مشخص نمودن نقاط ضعف و ارزیابی آسیب‌پذیری یک ساختمان در برابر می‌باشد. هدف از بهسازی سازه بهبود رفتار آن در برابر نیروهای ناشی از زلزله بوده بطوری که پس از انجام عملیات بهسازی بتوان انتظار داشت در سطوح خطر مختلف، خرابی‌ها و خسارات وارده بر اجزای ساختمان در حدود سطح عملکرد مورد انتظار باشد.

لذا در این راستا نیاز است طرح‌های بهسازی بطور دقیق و مطابق با وضعیت موجود ساختمان تعیین‌شده تا بتوان نسبت به برآورده شدن معیارهای پذیرش موردنظر در آیین‌نامه‌های معتبر، در اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای اطمینان حاصل نمود. این معیارها باید مبتنی بر اصول کلی طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه باشند با این تفاوت که در این حالت به دلیل وجود محدودیت‌های ناشی از وضعیت موجود از لحاظ سازه‌ای و معماری، نوع کاربری و بارگذاری روند طراحی با مشکلات همراه است که نیازمند راهکارهای متنوع‌تری خواهد بود.

با گسترش علوم و فن‌آوری در طول دهه‌های 70 و 80 میلادی استفاده از سیستم‌های (FRP Fiber Reinforced Polymers) به‌عنوان یک روش مقاوم‌سازی شناخته شد. این سیستم‌های الیافی در قالب‌های مختلفی مانند پارچه‌های تک‌جهته و دو‌جهته، لمینیت، میلگرد، بصورت چاپد در بتن و ... استفاده می‌شوند. از جمله عوامل محبوبیت این سیستم‌ها خواص متعدد آن‌ها مانند مقاومت، مدول الاستیسیته و دوام بالا، خواص ضد خوردگی، اجرای آسان، وزن بسیار کم و قیمت با صرفه اقتصادی می‌باشد.

### مقاوم سازی تیرهای بتنی

مقاوم سازی تیرهای بتنی و بطور کلی سازه‌ها در جهت تقویت آنان برای تحمل بارهای وارده، بهبود نارسایی‌های ناشی از فرسایش و خوردگی، افزایش شکل‌پذیری سازه یا موارد دیگر با استفاده از مصالح مناسب و شیوه‌های اجرایی صحیح انجام می‌گردد. استفاده از مواد کامپوزیت به شکل پلیمرهای مسلح شده با الیاف که به اختصار FRP نامیده می‌شوند به عنوان یک روش پرکاربرد و مناسب مقاوم‌سازی و جایگزین مصالح سنتی می‌شود. **مصالح FRP** از ترکیب الیاف و رزین ساخته می‌شوند، در فرایند مقاوم‌سازی از رزین (رزین اپوکسی) برای ایجاد لایه یکپارچه، همچنین چسبیدن سیستم FRP به سطح بتن زیرین و ایجاد پوشش به منظور محافظت مصالح استفاده می‌شود.

## برخی از روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه

استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده

استفاده از دیوار برشی

استفاده از میانقاب با مصالح بنایی

استفاده از پوشش و غلاف فولادی

استفاده از ورق FRP

استفاده از میراگرهای اصطکاکی

### معرفی سیستم FRP

کاهش سودمندی سطح عملکرد سازه‌ها در طول زمان تحت تأثیر عوامل محیطی و آسیب‌های ناشی از بارگذاری و تغییر کاربری اجتناب‌ناپذیر بوده و لذا لزوم تدوین روش‌های عملی جهت تقویت و یا تعمیر این‌گونه سازه‌ها اجباری می‌باشد. امروزه مواد کامپوزیت یا مواد مرکب به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد در صنایع محسوب می‌شود. این صنعت و تکنولوژی در کشور ما به عنوان یک صنعت تقریباً جدید و نو مطرح است و تاکنون قدم‌های مثبتی نیز در این زمینه برداشته شده است ولی به نظر می‌رسد تا دستیابی به شرایط مطلوب و رسیدن به مرزهای جهانی راه طولانی در پیش است. با توجه به اینکه این علم در بین علوم مختلف در حال رسیدن به جایگاه خود می‌باشد به خصوص در رشته مهندسی مکانیک و عمران به جایگاه ارزنده رسیده است به بررسی قسمتی از این صنعت در ساختمان‌سازی که تقویت سازه‌ها بوسیله این مواد می‌باشد پرداخته شده است.

### گستره

سیستم مقاوم‌سازی سازه‌ها با کامپوزیت اف ار پی (الیاف تقویت‌شده با پلیمرهای رزین اپوکسی) از دو جز اساسی تشکیل می‌شوند. فایبر(الیاف) و ماتریس یا رزین (ماده چسباننده).

فیبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در سیستم محسوب می‌شوند. بسته به نوع فیبر، قطر آن در محدوده 5 تا 25 میکرون می‌باشد این الیاف توسط رزینی از جنس پلیمر که رزین اپوکسی می‌باشد احاطه گردیده است. رزین اصولاً به‌عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند، که فیبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود، ماتریس‌های با مقاومت کم به صورت چشمگیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آن اثر نمی‌گذارند.

### حداقل مقاومت سطح بتن

سیستم FRP بروی بتن سالم عمل می‌نماید و نباید از آن‌ها برای سازه دارای فولاد خورده شده یا بتن فرسوده استفاده نمود. مقاومت بتن موجود عامل مهمی برای کاربری‌های چسبندگی بحرانی شامل مقاوم‌سازی خمشی یا برشی اعضا می‌باشد. حداقل مقاومت کششی بتن 1.4 مگا پاسکال می‌باشد، و سیستم FRP نباید برای کاربری‌های چسبندگی بحرانی هنگامی که بتن دارای مقاومت فشاری کمتر از 17 مگا پاسکال است استفاده شود. ضمناً استفاده از سیستم FRP سبب توقف خوردگی میلگردهای در حال خورده شدن نخواهد شد لذا قبل از نصب این سیستم باید آرماتورها و بتن ترمیم شوند.

اعضای سازه‌ای که توسط FRP مقاوم‌سازی می‌گردند :

(1) تیرها

(2) ستون‌ها

(3) دال‌ها

(4) اتصالات

(5) ساختمان‌های بتنی



6) ساختمان‌های چوبی

مزایای روش مقاوم‌سازی تیر بتنی توسط FRP

1) افزایش مقاومت خمشی، برشی و ضربه تیر

3) افزایش شکل‌پذیری، دوام و عمر تیر

4) افزایش مقاومت در برابر خوردگی

6) کنترل عرض ترک

7) ضخامت کم ورقه‌های اف آر پی و عدم تغییر قابل توجه در ابعاد تیر

8) سهولت در اجرا و صرفه اقتصادی

صحت سنجی نتایج مطالعات آزمایشگاهی ساخته‌شده با نمونه‌های مدل‌سازی شده در آباکوس

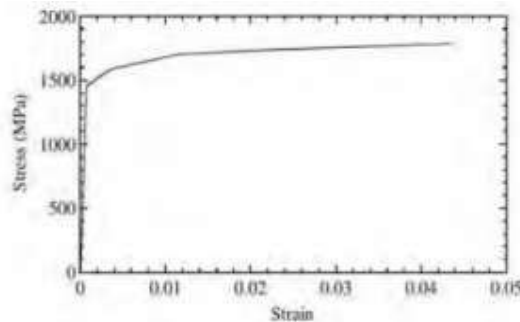
در این قسمت به بررسی نتایج و اعتبار سنجی دو نمونه آزمایشگاهی تیر بتنی پیش‌تنیده با نمونه‌های مورد مطالعه مدل‌سازی شده مستطیلی و اشکال در این تحقیق پرداخته شده است و نمودارهای نیرو- تغییر مکان آن‌ها با هم مورد صحت سنجی و مقایسه قرار گرفته است.

معرفی مشخصات مصالح و هندسی تیرهای مورد مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده

نمونه اول تیر مستطیلی پیش‌تنیده

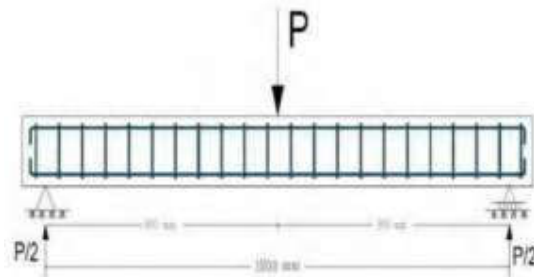
در این آزمایش تیر مستطیلی پیش‌تنیده برای مدل‌سازی با عرض 200 mm، ارتفاع 300 mm و طول 2000 mm ساخته شد. مقاومت فشاری طراحی نمونه بتن پیش‌تنیده 45 Mpa در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری بدست آمده در عمل از آزمایش فشاری روی چهار مکعب استاندارد بدست آمد. برای حالت الاستیک مدول الاستیسیته بتن 31034.23 Mpa و ضریب پواسون 0.2 و در حالت پلاستیک برای مدل‌سازی بتن از روش Concrete damage plasticity استفاده شده است. این روش از نظریه دراکر پراگر استفاده می‌کند. تیر بتن پیش‌تنیده با چهار میلگرد فولادی معمولی و دو کابل پیش‌تنیدگی مسلح گردید و خاموت‌های عرضی با قطر 8 mm در فواصل 200 Gpa می‌باشند. کابل‌های پیش‌تنیدگی مورد استفاده در تیر نیز دارای مقاومت تسلیم و مدول ارتجاعی اسمی به ترتیب برابر 1800 Mpa و 200 Gpa می‌باشند.

کابل‌های مفروض دارای قطر 5 میلی‌متر هستند که تا تنش 1010 Mpa پیش‌تنیده شده‌اند. مدول الاستیسیته تانژن‌ها برابر 200 گیگاپاسکال فرض شده است. بر اساس تست‌های صورت گرفته نمودار تنش کرنش رفتار غیر خطی تانژن‌ها مطابق شکل زیر وارد نرم‌افزار شده است.



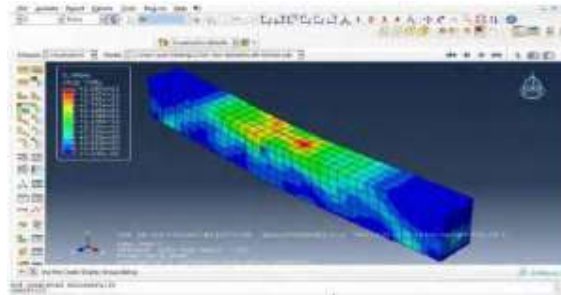
شکل 1: رابطه تنش - کرنش کابل‌های پیش‌تنیده

تیر بتن پیش‌تنیده با تکیه‌گاه‌های ساده مانند شکل زیر اثر بار استاتیکی قرار گرفت. فاصله بین تکیه‌گاه‌ها 1800 mm می‌باشد.

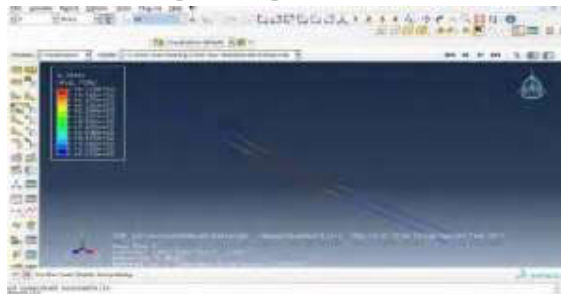


شکل 2: شرایط تکیه‌گاه و بارگذاری

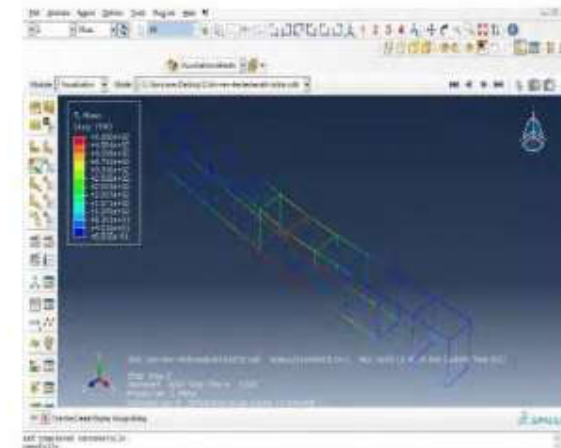
نتایج حاصل از تحلیل تیر بتنی پیش‌تنیده در آباکوس برای مصالح مختلف به کار رفته در شکل‌های زیر مشخص است.



شکل 3: مدل تیر بتنی مستطیلی بعد از تحلیل



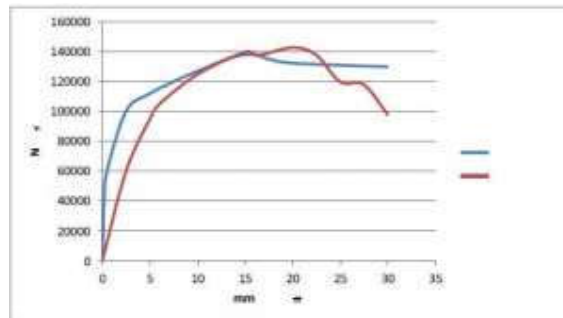
شکل 4: مدل کابل‌های پیش‌تنیدگی بعد از تحلیل



شکل 5: مدل خاموت‌ها و میلگردها بعد از تحلیل

نمودار تغییرات جابجایی در وسط دهانه در برابر تغییرات نیرو برای تیر بتن پیش‌تنیده مورد نظر که تحت بار استاتیکی در آزمایشگاه قرار گرفته و همچنین نمودار تیر بتن پیش‌تنیده مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس نمایش داده شده

است. نمودار نیرو - تغییر مکان شامل چند خاصیت است شیب نمودار در قسمت بارگذاری اولیه سختی تیر را نشان می‌دهد. مقدار بیشترین تغییر مکان روی نمودار نشان‌دهنده تغییر مکان ماکسیمم وسط دهانه می‌باشد. سطح زیر نمودار نیز میزان انرژی پذیری تیر را نشان می‌دهد.

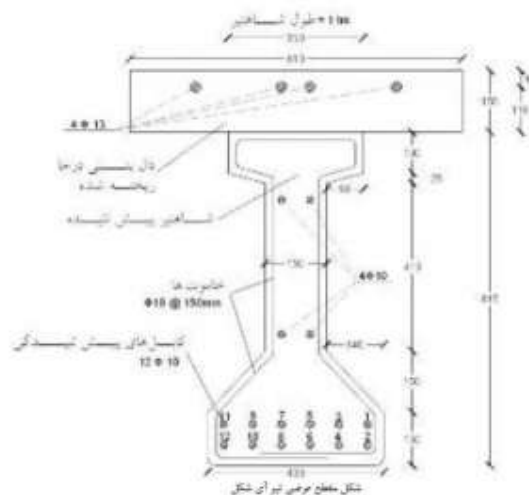


نمودار 1: تغییرات نیرو جابجایی در وسط دهانه تیر بتن پیش‌تنیده مستطیلی

مقایسه‌ای که بین منحنی نیرو - تغییر مکان وسط تیر بتن پیش‌تنیده مدلسازی شده و نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته است در شکل بالا نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد که نتایج بدست آمده از تیر مدل‌سازی شده تطابق نسبتاً خوبی با مطالعات آزمایشگاهی دارد.

#### نمونه اصلی دوم تیر ا شکل

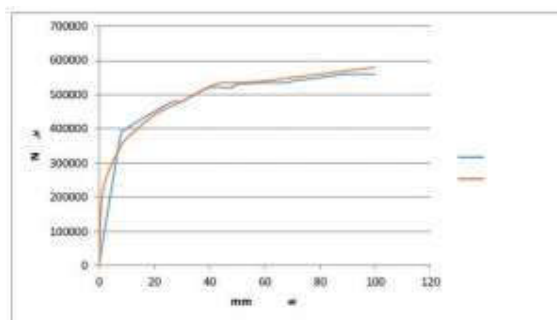
تیر دارای ابعادی به عرض 430 mm، ارتفاع 815 mm و طول کلی تیز 11 mm و فاصله بین دو تکیه‌گاه 10 m می‌باشد. مقاومت فشاری طراحی نمونه بتن پیش‌تنیده 45 Mpa و با ضریب پواسون 0.2 در نظر گرفته شده است. در حالت الاستیک مانند نمونه مستطیلی مدول الاستیسیته بتن 31034.23 و ضریب پواسون 0.2 و در حالت پلاستیک برای مدل‌سازی بتن از روش Concrete damage plasticity استفاده شده است. این روش از نظریه دراکر پراگر استفاده می‌کند. در اعضای مدل‌سازی شده دو نوع فولاد وجود دارد) کابل‌های پیش‌تنیدگی، فولاد نرمال میلگردها و خاموت‌ها) خصوصیات الاستیک این دو نوع فولاد با یکدیگر برابرند (مدول الاستیسیته برابر 200 Gpa و ضریب پواسون 0.3) منحنی تنش - کرنش کابل‌ها حاصل از آزمایش کابل رده 1860 Mpa می‌باشد و تنش ناشی از پیش‌تنیدگی که به کابل‌ها وارد شده است 7700 Mpa می‌باشد. پلاستیسیته کابل‌ها و فولادهای مدل‌سازی شده بر اساس مدل پلاستیسیته سخت‌شدگی ایزوتروپیک دو خطی به نرم‌افزار معرفی شده است.



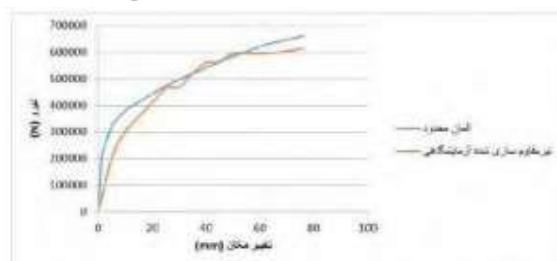
شکل 6: شکل مقطع عرضی تیر ا شکل

## مشخصات مصالح کامپوزیتی

مصالح کامپوزیتی FRP به کار رفته برای مقاوم‌سازی تیرها از نوع پلیمر فیبر مسلح کربنی CFRP می‌باشد. رفتار مصالح FRP تا لحظه گسیختگی به صورت الاستیک خطی می‌باشد و با توجه به تفاوت خصوصیت‌های مقاومتی این مصالح در جهت‌های مختلف مشخصات این مصالح به صورت اورتوتروپیک تعریف می‌شود. مقادیر ضخامت اسمی هر لایه، مقاومت کششی نهایی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر  $0.165 \text{ mm}$ ،  $8003 \text{ Mpa}$ ،  $227 \text{ Gpa}$  می‌باشد. مقایسه نتایج بدست آمده بر اساس تحلیل‌های المان محدود در تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی در دو بخش کلی (1) تیر شاهد بدون مقاوم‌سازی با CFRP 2) تیرهای مقاوم‌سازی شده با CFRP انجام می‌گیرد. در بخش اول نتایج بدست آمده مطالعات آزمایشگاهی با مدل‌سازی المان محدود در نمودار نیرو-تغییر مکان شکل زیر نشان داده شده است همان‌طور که مشخص است، تطابق مناسبی بین نمودار آزمایشگاهی با مدل المان محدود وجود دارد.

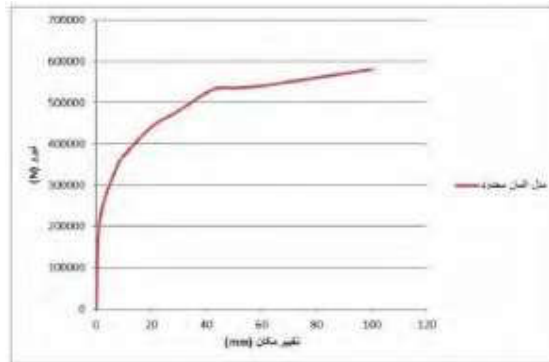


نمودار 2: نمودار نیرو تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و المان محدود



نمودار 3: نمودار نیرو تغییر مکان مدل مقاوم‌سازی شده آزمایشگاهی با المان محدود

در بخش دوم نتایج بدست آمده مطالعات آزمایشگاهی با مدل‌سازی المان محدود مقاوم‌سازی شده با CFRP به طول  $3.33 \text{ m}$  به صورت 2 لایه در نمودار نیرو-تغییر مکان شکل زیر نشان داده شده است همان‌طور که مشخص است تطابق بسیار مناسبی بین نمودار آزمایشگاهی با المان محدود وجود دارد و ظرفیت باربری نمونه المان محدود در انتهای نمودار بیشتر از مدل مورد مطالعه آزمایشگاهی می‌باشد. در این فصل نتایج حاصل از طراحی و تحلیل تیرهای بتنی پیش‌تنیده ا شکل مقاوم‌سازی شده صحت سنجی شده با مطالعات آزمایشگاهی با ورق‌های CFRP با طول‌های مختلف در وسط دهانه با طول‌های مختلف در چهار مدل بین دو تکیه‌گاه و در حالت‌های یک لایه دو لایه و سه لایه جهت تقویت خمشی تیرها و افزایش ظرفیت باربری در نرم افزار المان محدود آباکوس به صورت نمودارهای نیرو تغییر مکان و همچنین تصاویر تنش‌های وارده بر مصالح جهت مقایسه و بررسی بهترین و بهینه‌ترین مدل نشان داده می‌شود. نمودار زیر نیرو-تغییر مکان تیر ا شکل شاهد بدون مقاوم‌سازی با CFRP در آباکوس را جهت مقایسه و بررسی با نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نشان می‌دهد.

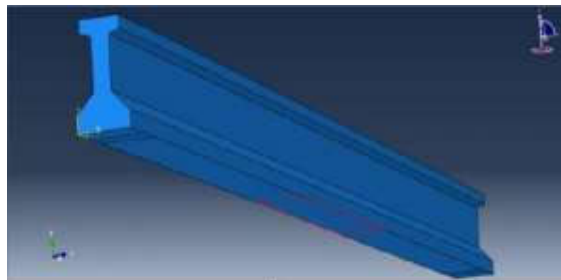


نمودار 4: نمودار تغییر مکان تیر A شکل

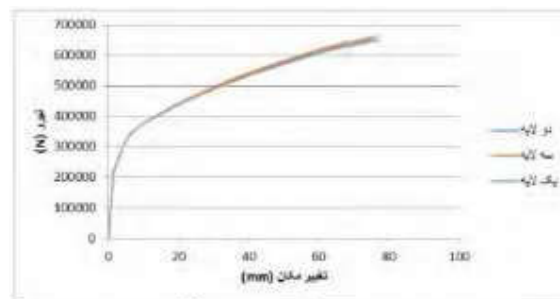
#### بحث و بررسی

همان‌طور که در نمودار بالا مشخص است تیر A شکل پیش‌تنیده بدون مقاوم‌سازی قادر است در حالت تغییر مکان 76 میلی‌متر 550687 نیوتون نیرو و در حالت 100 میلی‌متر 586241 نیوتون بار را تحمل کند.

مدل اول تیر مقاوم‌سازی شده با CFRP به طول 2.5 متر یک چهارم دهانه



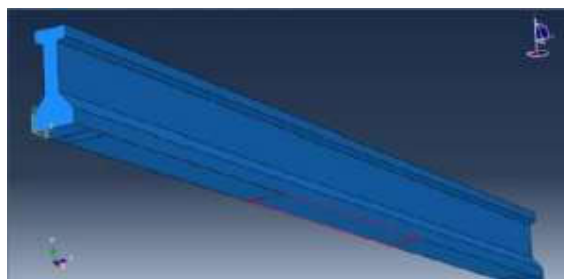
شکل 7: شکل نمای CFRP وسط دهانه در زیر تیر



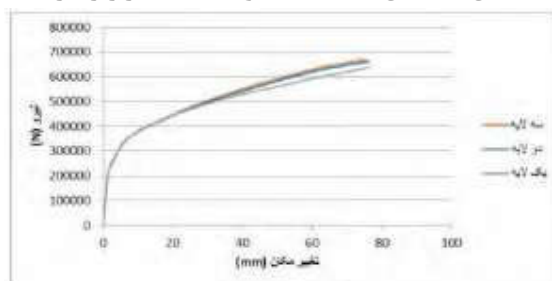
نمودار 5: نمودار تغییر مکان تیر A شکل مقاوم‌سازی شده با CFRP در لایه‌های مختلف

در نمودار نیرو-تغییر مکان اولین نمونه از تیر مقاوم‌سازی شده با CFRP به طول 3.5 متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد نیروی‌های قابل تحمل در تغییر مکان 6 میلی‌متر برای حالت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 646384، 651915، 662044 نیوتون می‌باشد که اضافه کردن تعداد لایه‌های CFRP باعث افزایش باربری تیر می‌شود.

مدل دوم تیر مقاوم‌سازی شده با CFRP به طول 3.33 متر یک سوم دهانه



شکل 8: نمای CFRP وسط دهانه در زیر تیر

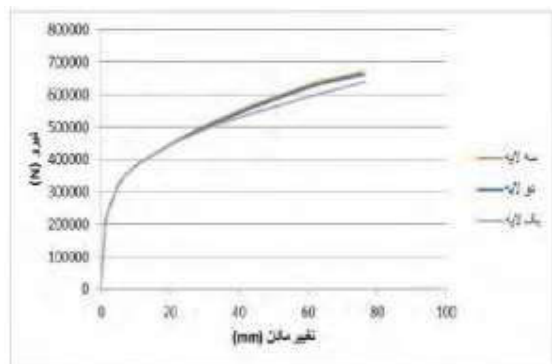


نمودار 6: نمودار تغییر مکان تیر I شکل مقاوم سازی شده با CFRP در لایه های مختلف در نمودار نیرو- تغییر مکان اولین نمونه از تیر مقاوم سازی شده با CFRP به طول 3.33 متر نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد نیروی های قابل تحمل در تغییر مکان 76 میلی متر برای حالت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 638111، 661230، 670000 نیوتون می باشد که اضافه کردن تعداد لایه های CFRP باعث افزایش باربری تیر می شود.

مدل سوم تیر مقاوم سازی شده با CFRP به طول 5 متر یک دوم دهانه



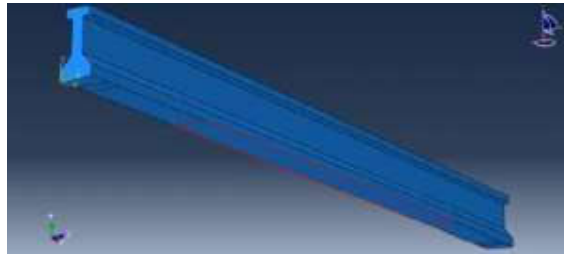
شکل 9: نمای CFRP وسط دهانه در زیر تیر



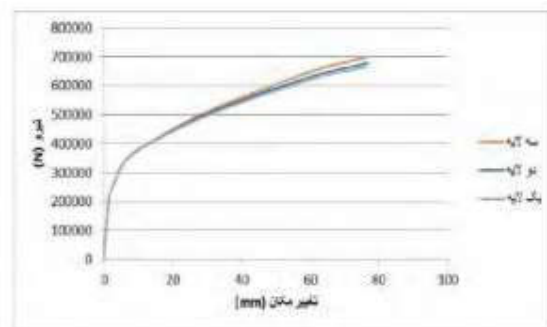
نمودار 7: نمودار تغییر مکان تیر I شکل مقاوم سازی شده با CFRP در لایه های مختلف

در نمودار نیرو- تغییر مکان اولین نمونه از تیر مقاومسازی شده با CFRP به طول 5 متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد نیروی‌های قابل تحمل در تغییر مکان 76 میلی‌متر برای حالت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 654623، 676444، 689608 نیوتون می‌باشد که اضافه کردن تعداد لایه‌های CFRP باعث افزایش باربری می‌شود.

مدل چهارم تیر مقاومسازی شده با CFRP به طول 6.66 متر دو سوم دهانه



شکل 10: شکل نمای CFRP وسط دهانه در زیر تیر



نمودار 8: نمودار تغییر مکان تیر I شکل مقاومسازی شده با CFRP در لایه‌های مختلف

در نمودار نیرو- تغییر مکان اولین نمونه از تیر مقاومسازی شده با CFRP به طول 6.66 متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد نیروی‌های قابل تحمل در تغییر مکان 76 میلی‌متر برای حالت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 664199، 678424، 699354 نیوتون می‌باشد که اضافه کردن تعداد لایه‌های CFRP باعث افزایش باربری تیر می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

پس از آنکه نتیجه مطالعات نمونه آزمایشگاهی با مدل‌سازی نرم‌افزار آباکوس تطابق قابل قبولی داشت به ادامه روند پرداخته شد و مدل تیر I شکل صحت‌سنجی شده با چهار نمونه ورق‌های CFRP با طول و لایه‌های مختلف مورد مقاومسازی قرار گرفته شد. در اینجا نتایج مقاومسازی با CFRP بیان شده و همچنین پیشنهادات برای کارهای آینده در این زمینه ارائه شده است.

- با مقایسه نمودارها در حالت اول تقویت خمشی تیر I شکل با CFRP با طول 5 متر نسبت به تیر شاهد که مقاومسازی روی آن انجام نشده است در انتهای نمودار با مقدار جابجایی 76 میلی‌متر در حالت تقویت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 17.5، 18، 20 درصد باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شده است.
- با مقایسه نمودارها در حالت دوم تقویت خمشی تیر I شکل با CFRP با طول 33 متر نسبت به تیر شاهد که مقاومسازی روی آن انجام نشده است در انتهای نمودار با مقدار جابجایی 76 میلی‌متر در حالت تقویت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 16، 20، 21.5 درصد باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شده است.

- با مقایسه نمودارها در حالت سوم تقویت خمشی تیر 1 شکل با CFRP با طول 5 متر نسبت به تیر شاهد که مقاوم سازی روی آن انجام نشده است در انتهای نمودار با مقدار جابجایی 76 میلی متر در حالت تقویت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 19، 23، 25 درصد باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شده است.
- با مقایسه نمودارها در حالت چهارم تقویت خمشی تیر 1 شکل با CFRP با طول 66 متر نسبت به تیر شاهد که مقاوم سازی روی آن انجام نشده است در انتهای نمودار با مقدار جابجایی 76 میلی متر در حالت تقویت یک لایه دو لایه و سه لایه به ترتیب 20.5، 23، 27 درصد باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شده است.
- افزایش تعداد لایه های CFRP از یک تا سه لایه در تقویت خمشی تیرها باعث افزایش 5.2 تا 7 درصدی ظرفیت باربری می شود و تأثیر بیشتری نسبت به افزایش طول ورق دارد.
- افزایش طول FRP جهت تقویت خمشی تیرها در حالت یک لایه باعث افزایش 1 تا 2.5 درصدی ظرفیت باربری می شود.
- بهینه ترین مدل تقویت خمشی تیرها با CFRP طول دو سوم دهانه می باشد که هم از نظر هزینه و کارایی بیشترین بازده را دارا می باشد.

### 5-1-1- مقاوم سازی ستون بتنی توسط FRP

امروزه بسیاری از سازه ها به دلایل متفاوتی نظیر ضعف در طراحی و اجرا، تغییر کاربری و افزایش بارگذاری سازه، ضعف آیین نامه های قدیمی، افزایش تعداد طبقات و همینطور تأثیر عوامل محیطی مخرب آسیب دیده و نیاز به تقویت و مقاوم سازی دارند. در این بین از روش های متفاوتی جهت رسیدن به مقاومت و پایداری مورد نظر استفاده می شود که از جمله روش های [مقاوم سازی](#) که اخیراً رواج یافته است، استفاده از کامپوزیت های FRP می باشد. از جمله دلایل استفاده از روزافزون از کامپوزیت های FRP، می توان به مقاومت، مدول الاستیسیته و دوام بالا، وزن کم، حمل و نقل و نصب آسان، مقاومت در برابر خوردگی و ضربه، خواص ضد خوردگی و توجیه اقتصادی اشاره کرد. برای اولین بار در اواسط دهه 80 میلادی استفاده از کامپوزیت FRP برای تقویت ستون بتنی پیشنهاد شد. تا کنون تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته و به روش های مختلف به بررسی اثرات محصورشدگی توسط کامپوزیت های FRP پرداخته شده است.

در سال 2001، تحقیقی روی کارایی پوشش FRP برای محصور کردن ستون های بتن آرمه ی مستطیلی بررسی شد که مشخص نمود پارامترهایی مانند نوع الیاف (AFRP, GFRP, CFRP)، ضخامت لایه، نسبت ابعاد مقطع و شعاع گوشه بر مقاومت و کرنش محوری تأثیرگذار هستند. نتایج آزمایش ها نشان داد که به دنبال افزایش تیزی گوشه و نیز افزایش نسبت ابعاد، ظرفیت نهایی ستون کاهش می یابد؛ نتیجه ی دیگر این که الیاف شیشه در محصور کردن ستون های چهارگوش مؤثرتر از الیاف کربن و آرامید می باشد.

تأثیر بهینه سازی مصرف کامپوزیت CFRP با استفاده از کم کردن طول مؤثر کمانش ستون بتنی بدون تغییر در میزان الیاف مصرفی در ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون ها نیز در سال 1392 توسط مستوفی نژاد، سلجوقیان و رضوی بررسی شد. برای این پژوهش 3 نمونه ستون دایروی بتن آرمه به قطر 150 میلی متر و ارتفاع 500 میلی متر با آرایش الیاف متفاوت تحت بار محوری خالص قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن بود که کم کردن طول مؤثر کمانش در حالت تقویت غیر پیوسته ی ستون با الیاف، بدون نیاز به افزایش میزان الیاف مصرفی موجب افزایش ظرفیت باربری و بهبود شکل پذیری ستون می شود.

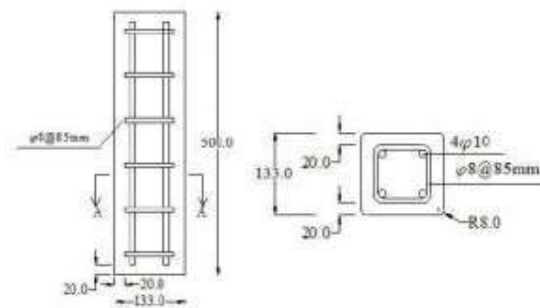
از جمله مواد کاربرد کامپوزیت های FRP، افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون های بتن آرمه در محصورسازی با استفاده از پوشش خارجی چسبیده به بتن می باشد. میزان تأثیر محصورشدگی به وسیله ی FRP به عوامل مختلفی نظیر شکل مقطع ستون، مقاومت بتن، نوع الیاف و رزین، حجم و جهت الیاف، ضخامت کامپوزیت، زاویه ی دورپیچی و



چیدمان لایه‌ها بستگی دارد. در این تحقیق تلاش شده است که به بررسی تأثیر محصورشدگی با توجه به شکل مقطع ستون، در میزان افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون پرداخته شود.

### 6-1-1- مشخصات نمونه‌های با مقطع مربعی

آزمایش صورت گرفته در این پژوهش توسط 2 نمونه‌ی ستون بتن آرمه با مقیاس کوچک به ارتفاع 500 میلی‌متر و با مقطع مربعی شکل با طول ضلع 133 میلی‌متر، انجام شده است. در نمونه‌های مورد نظر 4 میلگرد طولی با قطر 10 میلی‌متر و 6 عدد خاموت افقی با قطر 8 میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز 85 میلی‌متر بکار رفته است. کد US 4، معرف نمونه‌ی بدون محصورشدگی (نمونه‌ی مرجع با مقطع مربعی)، کد CS 5، معرف نمونه‌ی تقویت‌شده با دورپیچ CFRP به صورت غیر پیوسته در ارتفاع، به صورت نوارهایی به عرض 50 میلی‌متر و طول 600 میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز 100 میلی‌متر می‌باشد. همپوشانی الیاف نیز در یک لایه دورپیچ 80 میلی‌متر در نظر گرفته شد. جهت ایجاد آرایش ذکر شده برای نوارها، تقویت نمونه‌ها طوری انجام گرفت که به میزان 25 میلی‌متر از هر انتهای ستون رها شده و سپس نوارهای محصورکننده به صورت غیر پیوسته ناحیه‌ی 450 میلی‌متری میانی ستون را پوشش می‌دهند و نحوه‌ی قرارگیری نوارها نسبت به مرکز ستون کاملاً متقارن می‌باشد. با توجه به این که آرماتورهای طولی در تمامی نمونه‌ها 20 میلی‌متر مانده به دو انتهای ستون قطع می‌شوند، بنابراین 20 میلی‌متر انتهایی ستون ضعیف‌تر از سایر قسمت‌های ستون می‌باشد و ممکن است ستون در این قسمت‌ها دچار شکست زود هنگام شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل، در تقویت هر نمونه از دو نوار محصورکننده‌ی CFRP به عرض 50 میلی‌متر و طول 600 میلی‌متر، علاوه بر تقویت مورد نظر برای آن نمونه، در دو انتهای ستون استفاده شده است. به منظور کاهش تمرکز تنش در دورپیچ و افزایش میزان تأثیرگذاری آن، گوشه‌های مقطع به شعاع 8 میلی‌متر در راستای هر ضلع گرد می‌شود. تصویر شماتیکی از جزئیات آرماتوربندی نمونه‌های با مقطع مربعی در شکل 1 نمایش داده شده است.

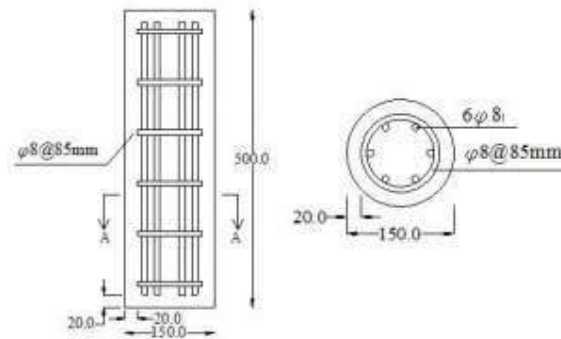


شکل 1: جزئیات فولاد گذاری نمونه‌های با مقطع مربعی

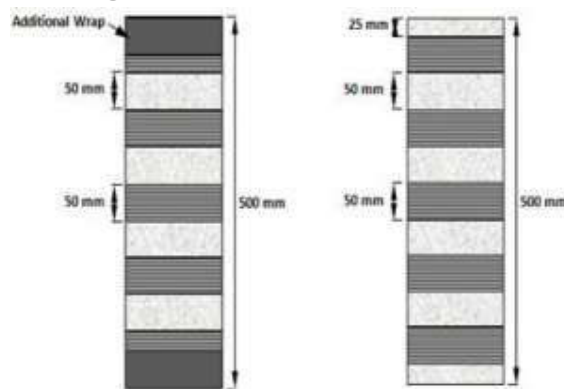
### 7-1-1- مشخصات نمونه‌های با مقطع دایره‌ای

از طرف دیگر، 2 عدد نمونه‌ی ستون بتن آرمه با مقطع دایره‌ای شکل با قطر 150 میلی‌متر و ارتفاع 500 میلی‌متر، برای مقایسه با ستون‌های با مقطع مربعی ساخته شد. هر کدام از این نمونه‌های ستون بتن آرمه شامل 6 میلگرد طولی با قطر 8 میلی‌متر و 6 عدد خاموت افقی با قطر 8 میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز 85 میلی‌متر می‌باشد. کد UC 1، معرف نمونه‌ی استوانه‌ای بدون محصورشدگی (نمونه‌ی مرجع) و کد CC 2، معرف نمونه‌ی استوانه‌ای تقویت‌شده با دورپیچ CFRP به صورت غیر پیوسته در ارتفاع، به صورت نوارهایی به عرض 50 میلی‌متر و طول 600 میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز 100 میلی‌متر می‌باشد. این نوارهای محصورکننده به صورت غیر پیوسته ناحیه‌ی 450 میلی‌متری میانی ستون را پوشش می‌دهند و نحوه‌ی قرارگیری نوارها نسبت به مرکز ستون کاملاً متقارن می‌باشد. همانند ستون‌های با مقطع مربعی، در این ستون‌ها نیز از دو نوار محصورکننده‌ی اضافی برای جلوگیری از شکست ستون در انتها استفاده شده است. تصاویر شماتیکی از آرماتوربندی ستون‌های با مقطع دایره‌ای و نحوه‌ی تقویت

خارجی ستون‌های با مقطع مربعی و دایره‌ای با استفاده از کامپوزیت CFRP، در شکل‌های 2 و 3 قابل مشاهده می‌باشد.



شکل 2: جزئیات فولاد گذاری نمونه‌های با مقطع دایره‌ای



شکل 3: نحوه‌ی آرایش نوارهای CFRP در ارتفاع نمونه‌های تقویت‌شده (CC و CS)

### مشخصات مصالح مورد استفاده

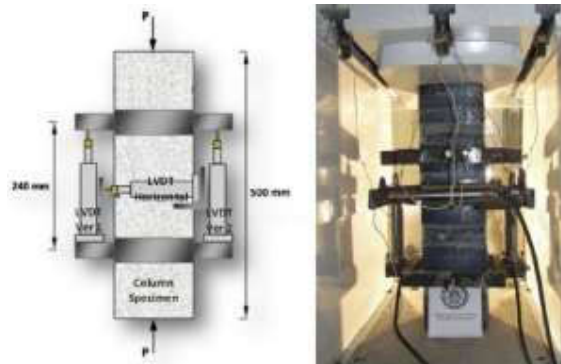
میلگردهای مورد استفاده در این پژوهش، از نوع آجدار AIII و در قطرهای 8 و 10 میلی‌متر می‌باشد. بر اساس آزمایش کشش مستقیم انجام شده بر روی این میلگردها، تنش تسلیم و تنش نهایی، برای میلگردهای با قطر 10 میلی‌متر، به ترتیب 406 و 538 مگا پاسکال و برای میلگردهای با قطر 8 میلی‌متر، 550 و 774 مگا پاسکال می‌باشد. طرح اختلاط بتن برای ساخت نمونه‌ها با استفاده از آئین‌نامه‌ی ACI-211<sup>1</sup> برای رسیدن به مقاومت فشاری 28 روزه 30 مگا پاسکال تعیین گردید. بر اساس این طرح اختلاط، وزن شن (5-10)، ماسه (5-0)، سیمان و آب مورد استفاده در یک متر مکعب بتن به ترتیب برابر 736، 893، 423 و 228 کیلوگرم می‌باشد. الیاف به‌کاربرده شده تک‌جهته و از کربن (CFRP) می‌باشند. در این تحقیق برای نصب الیاف FRP و آغشته‌سازی آن از رزین اپوکسی دو جزئی با نام تجاری Siadur-330 محصول شرکت سیکای کشور سوئیس استفاده شده است. مشخصات مکانیکی این الیاف به همراه رزین مصرفی در جدول 1 آورده شده است.

نام محصول	ضخامت (mm)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مقاومت الاستیسیته کششی (MPa)	کرنش نهایی ورق (%)
الیاف کربن	0.17	3900	230	1.5
رزین	-	30	4.5	1.5

جدول 1 : مشخصات مکانیکی الیاف و رزین مورد استفاده

### نحوه‌ی انجام آزمایش

پس از عمل‌آوری 28 روزه عمل‌آوری نمونه‌ها در آب به منظور تقویت نمونه‌ها با دورپیچ FRP، ابتدا لایه‌ی سطحی ضعیف بتن با استفاده از دستگاه سنگ فرز برداشته شد؛ خلل و فرج سطح بتن توسط پرایمر اپوکسی پر شد؛ سپس پس از آغشته نمودن سطح بتن به یک لایه چسب اپوکسی، الیاف کربن به روش شکل‌دهی مرطوب (wet layup) بر روی نمونه‌ها چسبانده شد. نمونه‌ها پس از گذشت حدود 7 روز و رسیدن ماتریس به مقاومت نهایی، توسط دستگاه جک هیدرولیکی 2000 کیلو نیوتونی، تحت بار محوری خالص قرار گرفته و تا لحظه‌ی شکست بارگذاری شدند. تعیین تغییر شکل محوری ستون توسط دو عدد جابه‌جایی سنج (LVDT) که در دو طرف نمونه و روبروی هم قرار گرفته‌اند (میانگین دو عدد نمایش داده شده) انجام می‌شود. همچنین برای تعیین تغییر شکل جانبی ایجاد شده در ستون، از یک عدد جابه‌جایی سنج افقی استفاده گردید. نحوه‌ی قرارگیری جابه‌جایی سنج‌ها در کنار ستون در شکل 4 قابل ملاحظه می‌باشد برای نصب جابه‌جایی سنج‌ها بر روی نمونه از دو عدد قاب فولادی مربعی شکل استفاده می‌شود که توسط چهار پیچ به سطح نمونه متصل می‌شوند. به منظور وزن کمتر و استحکام بیشتر، از مقطع قوطی شکل در ساخت این قاب‌های فولادی استفاده شده است.



شکل 4 : نحوه‌ی قرارگیری جابه‌جایی سنج‌ها در کنار ستون

### مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی

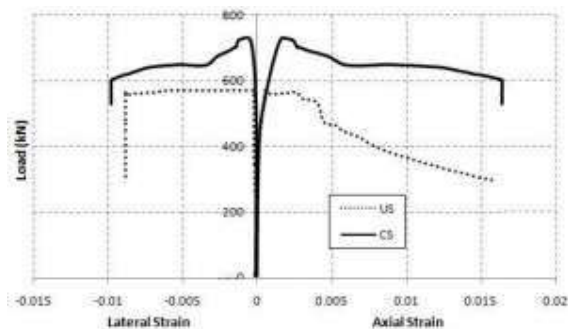
نمونه‌ها توسط دستگاه جک هیدرولیکی موجود در دانشگاه صنعتی اصفهان تا لحظه‌ی شکست نهایی به‌صورت تغییر مکان کنترل با سرعت 1 میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند؛ ظرفیت باربری حداکثر و کرنش‌های محوری و جانبی نهایی نمونه‌ها در جدول 2 قابل مشاهده می‌باشد.

کد نمونه	شکل مقطع	تقویت خارجی	بار حداکثر (kN)	کرنش محوری نهایی	کرنش جانبی نهایی
US	مربع	محصور نشده	571	0.00435	0.00881
CS	مربع	محصور شده	732	0.01641	0.00977
UC	دایره	محصور نشده	561	0.01700	0.00900
CC	دایره	محصور شده	836	0.02635	0.01293

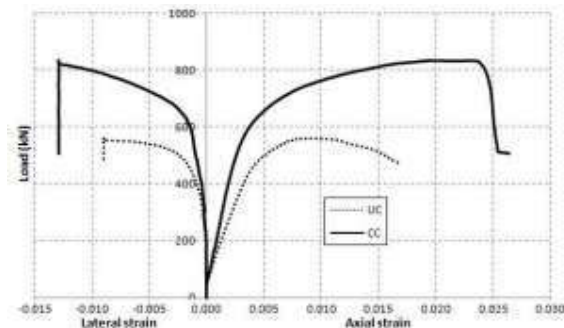
جدول 2 : نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های ستون بتن آرمه

به دلیل وجود آرماتور طولی در تمام نمونه‌ها، شکست نمونه‌ها به صورت نرم و غیر انفجاری بود. همان‌گونه که از جدول 2 می‌توان فهمید؛ نمونه‌ی محصورشده با مقطع مربعی CS نسبت به نمونه‌ی شاهد با مقطع مربعی (2/28% US) افزایش مقاومت داشته در صورتی که نمونه‌ی محصورشده با مقطع دایره‌ای CC نسبت به نمونه‌ی شاهد با مقطع دایره‌ای (49% UC) افزایش ظرفیت باربری را تجربه کرده است. این در حالی است که میزان کامپوزیت CFRP مورد استفاده در هر دو ستون تقویت شده، به یک اندازه بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان افزایش ظرفیت باربری در ستون با مقطع دایره‌ای بیش از ستون با مقطع مربعی می‌باشد. علت این اتفاق این است که در نمونه‌ی با مقطع دایره‌ای تنش‌های جانبی ناشی از محصورشدگی به صورت یکنواخت در کل محیط مقطع توزیع می‌شوند؛ این در حالی است که در نمونه‌ی با مقطع مربعی به دلیل ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع، توزیع تنشی به صورت غیر یکنواخت ایجاد می‌گردد.

شکل‌های 5 و 6، به ترتیب منحنی‌های بار-کرنش نمونه‌های ستون بتن آرمه با مقطع مربعی و دایره‌ای را نمایش می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، شیب تمامی منحنی‌ها در ناحیه‌ی ابتدایی نمودار تقریباً مساوی بوده که بیانگر سختی یکسان نمونه‌ها در مراحل اولیه‌ی بارگذاری می‌باشد. این در حالی است که در نمونه‌های محصور شده با CFRP، پس از فعال شدن محصور شدگی، منحنی‌ها با شیب بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاهد ادامه یافته و به نقطه‌ی حداکثر خود می‌رسند. بر اساس شکل 5، شاخه‌ی دوم منحنی بار-کرنش در نمونه‌های تقویت شده به صورت تقریباً نزولی جلو رفته که بیانگر رفتار نرم شدگی کرنش و نیز محصورشدگی کم اثر برای این نمونه‌ها می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، علت کم اثر بودن محصورشدگی در این نمونه‌ها، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع است که منجر به توزیع غیر یکنواخت فشار محصورکننده روی محیط و پارگی زود هنگام کامپوزیت در گوشه‌ها می‌شود. در حالی که در نمونه‌ی تقویت شده با مقطع دایره‌ای، شاخه‌ی دوم منحنی بار-کرنش به صورت صعودی بوده که نشان می‌دهد رفتار این نمونه به صورت سخت شدگی کرنش می‌باشد و محصورشدگی به میزان کاملاً مؤثر و کافی در این نمونه تأمین شده است.



شکل 5: منحنی بار-کرنش ستون‌های بتن آرمه با مقطع مربعی

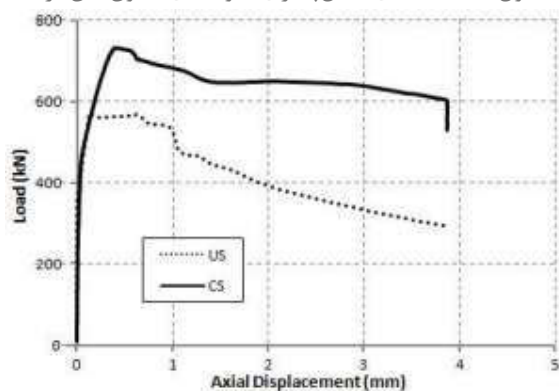


شکل 6: منحنی بار-کرنش ستون‌های بتن آرمه با مقطع دایره‌ای

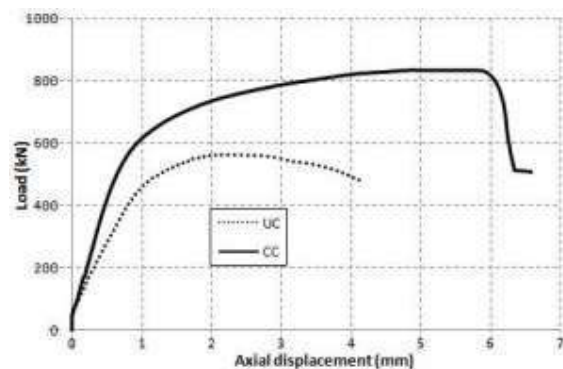
جهت مقایسه‌ی شکل‌پذیری نمونه‌های مختلف، از سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان که بیانگر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به عبارتی مقدار کار انجام‌شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد، استفاده شده است. بر این اساس، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان محوری،  $E_u$ ، تا نقطه‌ی گسیختگی برای نمونه‌های تقویت‌شده و تقویت نشده، با استفاده از نمودار شکل‌های 7 و 8 که به ترتیب مربوط به ستون‌های با مقطع مربعی و دایره‌ای می‌باشند، محاسبه شده و برای مقایسه بین نمونه‌های مختلف، در جدول 3 ارائه شده است. با مقایسه‌ی شاخص شکل‌پذیری،  $E_u$ ، همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، میزان افزایش شکل‌پذیری برای نمونه‌ی محصور شده با مقطع مربعی 54/3٪ و برای نمونه‌ی محصور شده با مقطع دایره‌ای به میزان 138/2٪، نسبت به نمونه‌های شاهد مربوطه می‌باشد. در اینجا هم، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع مربعی علت این اختلاف می‌باشد.

کد نمونه	شکل مقطع	تقویت خارجی	بار حداکثر (kN)	تغییر مکان محوری نهایی (mm)	انرژی جذب شده (j)
US	مربع	محصور نشده	571	1.05	1840
CS	مربع	محصور شده	732	3.87	2839
UC	دایره	محصور نشده	561	4.25	1958
CC	دایره	محصور شده	836	6.59	4664

جدول 3: مقایسه‌ی شکل‌پذیری نمونه‌های ستون بتن آرمه



شکل 7: منحنی بار-تغییر مکان محوری ستون‌های با مقطع مربعی



شکل 8: منحنی بار- تغییر مکان محوری ستون‌های با مقطع دایره‌ای

شکست نمونه‌های شاهد (UC و US) در میانه‌ی ارتفاع ستون اتفاق افتاده است. در حین بارگذاری این نمونه ابتدا ترک‌هایی در راستای ارتفاع ستون ایجاد شده و پس از آن با ریختن پوسته‌ی بتن و سپس کمانش آرماتورهای طولی بعد از رسیدن به نقطه‌ی باربری حداکثر، نمونه با رفتاری کاملاً نرم دچار شکست می‌شود. در نمونه‌ی تقویت‌شده با مقطع مربعی (CS)، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع و وجود اثر برندگی گوشه‌ها روی CFRP منجر به پارگی زود هنگام کامپوزیت در ناحیه‌ی گوشه شده و این موضوع باعث می‌شود که کامپوزیت مصرفی نتواند از تمام کارایی و ظرفیت کششی خود در محصورسازی نمونه استفاده کند. این در حالی است که در نمونه‌ی تقویت‌شده با مقطع دایره‌ای (CC)، پارگی کامپوزیت محصورکننده ناشی از تمرکز تنش نبوده و کامپوزیت مصرفی حداکثر کارایی خود را نشان داده است.

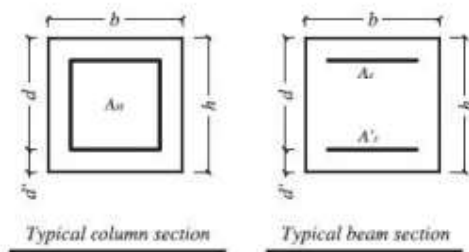
#### نتایج

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر شکل مقطع بر عملکرد محصورشدگی ناشی از کامپوزیت‌های FRP بود که جهت انجام آن 2 عدد ستون بتنی مسلح مربعی به ضلع 133 و ارتفاع 500 میلی‌متر و همچنین 2 عدد ستون بتن آرمه با مقطع دایره‌ای به قطر 150 میلی‌متر و ارتفاع 500 میلی‌متر مدنظر قرار گرفت؛ در هر گروه از نمونه‌ها، یک مورد از آن‌ها با کامپوزیت CFRP تقویت شدند و در نهایت همه ستون‌ها تحت بار محوری خالص قرار گرفتند. در این راستا نتایج حاصله به اختصار در زیر آورده شده‌اند:

- ستون‌های مسلح به میلگردهای طولی دارای شکستی نرم و غیر انفجاری هستند؛ البته شکل‌پذیری و ظرفیت باربری ستون‌های بتن آرمه که با کامپوزیت CFRP تقویت شده باشند در مقایسه با ستون‌های محصور نشده، افزایش می‌یابد.
- مود شکست در نمونه‌ی محصور شده با مقطع مربعی، به صورت پارگی CFRP در گوشه‌ی مقطع می‌باشد؛ این پدیده نشان‌دهنده‌ی تمرکز تنش در گوشه‌ی ستون می‌باشد.
- نمونه‌ی تقویت‌شده با مقطع مربعی نسبت به نمونه‌ی شاهد دارای افزایش ظرفیت باربری به میزان 28/2٪ می‌باشد. در حالی که میزان افزایش ظرفیت باربری در نمونه‌ی محصور شده با مقطع دایره‌ای نسبت به نمونه‌ی شاهد، 49/0٪ می‌باشد.
- در نمونه‌ی تقویت شده با مقطع مربعی، میزان افزایش شکل‌پذیری نسبت نمونه‌ی محصور نشده، 54/3٪ می‌باشد. این در حالی است که در نمونه‌ی محصور شده با مقطع دایره‌ای، شاهد افزایش شکل‌پذیری به میزان 138/2٪ نسبت به نمونه‌ی محصور نشده می‌باشیم.
- نرم‌شدگی کرنش در ستون مربعی محصور شده و سخت‌شدگی کرنش نیز در ستون دایره‌ای محصور شده دیده شد لذا این امر نشان‌دهنده‌ی مؤثرتر بودن محصورشدگی برای ستون با مقطع دایره‌ای می‌باشد.
- ارزیابی لرزه‌ای سازه

- با افزایش اهمیت ایمنی، ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها و پیشرفت در فعالیت‌های ساختمانی، تقویت، مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های موجود، بخش عظیمی از فعالیت‌های ساختمانی را به ویژه در کشورهای پیشرفته شامل می‌شود. ضعف در طراحی و اجرای سازه، تغییر کاربری و افزایش بارگذاری و عملکرد ضعیف سازه‌های بتن آرمه به دلیل افزایش سن از دلایل نیاز به بهسازی و تقویت سازه‌های بتن آرمه می‌باشند. در این راستا بسته به مقاومت لرزه‌ای مورد نظر از روش‌های مقاوم‌سازی بسیاری مانند جایگزینی قطعات جداشدنی، اضافه کردن ورق‌های فولادی روی سطوح، استفاده از ژاکت‌های بتن مسلح و یا فلزی، تزریق رزین، بتن پاشی، بکارگیری سیستم‌های کامپوزیت FRP، استفاده از پیش تنیدگی خارجی و ... استفاده می‌شود.
- به دنبال زمین‌لرزه‌های بزرگ در سال‌های 1989 و 1994 نیاز به کنترل عملکرد سازه و کاهش خسارت موجب توجه به روش طراحی بر اساس عملکرد (PBD) به عنوان روشی که مبتنی بر پذیرش تغییر مکان و شکل‌پذیری موردنظر باشد، شد. مبنای این روش این است که طراحان بتوانند سازه‌ای طراحی کنند که عملکردشان قابل پیش‌بینی بوده و همچنین مشارکت کارفرما در انتخاب میزان خطرپذیری در طرح مورد نظر در سطوح مختلف زمین‌لرزه‌ها وجود داشته باشد. با توجه به آیین‌نامه‌ها، طراحی اعضای سازه‌ای باید به گونه‌ای باشد که بتوانند نیروهای وارده را با حاشیه اطمینان مناسبی که بستگی به روش طراحی دارد تحمل کنند. به‌طور کلی در طراحی ساختمان‌ها بر اساس عملکرد، چهار سطح عملکرد تعریف شده که شامل: سطوح قابل‌استفاده، بهره‌برداری فوری، ایمنی جانی و جلوگیری از فروریزش می‌باشند.
- در سال‌های اخیر استفاده از الیاف پلیمر (FRP) در بهسازی ساختمان‌های بتن مسلح رواج یافته است، درباره‌ی مزایای ذاتی (FRP) در مقایسه با سایر روش‌های سنتی مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های بتن آرمه می‌توان به مقاومت کششی بالا، وزن مخصوص کم، مقاومت بالا در برابر خوردگی و نصب سریع و آسان اشاره نمود.
- مطالعات و تحقیقات بسیاری در مورد رفتار و مشخصات الیاف FRP انجام شده است. بررسی‌هایی نیز درباره یک سازه بتن آرمه ترمیم شده با الیاف کربن (CFRP) در مقیاس کامل انجام شده که نتایج تجربی به اثبات وجود یک ظرفیت جابجایی بزرگ بدون کاهش قدرت در ساختار تقویت‌شده پس از استفاده از FRP در مفاصل تیر به ستون و دیوار اشاره دارند، علاوه بر این اتلاف انرژی نسبت به ساختار اصلی تقریباً باقی می‌ماند، همچنین کاهش تغییر شکل دیوار برشی را در طول آزمایش با توجه به حضور ورقه‌های CFRP در ارتفاع مشاهده نمودند.
- در ادامه به مقایسه اثرات CFRP و GFRP ورق‌های کامپوزیت در محل‌های مستعد تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر و ستون‌ها به منظور استحکام بخش خمشی در وجوه فوقانی و تحتانی مقاطع به صورت طولی و همچنین فیبرهای موازی عمود بر آن‌ها پرداخته شده است. ساختمان مورد مطالعه یک سازه 8 طبقه بتن آرمه قاب خمشی بوده که به نمایندگی از ساختمان یکی از قاب‌های وسط آن انتخاب شده و رفتار لرزه‌ای آن با استفاده از تحلیل غیرخطی پوش‌آور مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این مفاصل پلاستیک خمشی در دو انتهای تیرها و ستون‌ها با ویژگی‌های غیرخطی سازه اجرا گردید و تجزیه تحلیل سازه نیز در SAP2000 به روش المان محدود انجام شد.
- تحقیقات
- اگر چه مطالعات متعددی در بهبود عملکرد و ظرفیت اعضای تقویت‌شده صورت گرفته ولی رفتار کلی سازه‌های بتنی مجهز به FRP هنوز هم نیاز به شرح و بسط دارد، بایستی به این نکته اشاره نمود که فلسفه طراحی تیر ضعیف ستون قوی هنوز در برخی از آیین‌نامه‌ها مانند ACI318 به تصویب نرسیده است.
- شرح و طراحی قاب اصلی

- ساختمان 8 طبقه مورد نظر دارای قاب خمشی منظم بتن آرمه مقاوم‌سازی شده با شکل‌پذیری متوسط بود که در آن از اثرات پیچشی نسبت داده شده به بارهای لرزه‌ای صرف‌نظر گردید و به نمایندگی از آن یکی از قاب‌های بتن مسلح وسط آن انتخاب گردید، قاب انتخاب شده شامل سه دهانه 5 متری و 8 طبقه با ارتفاع 2 متر برای هر طبقه بوده که طراحی آن با پیروی از مقررات آیین‌نامه ACI318-02 بوده و بارهای لرزه‌ای نیز مطابق با مفاد آیین‌نامه لرزه‌ای ایران که مشابه UBC1994 می‌باشد، تعیین شد. برش پایه طراحی به این شکل محاسبه گردید که به نمایندگی از یک خط لرزه‌خیزی بالا شتاب مبنای طرح برابر 0.3 و خاک نوع فرض شد. اعمال بارهای گرانشی علاوه بر وزن تیرها 30 KN/m به عنوان بار مرده و 10 KN/m نیز به عنوان بار زنده بوده، همچنین مقاومت فشاری بتن برابر 25 Mpa و تنش تسلیم آرماتورها نیز برابر 420 Mpa در نظر گرفته شد. مدل‌سازی و تجزیه تحلیل سازه نیز توسط SAP2000 انجام شد و زمان تناوب سازه هم به مقدار 1.28 s محاسبه گردید. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است در ستون‌ها آرماتورها در اطراف و در تیرها نیز در قسمت فوقانی و تحتانی آن گسترده شده است.



• شکل 1: توزیع آرماتورهای طولی در مقطع تیرها و ستون‌ها

- **تجزیه و تحلیل پوش آور از قاب اصلی**
- با توجه به رفتار غیر الاستیک سازه تحت حرکات شدید زمین به ناچار بایستی از تحلیل‌های غیرخطی سازه استفاده نمود، به طور کلی روش‌های استاتیکی غیرخطی تجزیه تحلیل پوش آور و دینامیکی غیرخطی تجزیه تحلیل تاریخچه زمانی را شامل می‌شوند. در تحلیل پوش آور با افزایش یکنواخت یک‌بار جانبی در ادامه بار گرانشی از پیش تعریف شده بهره گرفته و از مکانیسم شروع و فروپاشی مفاصل پلاستیک استفاده می‌شود. با ارائه یک مدل‌سازی عددی دقیق، تعریف دقیق خواص غیرخطی از اجزاء ساختاری و انتخاب یک مجموعه مناسب از سوابق حرکات زمین تجزیه تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از پاسخ لرزه‌ای سازه ارائه دهد، با این حال در محدوده مطالعه حاضر تحلیل پوش آور می‌تواند یک برآورد خوب از پاسخ لرزه‌ای سازه نسبت به تحلیل تاریخچه زمانی ارائه دهد. در این بخش نتایج حاصل از تحلیل پوش آور از قاب اصلی و تقویت‌شده ارائه شده است، رفتار غیر الاستیک هر عضو از تیر و ستون‌ها منجر به رفتاری پلاستیک و تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضاء می‌شود. پس از تأیید مفروضات و نتایج حاصل از تجزیه تحلیل غیرخطی، تجزیه تحلیل پوش آور از قاب مدنظر انجام شده و برش پایه در مقابل جابجایی بام به‌عنوان منحنی ظرفیت سازه ارائه شده است.

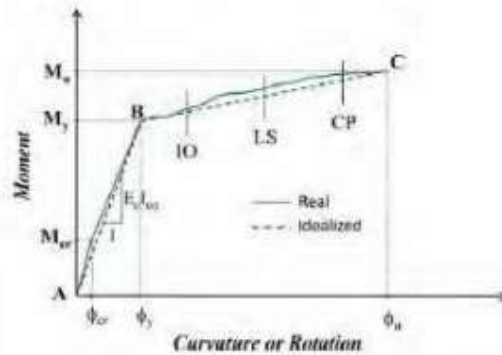
#### • تعیین خواص مفاصل پلاستیک

- در تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن آرمه با استفاده از تخصیص مفاصل پلاستیک نیاز به تعیین خواص غیر الاستیک هریک از اعضاء ساختاری بر اساس ضوابط نیرو کنترل و یا تغییر شکل کنترل می‌باشد، در این روش برای هر درجه آزادی می‌توان یک مفصل پلاستیک اختصاص داد. برای تجزیه تحلیل جامع غیرخطی توجه به شکست برشی در اعضاء ضروری است، باین‌حال برخی از مطالعات گذشته گزارش کرده‌اند برای



ساختمان‌های بتن آرمه تحت مسلح تقاضای ظرفیت برشی به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از ظرفیت برشی در تیرها و ستون‌ها بوده و عملاً هیچ شکست برشی رخ نمی‌دهد.

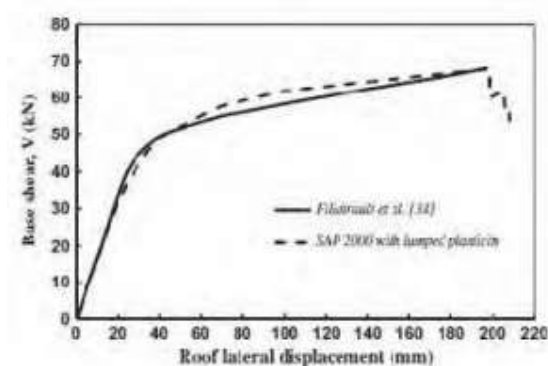
- بنابراین در این مطالعه تنها رفتار غیر الاستیک خمشی اعضاء در انتهای مستعد ابتلا به رفتار غیر الاستیک آن‌ها به‌صورت مفاصل پلاستیک در نظر گرفته شدند. با توجه به خواص مقاطع جزئیات آرماتور و بار محوری ثابت بوده بطوریکه بار محوری در ستون‌ها از مجموع 1.1 برابر بارهای مرده بعلاوه 0.275 برابر بار زنده (طبق توصیه آیین‌نامه زلزله ایران) و بار محوری تیرها به دلیل نیروهای گرانشی مدنظر ناچیز و در حد صفر در نظر گرفته شد.
- مدل بتنی در نظر گرفته‌شده طبق مدل ارائه شده توسط ماندر و همکاران طبق یک مدل دوخطی ایده‌آل با سخت‌شدگی برای فولاد در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل 2 منحنی دوخطی ایده‌آل همراه با سطوح عملکرد مختلف برای یک تیر بتن آرمه معمولی نمایش داده شده است نقطه B نمایانگر تنش تسلیم فولاد و نقطه C نیز نمایانگر تنش نهایی و لحظه گسیختگی می‌باشد.



شکل 2: منحنی ایده‌آل برای یک مفصل پلاستیک خمشی

- در این مطالعه طول مفصل برابر نصف بعد مقطع انتخاب گردیده است. همچنین در رابطه با سطوح عملکرد مختلف طبق تعاریف آیین‌نامه FEMA-356 سطح عملکرد IO معرف سطح قابلیت استفاده بی‌وقفه، LS معرف سطح ایمنی جانی و CP نیز معرف سطح آستانه فروریزش می‌باشد.
- تأیید نتایج غیر خطی**
- از یکی از تحقیقات توسط فیلیاترات انجام شده در این زمینه مفروضات و مدل ارائه شده یک قاب شکل‌پذیر در جهت تعیین خواص مفصل پلاستیک و ارائه نتایج پوش آور، در نظر قرار گرفت. عملکرد لرزه‌ای قاب با استفاده از آزمون جدول لرزشی موردبررسی قرار گرفت و نتایج آن نیز در تجزیه و تحلیل غیرخطی بر اساس مفاهیم گسترش پلاستیک تأیید گردید. سازه مورد آزمایش با توجه به مفاد آیین‌نامه ملی ساختمان کانادا و همچنین استاندارد بتن کانادا طراحی و در مقیاس کاهش یافت، در سازه مدنظر بخشی از سیستم باربر جانبی در دو طبقه (با ارتفاع 1.5 متر برای هر کدام) و همچنین دو دهانه (هر دهانه 2.5 متر) فرض شد.
- قاب شکل‌پذیر مربوطه با جزئیات کامل لرزه‌ای به شکل مستطیل با قلاب استاندارد 135 درجه و با فواصل 30 میلی‌متری از مرکز بحرانی اتصالات تیرها، ستون‌ها و مفاصل ساخته شد. همچنین در ساخت مدل عددی در SAP2000 نیز توزیع بارهای جانبی و گرانشی نیز مطابق با مدل فیلیاترات ساخته شد. تعیین خواص مفاصل پلاستیک المان‌های سازه در مدل مفروض بر اساس موارد ذکر داده شده برای بتن و فولاد در مطالعه حاضر بود. اگرچه خواص واقعی مواد از آزمون کشش بر روی آرماتورهای تقویت و آزمون فشاری بر استوانه‌های بتنی در نظر گرفته شد. در شکل 5 منحنی ظرفیت (برش پایه-جابجایی بام) استخراج‌شده از تحلیل غیرخطی پوش آور مطالعه حاضر با مدل ساخته‌شده توسط فیلیاترات مقایسه شده است، با وجود

برخی اختلافات دو منحنی بار-تغییر مکان به خصوص در شرایط نقطه شکست توافقی خوبی داشته و قابلیت اطمینان از مفروضات را جهت توصیف جزئیات مفاصل پلاستیک نشان می‌دهند.



شکل 3: مقایسه منحنی پوش آور و قاب شکل پذیر

### نتایج پوش آوری از قاب اصلی

- با اعتبار نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل، تحلیل پوش آور غیر خطی قاب برای بدست آوردن مجموع ظرفیت مقاوم و جابجایی جانبی سازه بررسی و انجام شد، به منظور ارائه پاسخ لرزه‌های دقیق‌تر سازه بایستی تجزیه تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن اثر بار گرانشی احتمالی صورت پذیرد، بر این اساس طبق استاندارد FEMA-356 برابر 1.1 بار مرده به علاوه 0.275 بار زنده در طول تحلیل پوش آور لحاظ گردیده است.
- با توجه به اینکه در ارزیابی لرزه‌های سازه مشخصات نیروی جانبی بایستی نشان داده شود، در مقاله حاضر از توزیع مثلثی وارونه در طول ارتفاع به عنوان الگوی بار جانبی استفاده می‌شود، با توجه به مطالعه تطبیقی انجام شده توسط موافی و الناشای این الگو در مقایسه با یک توزیع یکنواخت یک برآورد بهتر از منحنی ظرفیت و پاسخ لرزه‌ای ارائه می‌دهد، علاوه بر این با اینکه توزیع مثلثی وارونه عملی‌تر از توزیع چند وجهی است، نتایج مشابهی دارند. شایان ذکر است الگوی بار انتخابی شبیه توزیع بار جانبی مورد استفاده برای طراحی لرزه‌های سازه در نظر گرفته شده در استاندارد زلزله ایران می‌باشد، همچنین اثرات ثانویه بارهای محوری در تغییر شکل اعضاء (P\_D effects) نیز در تحلیل غیرخطی در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به ترک خوردگی خمشی اعضاء سختی آن‌ها در طول بارگذاری کاهش می‌یابد، این کاهش سختی در تحلیل غیرخطی با معرفی معادله ممان اینرسی  $I_{eq}$  در رابطه (1) ذکر شده در نظر گرفته می‌شود.

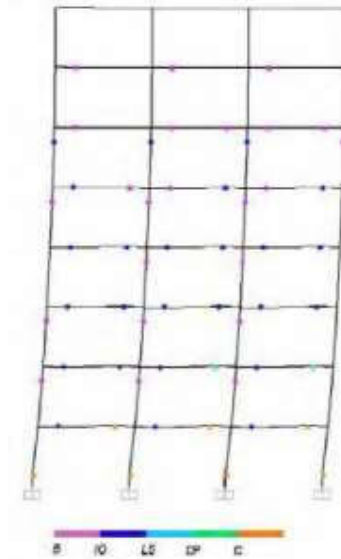
$$I_{eq} = \frac{My}{E\epsilon\phi_y} \quad , \quad Ec = 4700 \cdot \sqrt{f'c}$$

• رابطه 1

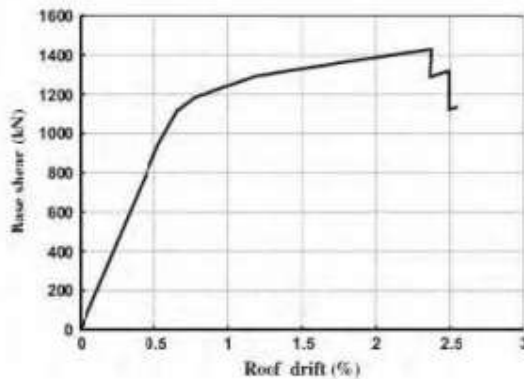
- تعیین خواص سختی اعضاء به نسبت ممان اینرسی ( $I_{eq}$ ) به ممان اینرسی ناخالص ( $I_g$ ) آن‌ها در جدول 1 آورده شده است.

Member type	Section	Story no.	Pos.	$E_c I_{eq}$ (kN m <sup>2</sup> )	$I_{eq}/I_g$
Columns	A-A	1	Interior	1.27 E5	0.50
			Exterior	1.21 E5	0.48
		2	Interior	1.26 E5	0.49
			Exterior	1.19 E5	0.47
	B-B	3	Interior	9.22 E4	0.36
			Exterior	8.27 E4	0.33
		4	Interior	8.89 E4	0.35
			Exterior	8.01 E4	0.32
	C-C	5	Interior	4.45 E4	0.36
			Exterior	4.06 E4	0.33
		6	Interior	4.25 E4	0.35
			Exterior	3.89 E4	0.32
		7	Interior	4.06 E4	0.33
			Exterior	3.72 E4	0.3
		8	Interior	3.72 E4	0.3
			Exterior	3.54 E4	0.29
Mean value for columns					0.37
Beams	D-D	1-4		6.22 E4	0.51
	E-E	5-6		5.18 E4	0.42
	F-F	7-8		3.81 E4	0.31
Mean value for beams					0.41

- جدول 1: جزئیات سختی برای تجزیه و تحلیل غیرخطی قاب
- همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌گردد، با وجود مقررات طراحی متوسط بر اساس استاندارد ACI318-02 فلسفه طراحی تیر ضعیف ستون قوی به خوبی تشکیل نشده و نتایج تحلیل غیرخطی از قاب یک مکانیسم حرکت یک‌طرفه را برای سازه نشان می‌دهد و همان‌طور که مشهود است ستون‌ها از اواسط طبقه از رفتار کششی شدید رنج می‌برند. در شکل 5 نیز منحنی ظرفیت سازه (برش پایه در مقابل جابجایی بام) نمایش داده شده است.



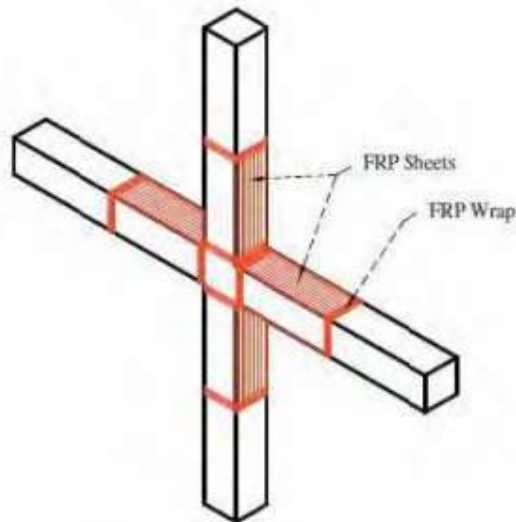
- شکل 4: الگوی مفاصل و سطح آسیب سازه اصلی



• شکل 5: منحنی ظرفیت (پوش‌آور) سازه اصلی

• **طراحی مدل مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت FRP**

- با هدف افزایش مقاومت جانبی کل سازه تصمیم به تقویت سازه در مناطق مستعد رفتار غیر الاستیک گرفته شد، شکل 8 نمایانگر یک تصویر شماتیک از پیکربندی مقاوم‌سازی در اطراف یک اتصال داخلی معمولی است، بهره‌وری از این روش مقاوم‌سازی FRP در جابجایی مفصل پلاستیک از طرف ستون به سمت تیر مؤثر است. با این حال قابلیت مقاوم‌سازی FRP به نقل مکان غیرخطی مفصل به شدت وابسته به طول ورق کامپوزیت می‌باشد، اگر این طول بیش از حد تجاوز کند (معمولاً در اطراف عمق تیر)، مفصل پلاستیک غیرخطی را در محلی مشابه اتصال اصلی تیر و ستون با قدرت عملکرد بالاتر خواهیم داشت. در مطالعه حاضر طول ورق‌های کامپوزیت در تیر و ستون‌ها به منظور از بین بردن احتمال جابجایی مفصل پلاستیک به قدر لازم بلند در نظر گرفته شده است.
- پدیده دیباندینگ از بستر بتنی در ورق‌های کامپوزیت FRP همواره یک موضوع نگران‌کننده است که بر روی پیوند خارجی ورق FRP در اعضای بتنی تقویت‌شده به این روش به خصوص در تقویت خمشی تأثیرگذار است. این مسئله ممکن است باعث خرابی زودرس در عضو گردد، برای غلبه بر این مشکل در سال‌های اخیر روش‌های متعددی ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق تجربی و روش نوآورانه مستوفی نژاد و محمودآبادی اشاره نمود. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که با ارائه شیارهای طولی با عمق کافی به‌طور کامل می‌توان با این پدیده مقابله نمود.



- شکل 6: تصویر شماتیک از پیکربندی مقاومسازی با استفاده از FRP
- به منظور مقایسه کارایی ورق‌های کامپوزیت CFRP و GFRP در تقویت خمشی سازه‌های بتن مسلح تصمیم گرفته شد هر دو ورق به کار گرفته شود، پاسخ لرزه‌های قاب‌های مجهز به ورق‌های CFRP و GFRP با قاب اصلی از نظر منحنی جانبی نیرو-جابجایی بررسی و الگوی مفاصل و رانش بین طبقات مقایسه گردید. به گزارش جدول 2 ویژگی‌های طراحی یک‌سویه کامپوزیت‌های CFRP و GFRP یکسان بود.

Composite	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain	Tensile modulus (MPa)	Thickness (mm)
CFRP	3900	0.0155	240,000	0.165
GFRP	3241	0.045	72,397	0.589

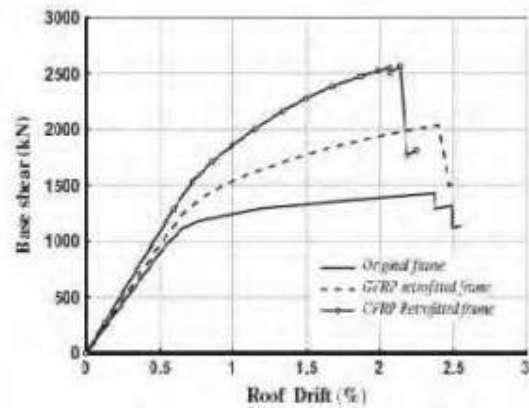
- **قاب مجهز به GFRP**
- به منظور ایجاد یک خرابی کمتر از عضو تقویت شده به کرنش نهایی بتن قبل از پارگی بتن نیاز است، تجزیه و تحلیل منحنی خمشی اولیه در تیرها ثابت کرد در دو طرف بالا و پایین آن‌ها نیاز به استفاده از ورق‌های کامپوزیت GFRP می‌باشد. با توجه به مفهوم طراحی بر اساس ظرفیت سازه‌ها در طراحی لرزه‌های مدرن ظرفیت خمشی ستون در هر اتصال باید بالاتر از جمع مقاومت خمشی تیرها جهت اعمال فلسفه تیر ضعیف ستون قوی باشد. از این رو ضخامت ورق‌های کامپوزیت در ستون‌ها با تیرها یکسان در نظر گرفته شد، به جز ستون طبقه پنجم و ششم (بخش C-C) که در آن چهار لایه از ورق کامپوزیت برای پیروی از مفهوم ظرفیت محاسبه شد. لازم به ذکر است تجزیه تحلیل پوش آور سیستم تقویت‌شده با استفاده از دو ورق کامپوزیت GFRP در تمام اعضاء قاب، یک مکانیسم یک‌طرفه با توجه به شکست مفصل پلاستیک ستون طبقه پنجم را نشان داد.
- به‌طور کلی تقویت خمشی اعضاء بتن آرمه با استفاده از FRP منجر به کاهش قابل توجه شکل‌پذیری می‌شود، با ارائه ساختارهای مجهز با ظرفیت اتلاف انرژی کافی استراتژی طراحی مقاومسازی به‌منظور افزایش مقاومت جانبی بدون از دست دادن قابل توجه ظرفیت جانبی طبقات و دریافت سازه بین طبقات انجام گردید. به دنبال این هدف مشخص شد که تقویت تیرها در طبقات بالا بطور قابل توجهی می‌تواند بر ظرفیت جابجایی و دریافت بین طبقات تأثیرگذار باشد.

- **قاب مجهز به CFRP**
- به منظور یک شرایط برابر برای مقایسه، ضخامت ورق‌های کامپوزیت در تیرهای قاب مجهز به CFRP به منظور یک شرایط برابر برای مقایسه، ضخامت ورق‌های کامپوزیت در تیرهای قاب مجهز به GFRP انتخاب گردیدند. به عنوان یک نتیجه و با در نظر گرفتن خواص مکانیکی ورق‌های موردنظر CFRP و GFRP، شش لایه از ورق‌های CFRP برای تیرها در تمام طبقات، به جز دو تیر آخر انتخاب شد.
- این پیکربندی تقویت یک نسبت دریافت یکسان را در بین طبقات با حفظ ظرفیت جابجایی جانبی کافی برای قاب تضمین نمود، به‌منظور تکریم فلسفه طراحی تیر ضعیف ستون قوی در قاب تقویت‌شده، مقدار مشابهی از کامپوزیت‌های مذکور در دو وجه کششی ستون‌ها نیز در تمام طبقات به کار گرفته شد. با این حال شبیه قاب تقویت‌شده به‌وسیله GFRP برای از بین بردن عملکرد نامطلوب ستون طبقه پنجم در تحلیل غیرخطی پوش آور اولیه از نه لایه CFRP جهت جبران ضعف ستون مذکور و همچنین برقراری رابطه تیر ضعیف ستون

قوی در طبقات پنجم و ششم استفاده گردید. نتایج غیرخطی با ارائه محصورشدگی بتن در ستون ظرفیت جابجایی جانبی بیشماری را تأیید نمود.

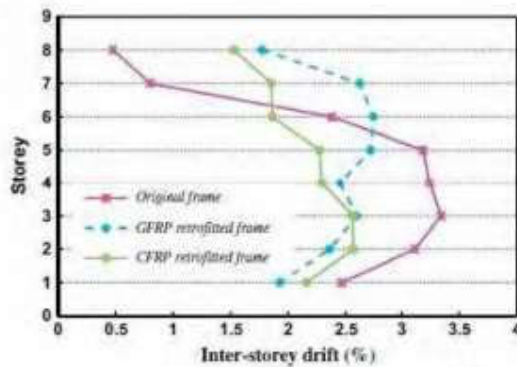
#### • بررسی نتایج بدست آمده از قاب

- تجزیه و تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب تقویت شده بر اساس پیکربندی‌های فوق افزایش قابل توجهی در مقاومت جانبی نشان داد، ضمن اینکه توجه ویژه به فلسفه طراحی تیر ضعیف ستون قوی در مقاوم‌سازی خشنود کننده بود. همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است ظرفیت تحمل بار با استفاده از ورق‌های CFRP افزایش 43٪ و یا ورق‌های CFRP افزایش 80٪ داشت، با این حال درحالیکه ظرفیت جابجایی جانبی تقریباً با قاب اصلی یکسان بود در دومی حدود 10٪ کاهش یافته بود که در مقابل افزایش قدرتی که کسب کرده بود قابل توجه نیست. لازم به ذکر است جهت افزایش جابجایی جانبی قاب مجهز به CFRP و یکسان نمودن آن با قاب اصلی می‌توانستیم تیرها در سه طبقه آخر بجای دوطبقه تقویت شده نماییم. با این حال این پیکربندی ممکن است به تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون‌ها از طبقه ششم ختم شود که از مفاهیم طراحی لرزهای مدرن پیروی نمی‌کند.

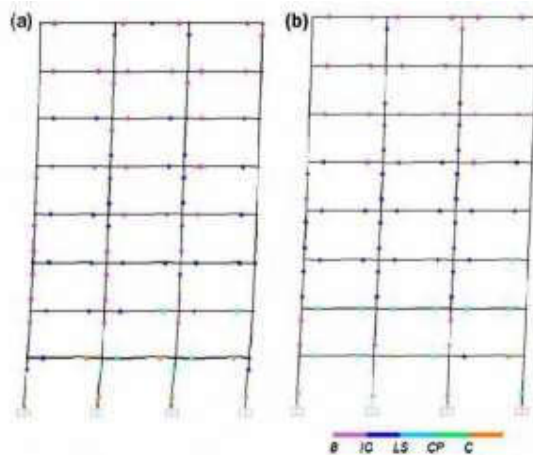


• شکل 7: مقایسه منحنی پوش‌آور قاب‌های اصلی و تقویت شده

- اگرچه تجزیه و تحلیل بخشی از اعضاء سازه کاهش قابل توجهی در منحنی شکل‌پذیری به ویژه برای CFRP داشت منحنی پوش‌آور یک اثر ناچیز در جابجایی ظرفیت به نمایش گذاشت، لازم به ذکر است گرچه پیکربندی متفاوت FRP ظرفیت جابجایی قاب را تغییر داد، قاب مجهز به CFRP ظرفیت حمل بار بیشتری نسبت به قاب مجهز با GFRP ارائه نمود.
- انتخاب تنظیمات طراحی مقاوم‌سازی بر اساس یک فرض توزیع یکنواخت دررفت برای همه طبقات بود، این مورد می‌تواند مانعی برای تغییر شکل یک طبقه خاص از قاب انتخاب شده در سازه منظم مدنظر ایجاد نماید. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود جابجایی نسبی طبقات مختلف در قاب تقویت‌شده تقریباً یکسان بوده و در محدوده 1.5٪ تا 2.5٪ نسبت به قاب اصلی که در محدوده 0.5٪ تا 3.5٪ می‌باشد، گزارش شده است. در مقایسه دررفت بین قاب‌های تقویت‌شده با CFRP و GFRP به رغم استفاده از ورق‌های کامپوزیت بیشتر در ستون طبقه پنجم و ششم مقادیر بالاتری در طبقات بالاتر مشاهده می‌شود.



- شکل 8: مقایسه توزیع دررفت طبقات بین قاب های اصلی و تقویت شده
- در شکل 9 نیز الگوی تخصیص مفاصل قاب تقویت شده آورده شده است، در مقایسه با قاب اصلی بیشتر تیرها در طبقات بالا متحمل رفتار غیر الاستیک شده اند، که از این مورد می توان نتیجه گرفت پیکربندی تقویت سازه با ورق های کامپوزیت به خوبی طراحی شده و می تواند برای افزایش مقاومت تمام اعضاء جهت افزایش مقاومت جانبی سازه ارائه گردد.



- شکل 9: الگوی تخصیص مفاصل پلاستیک در قابهای تقویت شده (a) قاب مجهز به GFRP، (b) قاب مجهز به CFRP

### 8-1-1- مصالح پلیمری تقویت شده (FRP)

در سال های اخیر استفاده از مصالح پلیمری تقویت شده (FRP) به دلیل بهره برداری و کاربرد موفق آمیز در سراسر دنیا رواج یافته است. لذا به دلیل کاربرد پیشرفته این مصالح نیاز به مطالعات دقیق و شناخت خصوصیات ویژه این مصالح شامل مقاومت در برابر آتش سوزی، دوام مصالح در شرایط محیطی مختلف، مقاومت خستگی، چسبندگی مصالح بتنی و سایر خصوصیات آن ها احساس می شود. یکی از مشکلات موجود در سازه های بتن آرمه عامل خوردگی می باشد، محیط بازی بتن در ابتدا تا حد زیادی از ایجاد خوردگی فولاد جلوگیری می نماید و حتی در شرایط مساعد، بهره برداری و سرویس پذیری را در طول عمر سازه تضمین و از خوردگی فولاد ممانعت می نماید. اما در سازه هایی که در برابر شرایط محیطی مضر قرار دارند مانند سازه های دریایی، پل ها، سازه های در معرض حمله نمک ها و شرایط توأم رطوبت و دما و کلراید، غلبه شرایط اسیدی به محیط بازی بتن زمینه ی خوردگی فولاد را فراهم کرده و بهره برداری سازه با مشکل مواجه می شود. روش هایی جهت جلوگیری این خوردگی مانند استفاده از لایه جنس اپوکسی و یا ترکیبات خاص بتن استفاده می شود. با این وجود این روش ها نتوانستند به طور کامل از خوردگی میلگردها ممانعت نمایند. با

ورود مصالح کامپوزیتی که از ترکیب الیاف به عنوان فاز پراکنده و رزین‌هایی مانند اپوکسی و استرها به عنوان فاز پیوسته تولید می‌شوند و با نام FRP ها شناخته می‌شوند، به عنوان جایگزینی برای فولاد تقویت‌کننده در برخی شرایط در سازه‌های بتنی، پیشرفت چشمگیری در این زمینه ایجاد شد. خواص فوق‌العاده این مصالح که شامل غیر مغناطیسی بودن و مقاومت در برابر خوردگی از مشکلات مربوط به وجود خواص مغناطیسی و خوردگی مصالح تا حد زیادی کاسته شد. بعلاوه FRP ها خصوصیات مناسب دیگری مانند مقاومت کششی زیاد را دارا می‌باشند که از این جهت از این مصالح به عنوان تقویت‌کننده در بتن مسلح استفاده می‌شود. این الیاف‌ها شامل انواع الیاف کربن، شیشه، آرامید و بازالت می‌باشند که در این بین، الیاف‌های کربن و شیشه در صنعت ساخت‌وساز کاربرد دارند.

### 9-1-1- الیاف شیشه (GFRP)

**الیاف‌های شیشه** تارهای بسیار باریک از جنس شیشه با قطر ثابت (حدود 5 تا 25 میکرون) و طول نامحدود هستند. از الیاف شیشه در بالا بردن مقاومت کششی و تقویت کامپوزیت‌ها استفاده می‌گردد. این الیاف ظریف و خمش پذیر، عایق حرارت و ضد خوردگی می‌باشد. این الیاف برای ساخت و مقاوم‌سازی سازه‌ها بکار می‌روند به شکل مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل الیاف و ورق‌های GFRP، میلگردهای GFRP، مش‌های GFRP و پروفیل‌های GFRP می‌باشد. در ادامه به بررسی میلگردهای GFRP پرداخته‌ایم.

### میلگردهای (GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer)

**میلگردهای آجدار شیشه**، مصالحی کامپوزیتی هستند که از ترکیب الیاف شیشه و رزین پلیمری ساخته می‌شوند و مانند آرماتورهای فولادی نقش تقویت‌کننده بتن و ایجاد مقاومت و سختی اضافی برای بتن را دارند. همچنین خواص ضد خوردگی این میلگرد برای سازه‌های در معرض عوامل طبیعی مضر و نمک‌ها مناسب بوده و بعلاوه خاصیت غیر مغناطیسی میلگردهای کامپوزیت GFRP بکاربری آن‌ها در تجهیزات حساس مانند میدان‌های الکترومغناطیس و بخش‌های MRI بیمارستان‌ها می‌توان اشاره نمود. لازم به ذکر است که قیمت این میلگردها از سایر میلگردهای الیافی کمتر می‌باشد.

لذا در ادامه قصد داریم پس از بررسی خصوصیات اجزای تشکیل‌دهنده این مصالح و برخی آزمایشات استاندارد ارائه شده جهت تعیین خصوصیات آن را با وجه به استاندارد ACI به صورت مختصر بیان نموده و نتایج مطالعات صورت گرفته در تعیین خصوصیات این مصالح را ارائه نماییم.



### خصوصیات اجزاء تشکیل‌دهنده اصلی

الیاف شیشه در غالب چهار نوع تولید می‌شود که دو نوع عمده این الیاف که در صنعت تولید پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف FRP کاربرد دارند شیشه الکتریکی (E-glass) و شیشه سازه‌ای (S-glass) می‌باشند. دو نوع دیگر که عمومیت کمتری دارند، شیشه شیمیایی (C-glass) و شیشه مقاوم در شرایط قلیایی (AR-glass) می‌باشد. اقتصادی‌ترین و پرکاربردترین تقویت‌کننده‌ای که در تولید FRP مورد استفاده قرار می‌گیرد، الیاف شیشه از نوع E-glass است. این میلگرد خانواده‌ای از شیشه با ترکیب کلسیم آلومینو بروسلیکات و کمتر از 2٪ ترکیبات قلیایی می‌باشد. به دلیل



مقاومت کششی بالا و قیمت ارزان، بیش از 90٪ از الیاف شیشه را شامل می‌شود. همان‌گونه که از نام این الیاف مشخص است، این الیاف مقاومت الکتریکی خوبی دارند.

### رزین پلی‌استر

از به پرکاربردترین رزین‌هایی که در این مورد استفاده می‌شود، رزین پلی‌استر بوده که با توجه به فرمول شیمیایی خود می‌تواند پس از سخت شدن طیف وسیعی از خواص شامل نرمی و شکل‌پذیری تا سختی و تردی را در برگیرد. از مزایای خاص این رزین می‌توان به ویسکوزیته و قیمت پایین و زمان پخت کم اشاره نمود که به عنوان غیر سمی‌ترین نوع رزین شناخته شده است. هاردنر لازم برای پخت این رزین حدود 2 درصد بوده که در کارهای حجیم معمولاً از 1 درصد هاردنر استفاده می‌شود. از جمله مهم‌ترین معایب پلیمرها استر می‌توان به تغییر حجم‌های زیاد آن‌ها در طی فرایند پخت اشاره نمود.

### رزین ونیل استر

ونیل استر پخت شده در مقایسه با پلی‌استر پخت شده از شکل‌پذیری و سختی بالاتری برخوردار بوده و به لحاظ خصوصیات و کار با رزین تا حد زیادی همانند پلی‌استر می‌باشد. برخی از مزایای این رزین که می‌تواند تا حدودی قیمت بالاتر این رزین را در مقایسه با پلی‌استر جبران نماید، پایداری بالاتر، ساختار شیمیایی و مقاومت بیشتر نسبت به هیدرولیز و محیط‌های خورنده و خواص فیزیکی مناسب این رزین شامل مقاومت کششی، مقاومت به ضربه و خستگی می‌باشد. در جدول شماره 2 خصوصیات نمونه‌ای از این رزین ارائه شده است. جدول شماره 2: خصوصیات مکانیکی نمونه‌ای از رزین ونیل استر

نوع رزین	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	کرنش نهایی (%)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)
ونیل استر	1.14	8	76	2.9

### رزین اپوکسی

رزین‌های اپوکسی، خانواده‌ی بزرگی از مواد هستند که در مقایسه با سایر رزین‌ها، عملکرد مناسب‌تری دارند. رزین اپوکسی در صنعت هوا فضا به صورت گسترده، در مواردی که عملکرد مناسب در دماهای بالا یک فاکتور مهم در انتخاب مواد می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. رزین‌های اپوکسی عموماً نسبت به سایر رزین‌ها از خواص مکانیکی و پایداری شیمیایی و محیطی بالاتری برخوردار می‌باشند.

برخی از مزایای رزین‌های اپوکسی شامل موارد زیر است:

- نبودن یا کم بودن آزادسازی مواد فرار در طی
- جمع شدگی بسیار کم در فرآیند پخت شدگی
- مقاومت بسیار خوب در محیط‌های شیمیایی
- و قابلیت افزودن انواع زیادی از الیاف و فیلترها

قیمت بالای رزین، زمان سخت شدن زیاد و دشوار بودن کار کردن با آن از معایب اصلی این رزین است.

جدول شماره 2: خصوصیات مکانیکی نمونه‌ای از رزین ونیل استر

نوع رزین	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	کرنش نهایی (%)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)
ونیل استر	1.14	8	76	2.9

### 10-1-1- آزمایش های استاندارد در تعیین خصوصیات میلگردهای کامپوزیتی

#### آزمایش تعیین خصوصیات مقطع میلگردهای GFRP

از این روش برای تعیین سطح، قطر و محیط یک میلگرد استفاده می‌شود. با توجه به این که این میلگردها در فرم‌های مختلف شامل پوشش داده شده با ماسه، شیاردار، دارای سطح صاف و... تولید می‌شوند و از آن جهت که خصوصیات مقطع در طراحی اثر خواهد داشت، وجود آزمایشاتی که تعیین‌کننده خصوصیات مقطع این میلگردها باشد، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که از این روش تنها در تعیین خصوصیات میلگردهایی استفاده می‌شود که فاقد حباب‌های هوا باشد.

روش انجام آزمایش به این صورت می‌باشد که ابتدا طول هر نمونه سه بار و هر بار با چرخاندن نمونه به اندازه 120 درجه حول محور طولی آن اندازه‌گیری شده و طول نمونه برابر میانگین هر سه مقدار که به نزدیک‌ترین مقدار بالا یا پایین که ضریبی است از 0.1 میلی‌متر می‌باشد، رند می‌شود. پس از این مرحله فلز استوانه مندرج تا آنجا که نمونه به طور کامل درون آب یا اتانول قرار گیرد، پر شده و این مقدار اندازه‌گیری می‌شود. نمونه به آرامی در درون مایع قرار داده شده تا از ایجاد حباب در درون مایع جلوگیری گردد. با اندازه‌گیری مایع جابجا شده، حجم نمونه و با داشتن طول آن، سطح مقطع نمونه از تقسیم حجم نمونه بر طول آن بدست آمده و در ادامه قطر نمونه قابل محاسبه می‌باشد.

#### آزمایش تعیین خصوصیات کششی میلگردهای GFRP

این آزمایش جهت تعیین مقاومت کششی، مدول الاستیسیتر و تغییر طول نهایی میلگردهای FRP یا کابل‌های FRP به کار رفته در سازه‌های بتنی به کار گرفته می‌شود و روش انجام آزمایش به این صورت می‌باشد که ابتدا نمونه در ماشین آزمایش با ملاحظات و دقت لازم به جهت گیرش مناسب و با توجه به توضیحات دستگاه قرار گرفته و چند ثانیه قبل از اعمال بار اندازه‌گیرها توسط سیستم اندازه‌گیری شروع می‌شود و لازم است سرعت اعمال بار یا جابجایی به صورتی باشد که نمونه پس از گذر زمانی در حدود 1 تا 10 ثانیه شکسته شود. بار اعمالی لازم است تا زمان شکست نمونه اندازه‌گیری شود و همچنین لازم است اندازه‌گیری کرنش تا زمان رسیدن به 50٪ از ظرفیت کششی و یا تا ظرفیت کششی تضمین شده، هر کدام که بیشتر بود انجام شود. پس از انجام آزمایش و برداشتهای لازم، می‌توان نمودار نیرو و جابجایی و با داشتن سطح مقطع نمونه می‌توان نمودار تنش و کرنش مصالح را رسم نمود.

#### آزمایش تعیین مقاومت پیوستگی میلگرد با بتن به کمک کشش میلگرد

در این آزمایش یک نمونه از میلگرد مورد نظر در مکعبی بتنی با ابعاد 200 میلی‌متر مطابق تصویر شماره 1 قرار می‌گیرد. این آزمایش برای تعیین مقامت پیوستگی بتن و میلگردهای GFRP به کار می‌رود و علاوه بر آن از این آزمایش در انجام کارهای پژوهشی، شامل سنجش اثر عوامل محیطی در طولانی مدت و تعیین عوامل اثرگذار بر مقاومت پیوستگی بهره گرفته می‌شود. با این وصف در تعیین پیوستگی میلگرد با بتن با توجه به اثرگذار بودن خصوصیات بتن بر نتایج آزمایش، لازم است طرح اختلاط بتن به نحوی خاص انجام گردد. روش انجام آزمایش به این صورت می‌باشد که پس از گیرش میلگرد در نمونه مکعبی و بعد از گذشت زمان مشخص و تحت شرایط و با تجهیزات خاص نمونه میلگرد از درون بتن بیرون کشیده می‌شود و در این صورت با داشتن نیرو و سطح تماس میلگرد با بتن می‌توان مقاومت پیوستگی را مشخص نمود.

#### آزمایش اندازه‌گیری مقاومت برشی میلگردهای GFRP

این آزمایش به جهت اندازه‌گیری مقاومت برشی میلگرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این آزمایش می‌توان برای میلگردهای با قطر متفاوت و انواع مختلف آن بهره گرفت و می‌تواند کاربردهای دیگری شامل کنترل کیفیت، تضمین

کیفیت، تعیین مشخصات مصالح و ... را داشته باشد. در این آزمایش نمونه میلگرد مطابق تصویر شماره 2 بین شیار تیغه‌هایی با خصوصیات خاص قرار گرفته و تا زمان شکست برشی در میلگرد با شرایط خاص تحت اعمال بار قرار



می‌گیرد.

تصویر شماره (2)

### آزمایش اندازه‌گیری مقاومت میلگردهای GFRP در محیط بازی

این آزمایش به این صورت انجام می‌شود که نمونه‌ای از میلگرد تحت نیروی کششی ثابت در معرض محیط بازی قرار می‌گیرد. سپس بعد از مدت معین از محلول خارج‌شده و تغییرات مقاومت کششی بررسی می‌گردد که این آزمایش ممکن است به روش‌های زیر انجام شود :

حالت الف : در این حالت نمونه مورد نظر بدون در معرض قرار گرفتن نیروی کششی تنها در درون محلول بازی قرار می‌گیرد. در این صورت پارامترهای قابل کنترل PH محلول، دمای محلول، و زمان قرارگیری نمونه در درون محلول می‌باشد. لازم به ذکر است که در این حالت درصد کاهش وزن میلگرد در اثر خوردگی نیز اندازه‌گیری می‌شود.

حالت ب : در این حالت نمونه تحت نیروی کششی ثابت در درون محلول قرار می‌گیرد. در این حالت پارامترهای قابل کنترل مقدار نیروی ثابت PH محلول، دمای محلول و مدت‌زمان قرارگیری نمونه در محلول می‌باشد.

حالت ج : در این حالت نمونه میلگرد تحت بار کششی ثابت در درون بتن مرطوب قرار می‌گیرد. پارامترهای قابل کنترل در این آزمایش میزان نیروی کششی ثابت، PH محلول، دمای محلول و مدت زمان قرارگیری نمونه در درون بتن است. از این آزمایش برای تعیین مقاومت در محیط بازی، کنترل کیفیت، تحقیق و بهبود کیفیت و از نتایج آن گاهاً در انجام تحلیل‌ها و طراحی‌ها استفاده می‌شود. نتایج اولیه این آزمایش بیان‌کننده میزان تغییرات جرمی و تغییرات مقاومت کششی میلگردها است که فاکتورهای مهمی در کاربرد این مصالح به حساب می‌آیند.

در حالت‌های ب و ج که نمونه تحت تنش ثابت قرار می‌گیرد، مقدار این تنش ثابت باید برابر جمع تنش حاصل بار مرده و آن قسمت از بار زنده که ثابت است باشد که البته از تنش‌های بالاتر می‌توان به عنوان عامل شتاب‌دهنده به آزمایش استفاده نمود.

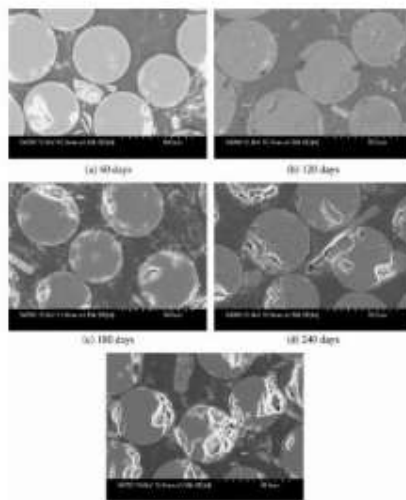
### 11-1-1- خصوصیات کششی میلگردهای GFRP

خصوصیات کششی مصالح تقویت‌کننده مهم‌ترین و دلیل اصلی بهره‌گیری از این مصالح در طراحی سازه‌های بتنی می‌باشد. از این‌رو تعیین حد نهایی مقاومت کششی و مقاومت تضمین‌شده این نوع میلگردها جهت بکارگیری در محاسبات و طراحی‌ها، کنترل کیفیت و بهینه‌سازی‌ها ضروری به نظر می‌رسد. عوامل مختلفی بر خصوصیات کششی میلگردهای GFRP اثرگذار می‌باشند که از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به نوع الیاف و میزان این الیاف که به‌صورت درصد حجم الیاف بر حجم میلگرد در واحد طول تعریف می‌شود، اشاره نمود. عوامل دیگری همچون فرایند تولید میلگردها، نحوه کنترل کیفیت و میزان پخت رزین نیز بر عملکرد کششی میلگردها اثرگذار خواهد بود.

با توجه به عوامل اثرگذار طی فرآیند ساخت بر عملکرد میلگردها، وجود تفاوت‌هایی در مقاومت نهایی میلگردهای تولیدشده‌ی شرکت‌های مختلف اجتناب ناپذیر می‌باشد.

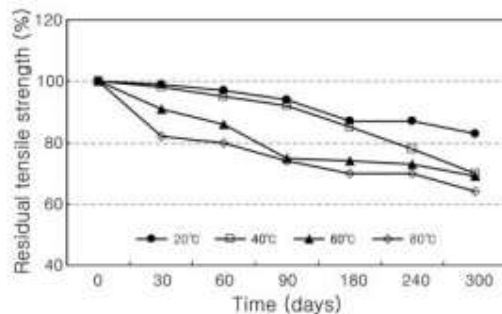
### اثر محیط بازی و اسیدی بر عملکرد میلگردهای GFRP

مطالعات انجام گرفته حاکی از این مسئله می‌باشد که فرایند هیدراتاسیون اجزای سازنده میلگردهای کامپوزیت شیشه در شرایط بازی با سرعت بیشتری انجام خواهد شد که همین مسئله باعث تمرکز پژوهش‌های زیادی در این زمینه گردیده است. رزین‌ها علاوه بر کمک به انتقال تنش بین الیاف، به دلیل مقاومت بیشتر آن‌ها در شرایط محیطی نسبت به الیاف، به عنوان محافظ الیاف نیز ایفای نقش می‌نمایند. در حالتی که میلگردهای GFRP به عنوان تقویت‌کننده در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، محیط بازی ایجاد شده در فرایند تخریب این مصالح نقش خواهد داشت، که در غالب تحقیقات به جهت تسریع در فرایند تخریب از محلول‌های با PH و دمایی بسیار بالاتر از شرایط بتن استفاده می‌شود. در تصویر شماره 3 تصویری میکروسکوپی از روند تخریب مقطع میلگردها در دمای 20 درجه نمایش داده شده است.



تصویر شماره 3: روند تخریب کامپوزیت GFRP در محیط بازی در دمای 20 درجه سانتی گراد

پس از انجام آزمایشات بر نمونه‌ای از میلگردهای FRP با الیاف شیشه و رزین ونیل استر و در محلول قلیایی با PH برابر 12.6، نتایج آزمایشات را به صورت نموداری که روند کاهش مقاومت کششی را در طول زمان و در دماهای مختلف نمایش می‌داد و در تصویر شماره 4 ارائه گردیده است، نمایش دادند.



تصویر شماره 4: روند کاهش مقاومت کششی میلگردهای GFRP در محلول قلیایی و در دماهای متفاوت

با بررسی اثر محیط قلیایی بر مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد نشان داده شد که با گذر زمان مقاومت پیوستگی در محیط قلیایی افزایش می‌یابد ولی این افزایش کمتر از حالتی است که نمونه در مجاورت آب قرار دارد. باین حال در مطالعات دیگری اثر مجاورت با آب بر مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد به صورت اثر منفی نشان داده شده است.

## نتیجه گیری

با در نظر گرفتن مطالب و آزمایشات مذکور و آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتنی که به طور خاص روش‌های طراحی به کمک مصالح FRP را ارائه می‌نمایند، به نظر می‌رسد که با توجه به ضعف فولاد در پایداری در محیط‌های اسیدی و خورنده، استفاده از میلگردهای GFRP در ساخت سازه‌های تحت شرایط محیطی شدید سودمند می‌باشد. در حال حاضر سطح اطلاعات در زمینه بکارگیری این مصالح و خواص مناسب مقاومتی، ضد خوردگی و عایق بودن آنان به نحوی می‌باشد که با اطمینان قابل قبولی می‌توان از این مصالح در طراحی سازه‌ها استفاده نمود. باین حال با توجه به عملکرد ترد این مصالح و فرآیند تولید این مصالح، لازم است در هر پروژه به طور دقیق مسئله ارزش بکارگیری این مصالح مورد بررسی قرار گیرد.

### 12-1-1- بتن الیافی

با گذشت زمان و افزایش جمعیت دنیا نیاز به پیشرفت در زمینه ساخت‌وساز، نگهداری و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و استفاده از تکنولوژی‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. علاوه بر این لزوم ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به دلیل افزایش لرزه‌خیزی کشورهای دنیا بیشتر احساس می‌شود. از جمله تکنولوژی‌های نوین که جایگاه ویژه‌ای در ساخت‌وساز به خود اختصاص داده، افزودنی‌های بتن و الیاف تقویت‌کننده در غالب بتن الیافی می‌باشد. استفاده از افزودنی‌های بتن باعث بهبود خواص مطلوب بتن، همچون مقاومت آن می‌گردد و در بعضی موارد با کاهش وزن بتن، مصالح بسیار سبکی را فرا راه مهندسی بنا قرار می‌دهد.

### 13-1-1- (FRC) FIBER REINFORCED CONCRETE

بتن الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت است که با بکارگیری الیاف تقویت‌کننده داخل مخلوط بتن، مقاومت کششی فوق‌العاده افزایش می‌یابد. این ترکیب کامپوزیتی، یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده شکل‌پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پرتان را فراهم می‌آورد. بتن الیافی از قابلیت جذب انرژی بالایی نیز برخوردار است و تحت اثر بارهای ضربه‌ای به راحتی از هم پاشیده نمی‌شود. شاهد تاریخی این فن‌آوری، کاربرد کاه‌گل در بناهای ساختمان است. در واقع بتن الیافی نوع پیشرفته این تکنولوژی می‌باشد که الیاف طبیعی و مصنوعی جدید، جانشین کاه و سیمان جانشین گل بکار رفته در کاه‌گل شده است.

بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل‌پذیری بالا، مقاومت فوق‌العاده، قابلیت جذب انرژی و پایداری در برابر ترک خوردن را دارا می‌باشد که متناسب با آن‌ها می‌توان موارد کاربرد فراوانی برای آن یافت. مقاومت فشاری فوق‌العاده بالا از FRC با استفاده از دانه‌بندی مناسب که به طور همگن مخلوط شده باشند، بدست می‌آید. از سوی دیگر، افزایش نیروهای کششی / خمشی، شکستگی و کنترل آسیب به طور عمده به دلیل تقسیم به طور تصادفی از فیبرهای تقویت‌کننده در اختلاط حاصل می‌شود.

در نتیجه بسیاری از تحقیقات انجام شده روی این نوع از بتن، نشان می‌دهد که FRC در شرایط بارگذاری دینامیکی نسبت به سایر انواع بتن‌ها ویژگی‌های کنترل آسیب فوق‌العاده‌ای دارد. بطور مثال در ساخت کف سالن‌های صنعتی، می‌توان از این نوع بتن به جای بتن آرماتوری متداول سود جست. این نوع بتن از بهترین مصالح مورد استفاده در ساخت بناهای مقاوم در برابر ضربه، همچون سازه پناهگاه‌ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره به شمار می‌رود و بناهای شکل‌گرفته از بتن، قابلیت فوق‌العاده‌ای در جذب انرژی ضربه دارد. همچنین در ساخت باند فرودگاه‌ها به خوبی می‌توان از این نوع بتن کمک گرفت. موارد دیگری از بکارگیری این بتن، ساخت قطعات پیش ساخته ساختمانی همچون پانل‌ها و یا پاشش بتن روی سطح انحنای یک سازه می‌باشد. علاوه بر موارد یاد شده می‌توان از مزایایی همچون عایق بودن سازه در برابر صدا و سرعت بالای اجرا نیز بهره‌مند گردید.

### انواع الیاف کاربردی در بتن

تاکنون مشخص شده است که انواع الیاف‌ها می‌توانند ظرفیت کرنش مقاومت در برابر ضربه میزان جذب انرژی مقاومت سایشی و مقاومت کششی بتن را افزایش دهند. امروزه با استفاده از الیاف شیشه، پلی پروپیلن، فولاد و بعضاً کربن، تولید انواع بتن‌های کامپوزیتی در کاربردهای مختلف صنعتی ممکن گردیده و بکارگیری آن‌ها در کشورهای پیشرفته دنیا مورد قبول صنعت ساختمان واقع شده است.

الیاف‌های مورد استفاده در بتن بیشتر شامل الیاف شیشه، فولاد، پلی پروپیلن، آزیست و کربن نیز می‌باشند.

#### الیاف شیشه

الیاف شیشه بتن جزء اقتصادی‌ترین و گسترده‌ترین نوع از انواع الیاف بتن می‌باشد. پراکندگی بسیار بالای شیشه در بتن الیافی در حفظ مقاومت‌های فشاری و سایشی بتن تأثیر بسزایی دارد. این محصول جایگاه نسبتاً مناسبی در تعمیر بناها و تقویت سازه‌های صدمه‌دیده دارند و می‌توانند مقاومت پیچشی و برشی مناسبی نیز پدید آورند.



#### الیاف فولادی

مورد بعدی کاربرد الیاف فولادی در سازه الیاف است که می‌تواند نقش مکملی برای میلگرد داشته باشد. الیاف فولادی با پخش ترک‌ها مقابله می‌کنند و مقاومت بتن را در برابر خستگی ضربه جمع شدگی و تنش‌های حرارتی افزایش داده و بتن در همه مدهای شکست روی خواص مکانیکی بتن تأثیر مثبت می‌گذارد. از اهم متغیرهایی که بر خواص بتن پر الیاف فولادی اثر می‌گذراند می‌توان به خواص ماتریس بتن بازدهی الیاف و مقدار الیاف اشاره کرد. تکنولوژی بتن پر مقاومت توسعه‌ای جدید در صنعت ساخت سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. در بتن سخت شده مقاومت و دوام دو عامل اصلی بوده و هر چه مقاومت فشاری بتن بیشتر می‌شود بتن تردتر شده و در نتیجه مقاومت کششی آن به نسبت افزایش مقاومت فشاری افزایش نمی‌یابد و نیز از تحمل کرنش پایین‌تر برخوردار است. بدین دلیل نیاز به استفاده از الیاف در بتن پر مقاومت کاملاً مشهود است. جهت افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از گسترش ترک و به‌ویژه افزایش نرمی از الیاف در بتن استفاده می‌شود. مقدار افزایش با تغییر این مقاومت‌ها بستگی به مقاومت بتن بدون الیاف شکل الیاف و درصد الیاف دارد.

بتن پر مقاومت شامل الیاف فولادی، ترکیبی است از سیمان، مصالح سنگی، آب، فوق روان کننده، دوده سیلیس و همچنین درصدی از الیاف فولادی که به‌طور درهم و کاملاً اتفاقی و در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده است. وجود الیاف فولادی مشخصات مکانیکی بتن را نسبت به حالت بهبود می‌بخشد. بتن پر مقاومت یک ماده ترد و شکننده است در حالیکه افزودن الیاف فولادی به بتن پر مقاومت سبب بهبود رفتار ترد بتن و تغییر مد شکست آن می‌گردد.



### مزایای بتن الیافی

بتن الیافی (FRC) نوع جدیدی از بتن است که عملکرد مؤثرتری را در مقایسه با همتایان بتنی خود ارائه می‌دهد. FRC دارای ویژگی‌های مکانیکی برتری از جمله مقاومت فشاری بیش از 150 مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بالا، حد الاستیک بالا، استحکام کششی در دامنه 15 تا 15 MPa، سخت شدن کشش در تنش، انرژی شکست چندین برابر از مقادیر بتن سنتی و ظرفیت بالا پس از ترک‌خوردگی می‌باشد. در زیر به ذکر موردی برخی مزایای بتن الیافی پرداخته شده است :

1. مقاومت در مقابل تورق و سایش
2. مقاومت در مقابل تنش‌های خستگی
3. مقاومت عالی در مقابل ضربه
4. قابلیت کششی و ظرفیت زیاد تغییر شکل نسبی
5. قابلیت باربری بعد از ترک‌خوردگی
6. افزایش در میزان جذب انرژی

قابلیت انعطافی که بتن الیافی دارد همانند خواص مواد پلاستیکی باعث می‌شود که بتن الیافی گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. از آنجا که الیاف در جسم بتن در همه جهات پراکنده می‌شود در صورت تشکیل یک ترک در جهات مختلف الیاف اتصالاتی را به وجود آورده و از گسترش ترک جلوگیری می‌نماید. بنابراین رشته‌های الیاف به‌طور فعال در محدود کردن عرض ترک وارد عمل شده و با تشکیل ریز ترک‌های زیاد قابلیت بهره‌برداری بتن را افزایش می‌دهند. مکانیزم تقویت را می‌توان بصورت زیر توجیه کرد:

تنش‌ها به‌وسیله برش محیطی و در صورتیکه رویه الیاف آجدار باشد به‌وسیله مقاومت چسبندگی (درون سطحی) از ماتریس به الیاف منتقل می‌شود. بنابراین مادامی که ماتریس بتن ترک نخورده است، تنش کششی بین الیاف و ماتریس تقسیم می‌شود. پس از ایجاد ترک، همه تنش به الیاف انتقال می‌یابد. مهم‌ترین متغیرهایی که بر خواص بتن با الیاف اثر می‌گذارند عبارت‌اند از : خواص ماتریس بتن ، بازدهی الیاف و مقدار الیاف. بازدهی الیاف به‌وسیله مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از مخلوط کنترل می‌شود این مقاومت به چسبندگی بین الیاف و ماتریس بستگی دارد.

برای الیاف با مقطع ثابت این مقاومت با افزایش طول، افزایش می‌یابد. بنابراین هر قدر طول بیشتر باشد اثر آنها در بهبود خواص ماتریس بیشتر خواهد بود چون مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن متناسب با سطح مقطع دو جسم می‌باشد.

معمولاً الیاف با سطح مقطع گرد و قطر کوچک بیشتر از الیاف با سطح مقطع گرد و قطر بزرگتر بازدهی دارند. این امر به این خاطر است که الیاف دسته اول سطح بیشتری در واحد حجم دارا می‌باشند بنابراین هر چه سطح تماس الیاف بیشتر باشد (و یا به عبارت دیگر قطر آنها کوچکتر باشد) بازده چسبندگی آنها بیشتر خواهد بود بنابراین روشن می‌شود که نسبت طول به قطر الیاف باید به اندازه ای بزرگ باشد که در هنگام شکست ماتریس، الیاف به حداکثر مقاومت کشش خود نزدیک باشند، با این وجود در عمل این کار معمولاً ممکن نیست.

بسیاری از محققین نشان داده اند در صورتیکه از روشهای عادی اختلاط استفاده شود الیاف با نسبت طول به قطر بیشتر از 100 باعث کم شدن کارآیی بتن به مقدار قابل ملاحظه ای می‌شوند و یا بطور نا همگون در بتن توزیع می‌گردند.

### توجیه اقتصادی بتن الیافی

باید اعتراف کرد که استفاده از بتن الیافی در همه موارد از بتن سنتی به صرفه‌تر نمی‌باشد. اما بر اساس برآوردهایی که توسط بعضی از متخصصین کشور انجام گرفته است، در جاهایی که سرعت اجرای بالا مد نظر است و یا نیاز به پاشش بتن (شات کریت) روی سطوحی است که شبکه‌بندی‌های سنتی مشکل و زمان‌بر بوده یا جواب‌گوی کار نیست، هزینه استفاده از بتن الیافی نسبت به مشابه سنتی خود کمتر می‌باشد.

این مزیت‌ها، علاوه بر مزیت سادگی و سرعت عمل بالاتر موجود در تکنولوژی بتن الیافی است. اگر می‌بینیم که در کشوری همچون ترکیه، به کارگیری بتن الیافی به جای روش‌های سنتی، مقرون به صرفه‌تر از کشور ماست، ریشه‌های آن را در سرمایه‌گذاری و تلاش سازمان‌یافته جهت اقتصادی نمودن استفاده از این تکنولوژی جدید می‌توان یافت.

اما اگر ما از روی آوردن به فناوری جدید به علت ریسک سرمایه‌گذاری پرهیز کنیم خواهیم دید که تکنولوژی سنتی در غیاب بهره‌گیری از فناوری نوین، رقم بسیار بالایی از سرمایه‌های ما را به هدر خواهد داد. به طور مثال، ریزدانه‌های تولید شده در کشور ما که به روش‌های قدیمی غیراستاندارد تولید می‌شوند، باعث افزایش درصد سیمان به کار رفته در بنا می‌شود و همین امر موجب ظهور ترک و ضایعات در بتن حاصل نیز می‌گردد. راهکارهایی که جهت اقتصادی نمودن استفاده از این تکنولوژی جدید، پیشنهاد می‌شود:

### ارائه پیشنهاد

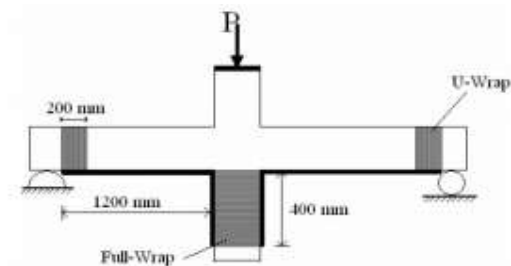
هزینه استفاده از تکنولوژی‌های نوین کاملاً وابسته به سطحی از آن تکنولوژی است که نسبت به کسب و انتقال آن اقدام می‌شود. کشورهای پیشرفته جهان که تکنولوژی نوین خود را از سطوح اولیه تحقیقاتی کسب کرده‌اند، چون کاملاً بر تکنیک‌ها و دانش پایه‌ای آن واقف و مسلط هستند، متحمل هزینه‌های کمتری شده‌اند. آن‌ها با تکیه بر همین آگاهی و اشراف، با بهبود فرایندها، قیمت نهایی را در طول زمان کاهش خواهند داد. لذا فراهم نمودن بسری جهت تسلط کامل بر دانش پایه‌ای تکنولوژی، تخصیص سرمایه اولیه در این زمینه و گسترش آموزش ساخت آن در طول زمان از هزینه خواهد کاست.

این هزینه‌ها بعداً در طول عمر تکنولوژی و آرایه محصول به بازار جبران خواهد شد و نهایتاً به سوددهی منجر می‌گردد. عدم پرداختن به تحقیق و توسعه و بهره‌گیری از تکنولوژی نوین، علاوه بر آن که نمی‌تواند پاسخگوی نیاز روز صنعت ساختمان باشد، در درازمدت، هزینه بسیار بالایی نیز به ما تحمیل می‌کند

سازه‌های بتنی ممکن است به دلایل مختلفی دچار آسیب شده و نیاز به مرمت، تقویت و یا بهسازی داشته باشند. این آسیب‌ها از دو بعد ماده و سازه مطرح می‌باشند. آسیب ماده در سازه‌های بتنی در مواردی همچون خوردگی فولاد و یا



فساد و خرابی بتن مطرح می‌شود که با استفاده از روش‌های مخصوص به خود و مواد تعمیراتی مانند انواع دوغاب و ... قابل ترمیم می‌باشند. آسیب سازه‌ای یک سازه بتنی در موارد متعددی مانند دقیق محاسبه نکردن نیرو و زلزله در زمان طراحی سازه، تغییر کاربری و عدم رعایت ضوابط اجرایی ... مطرح می‌باشد. روش‌های متعددی جهت مرمت و ترمیم سازه‌های بتنی وجود دارد که مواد پلیمری مسلح شده با کربن و شیشه (GFRP & CFRP) دو ماده مناسب برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. مواد FRP در شکل‌های الیاف (Fiber)، الیاف بافته‌شده (Sheet) و ورق پیش‌ساخته (Plate) در مقاوم‌سازی بکار می‌روند. در سال‌های اخیر، مقاوم‌سازی سازه‌ها با استفاده از FRP به دلیل راحتی نصب آن‌ها، وزن کم در مقابل افزایش مقاومتی که به سازه می‌دهند و عدم تغییر ظاهری سازه پس از مقاوم‌سازی، توسعه و گسترش روزافزونی یافته است. بنابراین تحقیقات گسترده‌ای به صورت آزمایشگاهی و تئوری بر روی مقاوم‌سازی اعضا بتن مسلح مانند تیر، ستون، دال، دیوار و اتصال ... انجام گرفته است. استفاده از FRP در مقاوم‌سازی خمشی یا برشی، بهبود شکل‌پذیری (مانند دور پیچ کردن ستون) و ... در اعضا بتن مسلح قابل کاربرد می‌باشد. همچنین آئین‌نامه‌های مختلف دنیا بر اساس تحقیقات انجام‌شده توصیه و مقرراتی را در مورد استفاده از FRP در مقاوم‌سازی سازه بتنی پیشنهاد داده‌اند. اکثر مطالعات خمشی بر روی تیر دهانه ساده یعنی با تکیه‌گاه ساده انجام گرفته که لنگر خمشی مثبت در وسط تیر حداکثر می‌باشد. FRP بر وجه کششی آن‌ها جهت افزایش ظرفیت خمشی استفاده شده است، لذا طول کافی برای مهار FRP وجود دارد.



مقاوم‌سازی منطقه ممان منفی در تیرها به دودسته تقسیم می‌شود؛ دسته اول تیرهای سراسر مانند پل‌ها که ممان منفی در محل تکیه‌گاه می‌باشد، برای مقاوم‌سازی در منطقه ممان منفی جهت افزایش ظرفیت خمشی امکان ادامه دادن FRP در دو طرف تکیه‌گاه وجود دارد لذا طول مهاری تأمین می‌شود. دسته دوم در ساختمان‌های بتن مسلح قاب خمشی، معمولاً اتصالات تیر و ستون به صورت صلب می‌باشد. با توجه به این مطلب که لنگر در ناحیه اتصال، منفی است و بزرگ‌ترین مقدار لنگر در محل اتصال رخ می‌دهد، بنابراین نمی‌توان FRP را که برای مقاوم‌سازی بر روی تیر چسبانده می‌شوند، در محل اتصال و یا قبل از آن قطع کرد بلکه باید FRP را به نحو مناسبی در محل اتصال مهار کرد. مشکل مقاوم‌سازی تیرها در این قسمت، مهار FRP در محل اتصال می‌باشد. همچنین برای مقاوم‌سازی طولی ستون در بر اتصال همین مشکل وجود دارد. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی با اجراء آسان، ادامه FRP از روی تیر در ممان منفی به روی ستون به صورت L شکل می‌باشد. مطالعات در این زمینه به صورت آزمایشگاهی که این روش را تأیید کند، محدود می‌باشد. Cerino و همکاران چند نمونه به صورت T شکل که شرایط هندسی مقاوم‌سازی طولی ستون در محل اتصال با پی و مقاوم‌سازی برشی در محل آویز تیر را شبیه‌سازی می‌کند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این نمونه‌ها، چند روش مهار FRP طولی در محل زاویه 90 درجه را آزمایش کردند. قابل ذکر است که در تمام نمونه‌ها، نیروی کشش در FRP به صورت مستقیم اعمال شده است. نتایج بررسی روی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مطالعه آزمایشگاهی روی مقاوم‌سازی خمشی در محل ممان منفی تیرها در بر اتصال به ستون انجام نگرفته است تا میزان کارایی مهار پیشنهادی L شکل در محل حداکثر لنگر بررسی گردد؛ بنابراین در این تحقیق به این موضوع پرداخته شده است.

#### 1-1-14 نمونه‌های آزمایش

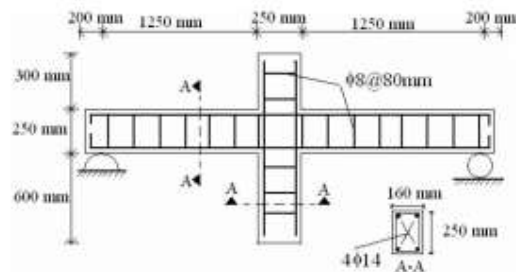
با توجه به برنامه ریزی انجام شده، 4 نمونه بتن مسلح به صورت تیر صلیبی شکل با مقیاس بزرگ ساخته شده است. طول تیر از هر طرف ستون 1450 میلی متر و مقطع تیر 250×160 میلی متر و طول بالای ستون از بر تیر 300 میلی متر و طول پائین ستون از بر تیر 600 میلی متر می باشد. ابعاد مقطع ستون 250×160 میلی متر می باشد. برای میلگرد طولی تیر از چهار عدد میلگرد 14 (دوتا بالا و دو تا پایین) استفاده شده است، همچنین از میلگرد  $\phi 8$  در هر 80 میلی متر جهت خاموت استفاده شده است. همچنین در ستون ها از چهار میلگرد طولی 14 استفاده شده است که توسط میلگردهای عرضی 8 با فاصله 80 میلی متر مسلح شده اند. شکل 1-الف نمایی از شبکه آرماتوربندی نمونه را نشان می دهد. مقاومت فشاری نمونه ها پس از اعمال ضریب تعدیل مکعبی به استوانه ای (0.85)، 20 مگا پاسکال به دست آمد. تنش تسلیم فولاد طولی 400 مگا پاسکال و فولاد عرضی 300 مگا پاسکال می باشد.

### 1-1-15- برنامه مقاوم سازی نمونه ها

نمونه ها جهت بررسی رفتار تیرهایی که از یک طرف به ستون برخورد می کنند و ممان در آنجا حداکثر می باشد و با CFRP مقاوم سازی می شود، برنامه ریزی شده اند. مراحل نصب FRP به نمونه شامل آماده سازی سطح بتن و نصب CFRP و سپس GFRP می باشد. ابتدا سطح ضعیف بتن توسط سنگ فرز برداشته شده و جهت پیوستگی بیشتر بین FRP و سطح بتن، بعد از صاف کردن سطح بتن توسط دستگاه سنگ فرز شیارهای طولی ایجاد شده است. برای مقاوم سازی از چسب Sikadur 330 و CFRP به ضخامت 0.11 میلی متر با مقاومت کششی 3900 مگا پاسکال محصول شرکت Sika و GFRP به ضخامت 0.31 میلی متر و با مقاومت کششی 2300 مگا پاسکال محصول شرکت Sika استفاده شده است. یک عدد نمونه غیر مقاوم سازی به عنوان نمونه کنترل (شاهد) انتخاب شده و سه نمونه باقیمانده مقاوم سازی گردیدند. نمونه CB به عنوان نمونه کنترل می باشد. همانطوریکه در جدول 1 نشان داده شده، پارامتر متغیر در نمونه های مقاوم سازی شده، تعداد لایه CFRP می باشد. این تیرها به اختصار با BS<sub>n</sub> نام گذاری شده است. B مخفف Beam S مخفف Strengthening و n نشان دهنده تعداد لایه های طولی CFRP برای مقاوم سازی خمشی می باشد. نحوه مقاوم سازی تیرها در شکل 1-ب نشان داده شده است. در نمونه های مقاوم سازی شده، لایه طولی CFRP در انتها تیر با استفاده از ورق GFRP به شکل U مهار می شود. جهت مهار CFRP در بر ستون که لنگر حداکثر می باشد، CFRP در روی ستون به طول 400 میلی متر ادامه داده شده و سپس با استفاده از GFRP به عرض 400 میلی متر دور پیچ می شود.

### 1-1-16- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش

همه تیرها تحت بارهای متمرکز بر روی ستون در وسط دهانه قرار گرفتند. در هر گام بارگذاری ضمن قرائت و ثبت داده ها، حس گرهای الکتریکی شامل نیروی وارده و تغییر شکل زیر ستون به کمک دستگاه ثبت داده ها، گسترش ترک ها روی تیر ترسیم می شد و اندازه بزرگ ترین ترک با ترک سنج چشمی قرائت گردید. هر اتفاق و مشاهدات لازم برای تیر در هنگام بارگذاری ثبت می گردید. نتایج آزمایش تیرها در ترمهای نوع شکست تیر، بار - خیز و بار عرض ترک در ادامه بحث خواهد شد.



مقاوم سازی محل اتصال

### نوع شکست تیرها

با توجه به اینکه هر تیر در مقاومت‌سازی باهم اختلاف دارد، لذا نوع شکست آن‌ها باهم فرق دارد، بنابراین در ادامه نحوه شکست تیرها توضیح داده شده است.

#### تیر CB:

بار جاری شدن میلگرد کششی تیر در محل اتصال KN 38.80 می‌باشد. با رسیدن بار به 20.43 KN، بتن فشاری تیر در محل اتصال خرد شد. در این لحظه تیر تغییر شکل زیادی را تحمل کرد. در لحظه خرابی، ترک‌ها در محل اتصال از طرف پائین به طرف بالا به سمت بتن فشاری گسترش پیدا کرد. عرض ترک‌ها بعد از جاری شدن فولاد کششی بشدت افزایش پیدا کرد. شکل 2 نمائی از لحظه خرابی این تیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲- خرابی و گسترش ترک در تیر کنترل (CB)

#### تیر BS1:

میلگرد کششی تیر در محل اتصال این تیر تحت بار KN 39.33 جاری شد. با رسیدن بار به 46.00 KN و افزایش تنش در CFRP طولی در تیر باعث افزایش تنش GFRP در دور پیچ شده، تحت این بار پاره شدند، بعداز آن بار افت کرد. سپس بارگذاری ادامه پیدا کرد تا اینکه در بار KN 43.00 تیر در تار فشاری در محل اتصال دچار خرابی گردید. به خاطر پارگی زود هنگام دور پیچ، مقاومت خمشی تیر آن چنان نسبت به تیر شاهد افزایش نیافت. مقایسه دامنه ترک خوردگی این تیر با تیر کنترل نتیجه می‌شود که در تیر مقاومت‌سازی شده، عرض ترک نسبت به تیر شاهد کاهش پیدا کرده است. شکل 3 خرابی تیر BS1 را نشان می‌دهد.

#### تیر BS2:

میلگرد کششی در محل اتصال تیر به ستون تحت بار KN 42.66 جاری شد. به خاطر زیاد شدن عرض ترک بعد از جاری شدن فولاد کششی و با رسیدن بار به 47.00 KN، در محدوده کوچکی از CFRP طولی تیر در نزدیک ستون، جداسازی (debonding) اتفاق افتاد که در نتیجه آن نیروی CFRP به دور پیچ منتقل می‌شود. نیروی انتقالی به دور پیچ باعث افزایش تنش در آن می‌گردد که نتیجه آن پارگی دور پیچ می‌باشد. بعد از این CFRP روی تیر کارایی خود را از دست داده و بار افت می‌کند. سپس با بارگذاری مجدد تا 42.00 KN که بتن فشاری تیر در محل نزدیک به اتصال تیر به ستون خرد می‌گردد. شکل 4 خرابی تیر BS2 را نشان می‌دهد.



شکل ۲- خرابی تیر BS1 در اثر پارگی CFRP دور پیچ



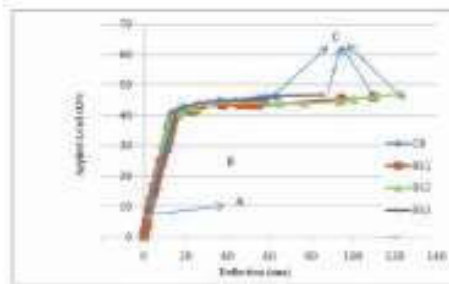
شکل ۴- خرابی تیر BS2 در اثر جداشدن CFRP از روی تیر و پارگی GFRP دور پیچ

### تیر BS3:

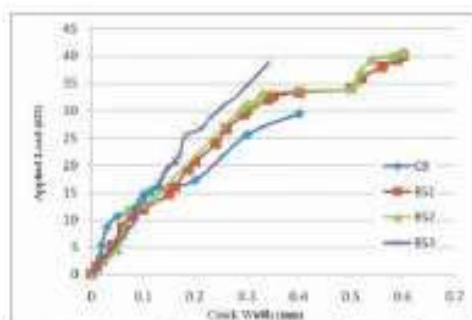
میلگرد کششی در محل اتصال این تیر تحت بار  $KN\ 42.00$  جاری شد. به خاطر زیاد شدن عرض ترک بعد از جاری شدن فولاد کششی و با رسیدن بار به  $KN\ 46.66$  تنش برشی در چسب نزدیک ترک افزایش می‌یابد که حاصل آن جداشدگی CFRP تیر از بتن در نزدیکی محل اتصال می‌باشد. در نتیجه آن نیروی زیادی از طرف CFRP تیر به GFRP دور پیچ وارد می‌شود. افزایش نیروی وارده به دور پیچ باعث پارگی هم‌زمان دور پیچ و CFRP طولی تیر در محل برخورد دور پیچ می‌گردد. علیرغم استفاده از چندلایه FRP برای دور پیچ و سه لایه FRP طولی در تیر، پارگی هم در دور پیچ و هم در CFRP طولی تحت باری همانند تیر BS2 اتفاق افتاد. بعد از آن بار افت کرد، سپس مجدداً بارگذاری ادامه پیدا کرد تا اینکه تحت بار  $KN\ 42.00$  خرابی در تیر به صورت خرد شدن بتن فشاری تیر در نزدیکی محل اتصال اتفاق افتاد. شکل 5 خرابی تیر BS3 را نشان می‌دهد.

شکل 6 نمودار بار-خیز نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. نمودار تقریباً به سه خط با شیب ثابت توسط سه نقطه A, B و C تقسیم شده است. نقطه A، بار ترک خوردگی، نقطه B، بار جاری شدن فولاد کششی، نقطه C، بار نهایی تیر را بیان می‌کند. افزایش تعداد لایه‌های CFRP در تیرهای BS1, BS2 و BS3 آن‌چنان ظرفیت تیر را افزایش نمی‌دهد. همه تیرها قبل از جاری شدن و بعد از جاری شدن دارای سختی همانند تیر کنترل می‌باشد، فقط در تیر BS3 به خاطر افزایش تعداد لایه‌های دور پیچ مقدار سختی بعد از نقطه جاری شدن فولاد کششی بیشتر از تیرهای دیگر شده است. تیر BS3 حدود 8 درصد نسبت به تیر کنترل افزایش ظرفیت باربری داشته است. لازم به ذکر است که تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که FRP بیشتر در حالت نهایی تأثیر دارد نه در حالت خدمت. با افزایش تعداد لایه‌ها بار جاری شدن به مقدار جزئی افزایش می‌یابد که این نشانگر این مطلب است که تا قبل از پاره شدن دور پیچ‌ها، CFRP در رفتار تیر اثر دارد یعنی مهار CFRP طولی در ستون انجام می‌گیرد. دلیل آن را می‌توان این‌طور بیان کرد که بعد از جاری شدن فولاد کششی و زیاد شدن نیرو در CFRP طولی، تنش در دور پیچ افزایش می‌یابد که در نتیجه آن باعث پارگی

دورپیچ یا CFRP طولی می‌گردد؛ با پاره شدن دور پیچ، CFRP طول مهار خود را از دست می‌دهد (در جایی که ممان حداکثر است) لذا بعد از جاری شدن فولاد کششی ظرفیت تیر آن چنان افزایش نمی‌یابد.



شکل ۶- فولاد بار خیز بره های آزمایش شده



شکل ۷- فولاد بار خیز بره های آزمایش شده

#### نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد نوعی مهار متداول که بعضی آئین نامه ها برای مهار FRP در محل اتصال تیر به ستون پیشنهاد داده‌اند، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر استخراج شده است:

- 1- مقاوم سازی کردن نمونه‌ها با باعث کاهش عرض ترک دربار ثابت در محدوده خدمت شده است.
- 2- علیرغم افزایش تعداد لایه‌های در تیرهای BS1، BS2، و BS3 آن چنان ظرفیت باربری تیر افزایش نمی‌یابد. همه تیرها قبل از جاری شدن و بعد از جاری شدن دارای سختی همانند تیر کنترل می‌باشند و فقط در تیر BS3 با افزایش تعداد لایه‌ها دور پیچ مقدار سختی بعد از نقطه جاری شدن فولاد کششی به مقدار جزئی بیشتر از تیرهای دیگر شده است. بنابراین براساس نتایج این تحقیق، این نوع از مهار برای FRP جهت مقاوم سازی تیر در محل اتصال عملکرد مناسبی ندارد.

بررسی رفتار ساختمان‌ها در برابر بارهایی همچون زلزله، بارهای ناشی از برخورد اجسام، بارهای ناشی از انفجارهای رویداده در مجاورت آنها و یا حتی در داخل آنها، همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. با توجه به اینکه کشور ما در منطقه‌ای زلزله‌خیز واقع است، بسیاری از سازه‌های کشور نیاز به تقویت و مقاوم سازی دارند. در این مقاله سعی میشود تا رفتار دیوارهای برشی دارای بازشو تحت بارهای چرخه ای مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، از روش اجزای محدود استفاده به عمل می‌آید. محل بازشوی دیوار برشی بر تنش‌ها و تغییر شکل الاستیک و غیر الاستیک، و نیز بر شکل پذیری، مقاومت خمشی و قابلیت جذب انرژی دیوار برشی به هنگام زمین لرزه‌ها موثر است. لذا لازم است رفتار غیر خطی دیوارهای برشی بتن مسلح دارای باز شو را در نظر گرفت و تمهیداتی را برای تقویت کناره‌های بازشوها در نظر گرفت. وجود بازشوها در المانهای بتن مسلح فرض‌های ساده کننده‌ی طراحی را تغییر می‌دهد و باید به درستی در تحلیل آن منظور گردد. از طرف دیگر ضرورت وجود بازشو در دیوارهای برشی بتن مسلح به دلایل معماری اغلب اجتنابناپذیر است. دیوارهای برشی بتن مسلح سازه‌ی کارآمدی برای تامین سختی ساختمانهای بلند و میان مرتبه

در برابر نیروهای جانبی به شمار میرود. دیوار برشی بتن مسلح سیستمی است برای جذب انرژی زمین‌لرزه و نیروی فشاری باد وارد بر ساختمان و در کل جهت جذب نیروهای افقی وارد بر سازه به کار برده می‌شود.

### المان های استفاده شده

#### 1. المان C3D8R

نرمافزار آباکوس از یک المان سه‌بعدی C3D8R (از دسته المان های Solid)، برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح ترد نظیر بتن استفاده میکند. این المان سه بعدی و هشت گره‌ای است. این المان از نوع Solid برای تحلیل تنش یا تغییر مکان است.

#### 2. المان T3D2

با توجه به زمان بسیار زیاد تحلیل در مدل‌های سه بعدی، مدل‌های دو بعدی می‌تواند در کاربرد مناسب خودش بسیار دقیق و مقرون به‌صرفه باشد. این روش علاوه بر کاهش تعداد المان‌ها و زمان تحلیل جوابی مناسب و دقیق به دست می‌دهد. المان خریایی یکی از المان‌های سازه‌ای معمول قابل استفاده در نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. المان خریا عضوی است دو نیرویی که نیروها فقط در گره‌های آن اعمال شده و این گره‌ها تنها دارای درجه آزادی انتقالی می‌باشند. این المان‌ها فقط دارای مقاومت محوری می‌باشند. در این المان‌ها فقط گره‌ها نیرو را انتقال می‌دهند و لذا المان‌های خریا مقاومت خمشی و برشی از خود نشان نمی‌دهند. در واقع المان‌های خریا اعضای سازه‌ای هستند که فقط نیروی محوری را انتقال داده و ممان و برش را انتقال نمی‌دهند. از این المان‌ها برای مدل‌های اعضای سازه‌ای که تحت نیروهای محوری کششی یا فشاری قرار دارند استفاده می‌شود.

#### 3. المان S4R

برنامه المان محدود آباکوس قادر است که برای آنالیزهای مدل‌هایی با ساختار مرکب استفاده شود. در واقع توسط این برنامه می‌توان مدل‌هایی با ترکیب مواد مختلف ایجاد نمود و نیز می‌توان با استفاده از توانایی‌های این برنامه رفتاری مناسب در قسمت مرزی بین دو ماده برقرار کرد. المان پوسته چهار گره‌ای چند منظوره قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرال‌گیری برای به حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان آنالیز را دارا می‌باشد. از آنجایی که اثر برش عرضی در این المان لحاظ شده است، می‌توان برای مدل‌های با ساختار باریک و ضخیم استفاده نمود. در این مطالعه از S4R که از المان های Shell است. برای مش بندی FRP استفاده شده است.

### رفتار بتن

به منظور معرفی رابطه تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن، از رابطه هاگستاد اصلاح شده استفاده شده است. روابط زیر معرف شاخه صعودی این منحنی تنش- کرنش است.

$$f_c = f''_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

$$f''_c = k_s \times f'_c$$

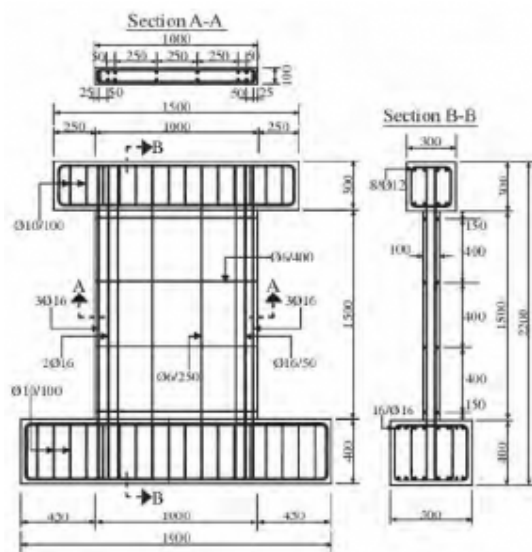
### رفتار فولاد و نحوه آرماتورگذاری

منحنی تنش کرنش فولاد در کشش و فشار یکسان است. نرمافزار برای در نظر گرفتن بخش غیرخطی فولاد سه نوع مدل ارائه میکند، مدل ایزوتروپیک، کینماتیک، و ترکیب ایزوتروپیک با کینماتیک به صورت غیرخطی. مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی مدل‌های ساخته شده در جدول 2 آورده شده است.

جدول 1: مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی

شماره آرماتور	خصوصیات آرماتورها		
	سطح مقطع (mm <sup>2</sup> )	مقاومت تسلیم (Mpa)	مقاومت نهایی (Mpa)
(Φ 6)	۲۸,۲۶	۳۲۵	۴۲۰
(Φ 10)	۷۸,۵	۴۳۰	۵۲۲
(Φ 12)	۱۱۳	۴۲۸	۵۱۵
(Φ 16)	۲۰۰,۹۶	۴۲۵	۵۲۰

در شکل 1 جزئیات آرماتورگذاری دیوار برشی آورده شده است.



شکل 1: جزئیات آرماتورگذاری

### کامپوزیت های FRP

مشخصات الیاف استفاده شده در جدول 3 آورده شده است.

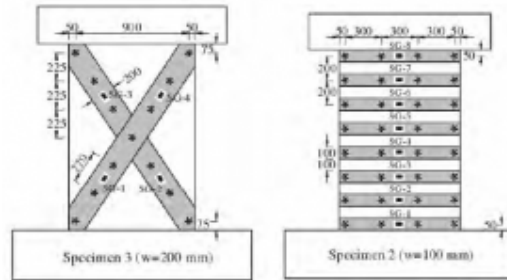
جدول 2: مشخصات CFRP

نوع الیاف استفاده شده	ضخامت (میلی متر)	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	مقاومت کششی نهایی (مگا پاسکال)	درصد کرنش نهایی
الیاف کربن	12/0	230000	4100	7/1

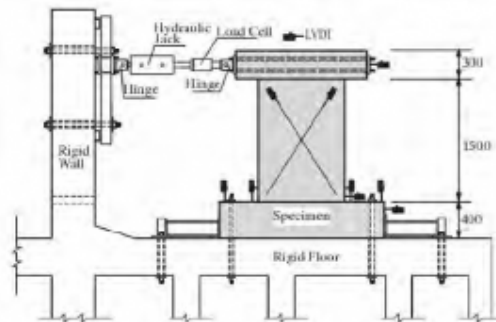
### نمونه های مورد بررسی

در این مطالعه به بررسی 9 دیوار برشی بتن مسلح تقویت شده با الیاف کربن تحت بارگذاری چرخه‌ای که 3 دیوار قبلاً توسط سینان آلتین و همکاران مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته بود، توسط نرم‌افزار آباکوس پرداخته شد و در نهایت پس از صحت مدل‌سازی 3 دیوار برشی بتن مسلح دارای بازشوی مستطیلی در دیوار S2 با ابعاد 200 در 100 پیشنهاد شد. آرایش الیاف، دستگاه آزمایش و جزئیات آرماتورگذاری به کار برده شده در آزمایش‌ها در اشکال 2 و 3 آورده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب ورق‌های FRP در افزایش مقاومت نهایی، کاهش

قابل ملاحظه عرض ترک، کاهش خیز و به طور کلی بهبود شرایط در حالت بهره‌برداری و نهایی بوده و ضعف عمده آن‌ها علت رفتار خطی تا لحظه شکست، در کاهش شکل‌پذیری مقطع هست. رفتار غیرخطی مدل 3 بعدی نمونه‌های آزمایشگاهی توسط روش اجزا محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای به دست آمده از این مدل تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهند. بتن مورد استفاده در آزمایش‌های دارای مقاومت فشاری 28 روزه 16 مگاپاسکال و مقاومت کششی 16 مگاپاسکال است.



شکل 2: جزئیات نمونه S2



شکل 3: جزئیات بارگذاری

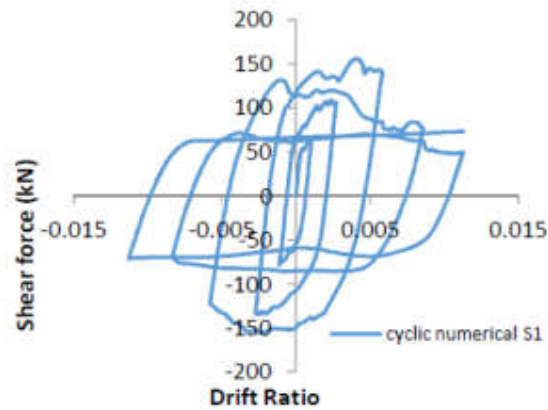
جدول 3: مشخصات نمونه‌ها

شماره نمونه	نوع تقویت	ابعاد بارشو	ابعاد بارشو	مقاومت فشاری
S1	دیوار برشی	---	---	16
S2	مقاوم جاری شده با توارهای افقی با عرض 100 میلی‌متر و فواصل 100 میلی‌متر	---	---	16
S3	مقاوم سازه‌ای شده با توارهای قطری با عرض 200 میلی‌متر	---	---	16
S2-1	مقاوم جاری شده با توارهای افقی با عرض 100 میلی‌متر و فواصل 100 میلی‌متر	500x200	3	16
S2-2	مقاوم سازه‌ای شده با توارهای قطری با عرض 100 میلی‌متر و فواصل 100 میلی‌متر	500x200	4	16
S2-3	مقاوم جاری شده با توارهای افقی با عرض 100 میلی‌متر و فواصل 100 میلی‌متر	500x200	6	16

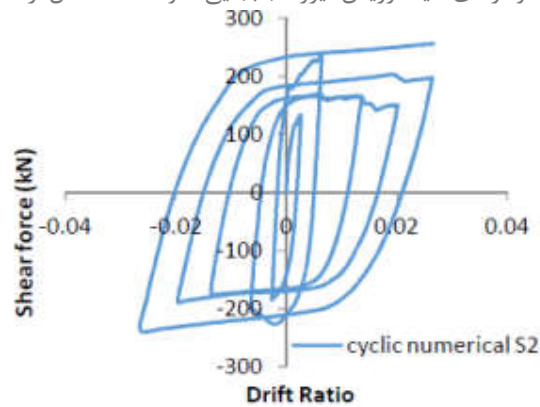
بررسی رفتار دیوار برشی بتنی مسلح مقاوم سازی شده با الیاف کربن

در مجموع نتایج 3 نمونه دیوار برشی بتن مسلح با نام‌های S1, S2 و S3 مربوط به آزمایش سینان آلتین و همکاران مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل یک نمونه بدون مقاوم سازی و 2 نمونه تقویت شده می‌باشد. با توجه به اینکه بار اعمال شده به سازه به صورت رفت و برگشتی می‌باشد، نمودار بار جابجایی بصورت هیستریزس (همان حلزون) است. نمودار هیستریزس چون از جنس بار-جابجایی است، هرچه سطح زیر نمودار هیستریزس بیشتر باشد انرژی که سازه جذب می‌کند، بیشتر است، پس میزان شکل‌پذیری سازه بیشتر است. در نمودار هیستریزس تقارن نشان‌دهنده یکسان بودن رفتار نسبت به زلزله است. هرچه عضو لاغرتر باشد سطح زیر نمودار کمتر است و در تعداد سیکل کمتری گسیخته می‌شود. همچنین هرچه نمودار هیستریزس تقارن بیشتری داشته باشد یعنی هرچه شکل حلزون متقارن‌تر باشد عملکرد بهتری در برابر زلزله دارد. منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل عددی برای نمونه‌های S1, S2 و S3 تحت بار چرخ‌های در اشکال زیر نشان داده شده است.

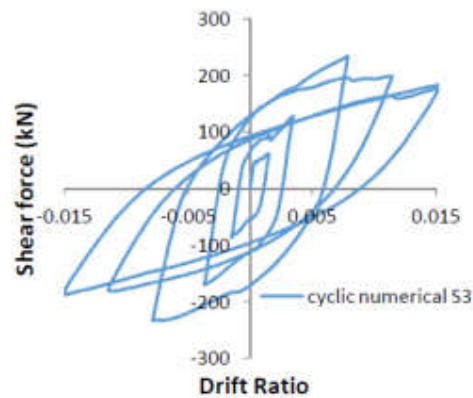




شکل 4: نمودارهای هیستریزس نیرو-جابجایی نمونه S1 حاصل از تحلیل عددی



شکل 5: نمودارهای هیستریزس نیرو-جابجایی نمونه S2 حاصل از تحلیل عددی



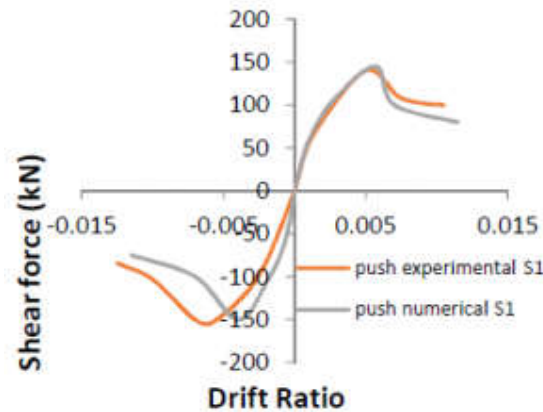
شکل 6: نمودارهای هیستریزس نیرو-جابجایی نمونه S3 حاصل از تحلیل عددی

با توجه به اینکه نمودار هیستریزس تقارن دارد، عملکرد مناسبی در برابر زلزله دارد. با مقایسه اشکال فوق، مشخص است که سطح زیر نمودار هیستریزس نمونه های مقاوم سازی شده با الیاف پلیمری بیشتر از نمونه S1 است، بنابراین انرژی که سازه های مقاوم سازی شده جذب میکند، بیشتر است و میزان شکل پذیری سازه های مقاوم سازی شده بیشتر است و با توجه به اینکه همه نمودارهای هیستریزس متقارن است بنابراین این سازه ها عملکرد مناسبی در برابر زلزله دارند. در جداول زیر حداکثر نیروی حاصل از مطالعه عددی و مطالعه آزمایشگاهی آورده شده است.

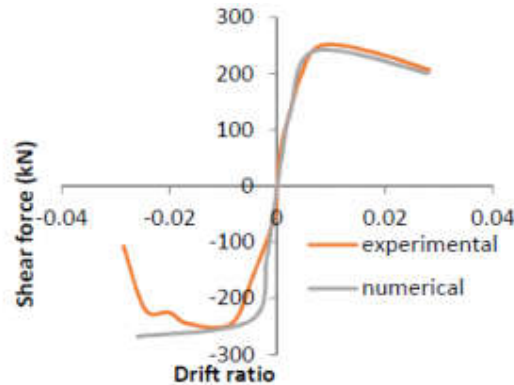
جدول 4: حداکثر نیروی حاصل از تحلیل عددی

نمونه	Push (kN)	Pull (kN)	Push (kN)	Pull (kN)
	حاصل از تحلیل عددی		حاصل از مطالعه آزمایشگاهی	
S1	۱۴۴٫۸	۱۴۹٫۶	۱۴۰	۱۵۰
S2	۲۳۶٫۳۴	۲۶۸٫۵	۲۵۰	۲۴۵
S3	۲۲۸٫۶	۲۳۰٫۱	۲۲۸	۲۲۵

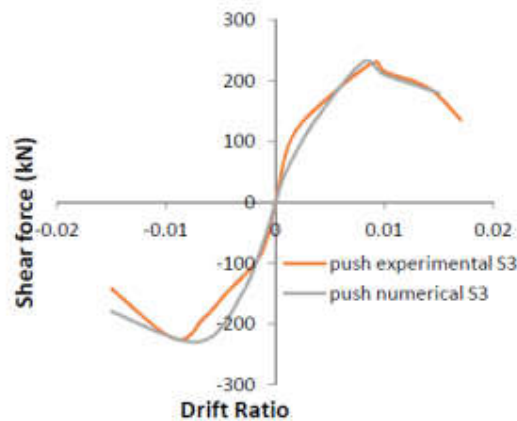
مقایسه پوش منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی نمونه‌های تحت بار چرخه‌ای حاصل از مطالعات آزمایشگاهی با پوش منحنی‌های هیستریزس تحلیل عددی در اشکال زیر نشان داده شده است. همانطور که در این اشکال مشخص است منحنی‌ها از سه قسمت تشکیل شده‌اند قسمت اول مربوط به ناحیه خطی نمودار میباشد که هنوز ترک خوردگی در نمونه دیوار برشی اتفاق نیافتاده است، مقدار جابجایی نسبی در این ناحیه بسیار کم است. از اینجا به بعد منحنی وارد ناحیه غیر خطی میشود و جابجایی نسبی با شیب بیشتری نسبت به مرحله قبل افزایش می‌یابد که این نشان دهنده شروع ترک خوردگی در بتن می‌باشد و این ناحیه تا بالاترین قسمت نمودار با رشد ترک خوردگی در بتن افزایش می‌یابد. ناحیه سوم مربوط به قسمتی از نمودار است که دچار افت شده است، در این مرحله همزمان با رشد ترک خوردگی در بتن آرماتورها نیز به تنش تسلیم رسیده‌اند و چون تحلیل بصورت کنترل جابجایی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است افت نیروی برشی در نمودارها نمایان شده است.



شکل 7: مقایسه پوش نمودار هیستریزس حاصل از نتایج آزمایشگاهی با پوش تحلیل عددی نمونه S1



شکل 8: مقایسه پوش نمودار هیستریزس حاصل از نتایج آزمایشگاهی با پوش تحلیل عددی نمونه S2

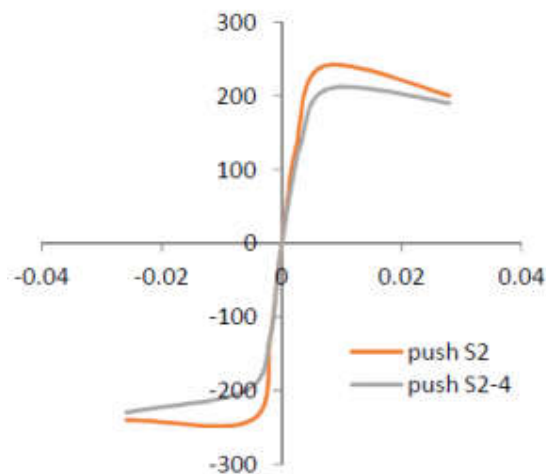


شکل 9: مقایسه پوش نمودار هیستریزس حاصل از نتایج آزمایشگاهی با پوش تحلیل عددی نمونه S3. نتایج مطالعه آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل عددی مربوط به حداکثر نیروی به دست آمده در سیکل های رفت و برگشت برای نمونه های S1، S2 و S3 در جدول زیر آورده شده است.

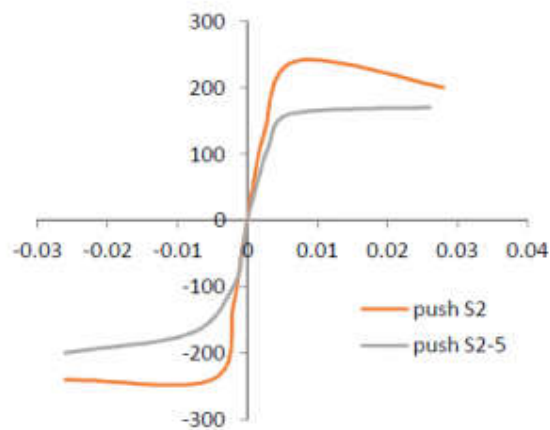
جدول 5: مقایسه حداکثر نیروی حاصل از تحلیل عددی و مطالعه آزمایشگاهی

نمونه	مطالعه آزمایشگاهی		مطالعه عددی		آزمایشگاهی عددی	
	Push (kN)	Pull (kN)	Push (kN)	Pull (kN)	Push (kN)	Pull (kN)
S1	۱۶۰	۱۵۰	۱۶۴٫۸	۱۶۴٫۶	۱٫۳	۰٫۹۷۷
S2	۲۵۰	۲۴۵	۲۳۶٫۳۴	۲۶۸٫۵	۰٫۹۶۵	۱٫۱۹۵
S3	۲۲۹	۲۲۵	۲۲۹٫۶	۲۳۰٫۱	۱٫۰۰۱	۱٫۰۲۲

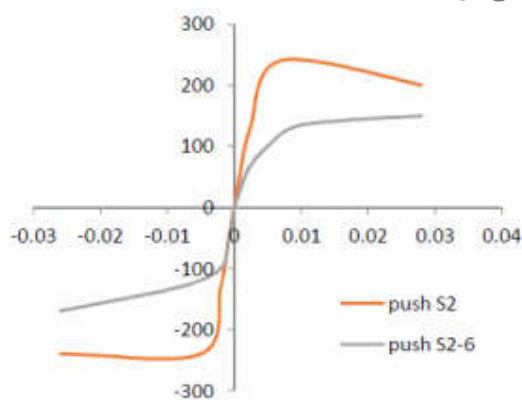
با توجه به جدول 6 حداکثر نیروی به دست آمده از تحلیل عددی برای نمونه های S1، S2 و S3 تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بطوریکه در نمونه های S1، S2 و S3 بترتیب بار نهایی در حالت عددی نسبت به آزمایشگاهی 3 درصد بیشتر، 5,5 درصد کمتر، تقریباً برابر در حالت رفت میباشد همچنین بار نهایی در حالت عددی نسبت به آزمایشگاهی تقریباً برابر، 9,5 درصد بیشتر، 2,2 درصد بیشتر و 15,4 درصد کمتر در حالت رفت می باشد. در ادامه به بررسی بازشو با ابعاد 100 در 100 میلی متر در دیوار برشی S2 می پردازیم.



شکل 10: مقایسه پوش نمودار هیستریزس حاصل از نتایج آزمایشگاهی با پوش تحلیل عددی نمونه S2-4 با 3 عدد بازشو به ابعاد 200 در 100 میلی متر



شکل 11: مقایسه پوش نمودار هیستریزیس حاصل از نتایج آزمایشگاهی با پوش تحلیل عددی نمونه S2-5 با 6 عدد بازشو به ابعاد 200 در 100 میلی‌متر



شکل 12: مقایسه پوش نمودار هیستریزیس حاصل از نتایج آزمایشگاهی با پوش تحلیل عددی نمونه S2-6 با 9 عدد بازشو به ابعاد 200 در 100 میلی‌متر

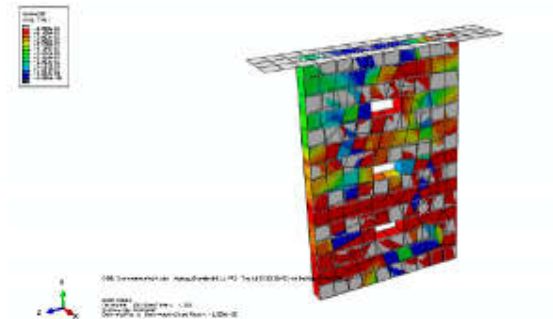
نتایج مطالعه عددی مربوط به نمونه‌های دارای بازشو در مقایسه با نمونه S2 نتایج مطالعه عددی مربوط به نمونه‌های دارای بازشو در مقایسه با نمونه‌های رفت و برگشت برای نمونه‌های S2، S2-4، S2-5 و S2-6 در جدول 6 آورده شده است.

جدول 6: مقایسه حداکثر نیروی حاصل از تحلیل عددی نمونه‌های دارای بازشو در مقایسه با نمونه S2

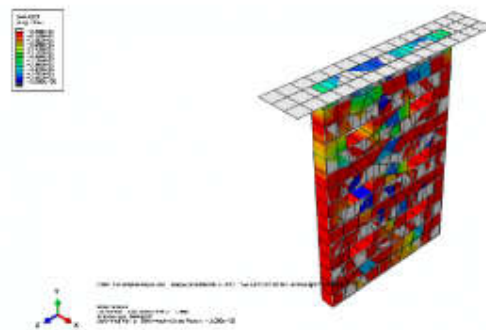
نمونه	بار نهایی حاصل از مطالعه عددی		بار نهایی نسبت به نمونه S2	
	Push (kN)	Pull (kN)	Push (kN)	Pull (kN)
S2	۲۳۶٫۳۴	۲۶۸٫۵	۱	۱
S2-4	۲۰۹٫۷۸	۲۳۱٫۱	۰٫۸۸	۰٫۸۶
S2-5	۱۷۰٫۳۲	۱۹۹٫۸	۰٫۷۲	۰٫۷۴
S2-6	۱۵۲٫۷	۱۶۸٫۹۸	۰٫۶۴	۰٫۶۳

همانطور که از جدول 7 مشخص است، نمونه S2-4 دارای 3 عدد بازشو به ابعاد 200 در 100 دارای 3 عدد بازشو به ابعاد کمتر نسبت به نمونه S2 است. نمونه S2-5 دارای 6 عدد بازشو به ابعاد 200 در 100 حدودا دارای 27 درصد بار نهایی کمتر نسبت به نمونه S2 است. نمونه S2-6 دارای 9 عدد بازشو به ابعاد 200 در 100 حدودا دارای 36 درصد بار نهایی کمتر نسبت به نمونه S2 است.

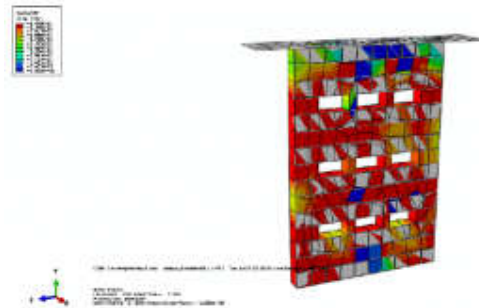
بررسی ترک خوردگی نمونه های دیوار برشی بتنی در بارگذاری چرخه ای در اشکال زیر ترک خوردگی نمونه های دارای بازشو نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود الیاف پلیمری مانع گسترش ترک خوردگی شده اند.



شکل 13 : ترک خوردگی حاصل از تحلیل عددی نمونه S2-4



شکل 14 : ترک خوردگی حاصل از تحلیل عددی نمونه S2-5



شکل 15 : ترک خوردگی حاصل از تحلیل عددی نمونه S2-6

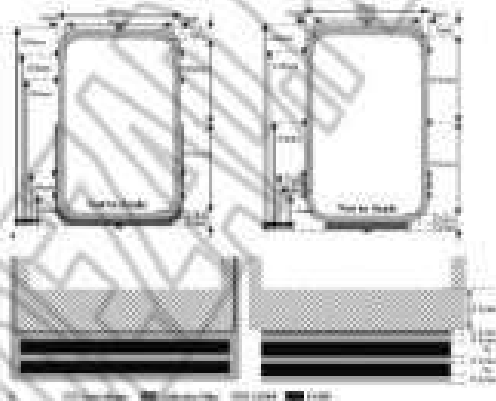
### نتیجه گیری

آنالیز المان محدود دیوارهای برشی بتن مسلح تقویت شده با FRP بدون بازشو و با بازشو با استفاده از نرم افزار Abaqus ارائه گردید. ابعاد، تکیه گاه های انتهایی و مشخصات مدل های دیوار برشی با مشخصات دیوارهای مربوط به مطالعه آزمایشگاهی یکسان می باشد. از مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی می توان به نتایج مهم زیر اشاره نمود :

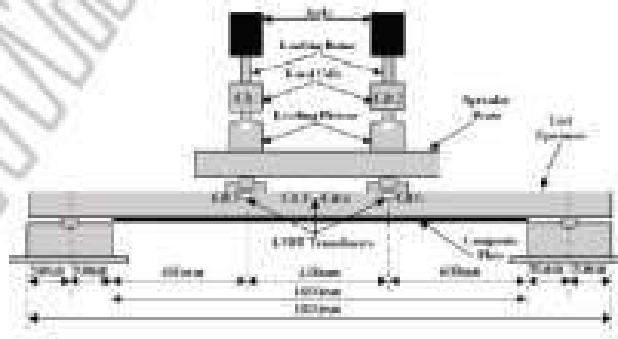
1. همان طور که دیده می شود، بار نهایی به دست آمده از تحلیل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای تطابق نسبتاً خوبی برای کلیه دیوارها می باشد.

2. نتایج عددی همانند نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از مواد FRP سبب افزایش مقاومت نهایی و جابجایی مربوطه در دیوارهای تقویت شده در مقایسه با دیوارهای تقویت نشده می گردد.
  3. نتایج عددی نشان داد با افزایش تعداد بازشو در هر ردیف بار نهایی دیوار کاهش یافته است.
  4. حل های عددی علاوه بر نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که جهت قرارگیری الیاف تأثیر زیادی در افزایش مقاومت نهایی و جابجایی مربوطه دارد.
  5. سطح زیر نمودار هیستریزس نمونه S2 بیشتر از نمونه S1 است. بنابراین انرژی که سازه S2 جذب می کند، بیشتر است پس میزان شکل پذیری سازه S2 بیشتر است. همچنین در این دو نمونه نمودار هیستریزس متقارن است. بنابراین این دو سازه عملکرد مناسبی در برابر زلزله دارد.
  6. سطح زیر نمودار هیستریزس نمونه های مقاوم سازی شده با الیاف پلیمری بیشتر از نمونه S1 است، بنابراین انرژی که سازه های مقاوم سازی شده جذب می کند، بیشتر است و میزان شکل پذیری سازه های مقاوم سازی شده بیشتر است و با توجه به اینکه همه نمودارهای هیستریزس متقارن است بنابراین این سازه ها عملکرد مناسبی در برابر زلزله دارند.
  7. بار نهایی نمونه S2-4 با 3 عدد بازشوی مربعی به ابعاد 200 در 100 میلی متر 13 درصد کمتر از بار نهایی نمونه S2 است.
  8. با توجه به شکل فوق بار نهایی نمونه S2-5 با 6 عدد بازشوی مربعی به ابعاد 200 در 100 میلی متر 27 درصد کمتر از بار نهایی نمونه S2 است.
  9. بار نهایی نمونه S2-6 با 9 عدد بازشوی مربعی به ابعاد 200 در 100 میلی متر 36.5 درصد کمتر از بار نهایی نمونه S2 است.
- زوال سازه های فولادی علت های گوناگونی می تواند داشته باشد اما یکی از فاکتورهای محتمل خوردگی می باشد . افزون بر خوردگی، مسائل دیگر نظیر خستگی، افزایش بار بهره برداری و عدم نگهداری مناسب، در بسیاری از حالت ها ممکن است اعضای اصلی سازه را دچار آسیب کنند که در چنین حالاتی مقاوم سازی بسیار اقتصادی تر از ساخت مجدد کل سازه می باشد.
- یک روش برای افزایش باربری سازه های فولادی جوش دادن یا چسباندن ورق های فولادی می باشد. این روش مشکلات بسیاری را به همراه دارد، نظیر نیاز به تجهیزات بالابر برای جایگذاری ورق های سنگین فولادی و پیچیدگی فرآیند جوشکاری و چسباندن. از این گذشته جوشکاری می تواند باعث تولید تنش های پس ماند در مواد و بروز مسائل خستگی شود. خواص مکانیکی و خستگی ممتاز پلیمر فیبر مسلح شده ای کربن آن را جایگزین بسیار مناسبی برای مقاوم سازی و بهسازی شاه تیر فولادی پل ها نموده است. کامپوزیت های CFRP با مدول بالا مدول الاستیسیته ای برابر با فولاد دارند که باعث می شود افزایش باربری قابل توجه، پس از تسلیم فولاد رخ دهد. با استفاده از کامپوزیت های CFRP با مدول بسیار بالا که مدول الاستیسیته ای بسیار بیشتر از فولاد دارند، می توان به افزایش باربری قابل توجهی حتی پیش از تسلیم فولاد دست یافت اما باید خاطر نشان کرد که شکل پذیری این الیاف بسیار کم است. مشکل دیگر به هنگام تماس فولاد و CFRP در حضور یک الکترولیت تشکیل پیل الکتریکی و خوردگی فولاد است. اگر این الکترولیت آب دریا باشد کامپوزیت CFRP نیز تأثیر پذیرفته و سطح آن تاول می زند. برای غلبه بر این مشکل می توان یک لایه از پلیمر فیبر شیشه مسلح شده (GFRP) بین فولاد و CFRP قرارداد تا از تماس مستقیم این دو ماده جلوگیری شود. مزیت دیگر این کار بالاتر رفتن مقاومت شکست اتصال می باشد. علت این امر تغییر تدریجی در تنش برشی است، هنگامی که بار از فولاد و از طریق لایه ی چسب و GFRP به کامپوزیت CFRP منتقل می شود. فوتیو و همکارانش اثربخشی انتقال تنش به وسیله ی اضافه کردن یک لایه GFRP بین دو ماده با سختی بالا که توسط یک پلیمر با سختی کمتر به یکدیگر چسبانده شده اند، را

اثبات کرده‌اند. در این مقاله آزمایش انجام شده به وسیله‌ی فوتیو و همکارانش توسط نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS مدل‌سازی شده و نتایج آزمایش و مدل‌سازی باهم مقایسه شده‌اند.



شکل ۱ الف- نمای شعاعی تکد ترها [۱] ب- بی‌دقت روی هم تطبیق لایه‌های FRP [۲]

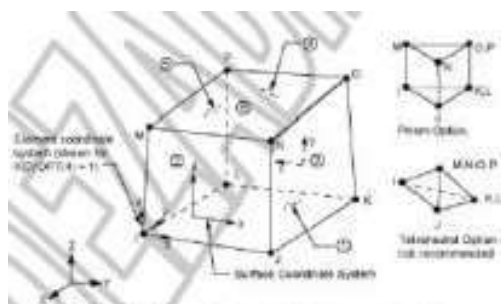


شکل ۲- چگونگی آزمون تیر [۱]

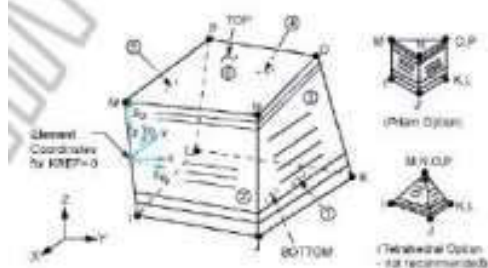
آزمایش-مقاوم-سازی-الیاف-شیشیه

#### مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی تیر فولادی از المان‌های Solid 45 و برای مدل‌سازی ورقه‌های FRP از المان‌های Solid 46 استفاده شده است. المان‌های Solid 45 برای مدل‌سازی سه‌بعدی سازه‌های جامد بکار می‌رود. این المان به وسیله‌ی هشت گره تعریف می‌شود، که هر گره دارای سه درجه آزادی می‌باشد: جابجایی در جهت‌های گره‌های  $x, y, z$ . این المان دارای قابلیت مدل‌سازی تغییر شکل پلاستیک، خزش، تورم و برآمدگی، سخت‌شوندگی تنش، خیزهای زیاد، و کرنش‌های زیاد را دارد. المان‌های Solid 46 نسخه‌ی لایه‌ی المان‌های Solid 45 می‌باشد، با این ویژگی که دارای قابلیت مدل‌سازی مواد ناهمسانگرد نیز می‌باشد. این المان برای مدل‌سازی پوسته‌های ضخیم لایه‌ای و یا جامدات لایه‌ای، طراحی شده است و قابلیت مدل‌سازی 250 لایه را دارد. شکل 3 و 4 به ترتیب هندسه‌ی المان Solid 45 و Solid 46 را نشان می‌دهند. هر المان شبکه دارای بعد 5 میلی‌متر در راستای عرضی و 50 میلی‌متر در راستای طولی تیر می‌باشد و ضخامت هر المان به اندازه‌ی ضخامت هر لایه از مواد (فولاد یا FRP) می‌باشد. بدین ترتیب شبکه‌ی تیر فولادی دارای 2584 المان، شبکه‌ی CFRP دارای 768 المان و شبکه‌ی GFRP دارای 1152 المان در سیستم تخت و 1984 المان در سیستم U شکل می‌باشد. شکل 5 شبکه‌بندی تیر تقویت‌شده با سیستم تخت را نشان می‌دهد.



شکل ۳- هندسه‌ی المان سازه‌ای Solid 45 [A]



شکل ۴- هندسه‌ی المان سازه‌ای Solid 46 [A]

#### هندسه-المان-سازه

برای پیش‌بینی شکست در نرم‌افزار ANSYS سه معیار شکست از پیش تعریف شده وجود دارد که عبارت‌اند از:  
 معیار شکست بر اساس ماکزیمم کرنش  
 معیار شکست بر اساس ماکزیمم تنش

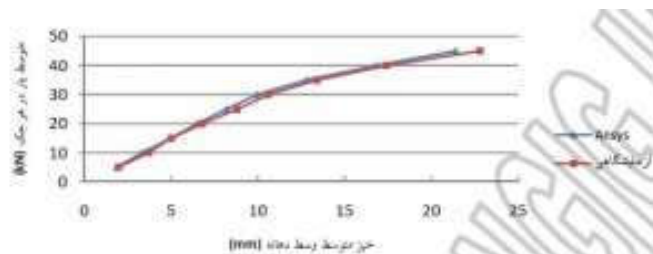
#### معیار شکست Tsai-Wu

افزون بر معیارهای شکست بالا، یک معیار شکست قابل تعریف به‌وسیله‌ی کاربر (user written) نیز وجود دارد. از آنجاکه نمی‌توان به‌صورت قطعی مشخص نمود، برای هر ماده‌ای چه معیار شکستی درست‌ترین پاسخ را می‌دهد، پس باید تمامی معیارهای شکست محتمل را امتحان کرده و معیار شکستی را که نزدیک‌ترین پاسخ را به پاسخ آزمایش دارد برگزید. در این مدل‌سازی برای کلیه‌ی بارهای وارده و در همه‌ی مدل‌ها هیچ‌گونه شکستی بر اساس هیچ‌کدام از معیار شکست‌های تعریف شده، مشاهده نشد.

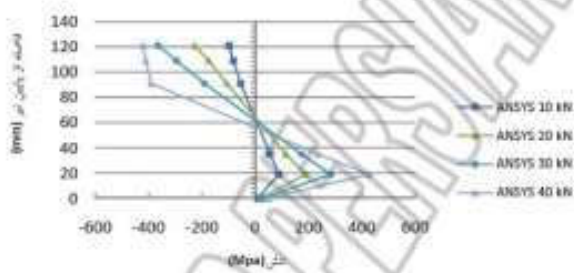
#### مقایسه‌ی نتایج

شکل 6 نمودار بار خیز تیر فولادی را نشان می‌دهد. شکل 7 نمودار بار-خیز تیر 1 را نشان می‌دهد. در تیر شماره 1 ضخامت هر لایه از CFRP، 0.6 میلی‌متر می‌باشد. گسیختگی تیر 1 در بار 45 KN در هر جک و در کامپوزیت CFRP به‌ویژه در منطقه‌ی خمش خالص رخ داد، ولی در مدل اجزای محدود ANSYS هیچ‌گونه گسیختگی در هیچ‌یک از مواد مشاهده نشد. در آزمایش مشاهده شده است که به دلیل استفاده از سیستم U شکل، پس از شکست CFRP نیز تا حدودی عملکرد مرکب بین تیر فولادی و سیستم بهسازی حفظ می‌شود. بار نهایی مقطع تقویت شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم‌سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل 8 توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره 1 را نشان می‌دهد.



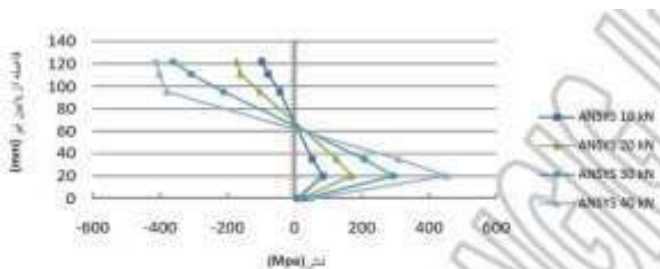


شکل ۲- نمودار بار-خیز تیر ۱



نتایج-مقاوم-سازی-الیاف-شیشه

شکل 9 نمودار بار-خیز تیر 2 را نشان می‌دهد. در تیر شماره 2 ضخامت هر لایه از CFRP، 1/2 میلی‌متر می‌باشد. در تیر 2 هیچ‌گونه گسیختگی رخ نداد و آزمایش به دلیل خیز بیش از حد متوقف شد، در مدل اجزای محدود ANSYS نیز هیچ‌گونه گسیختگی در هیچ‌یک از مواد مشاهده نشد. بار نهایی مقطع تقویت‌شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم‌سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل 10 توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره 2 را نشان می‌دهد.

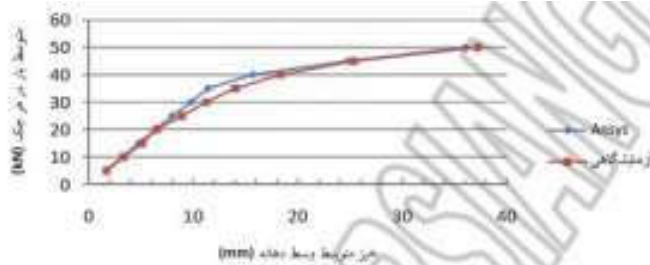


شکل ۱۰- توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۲

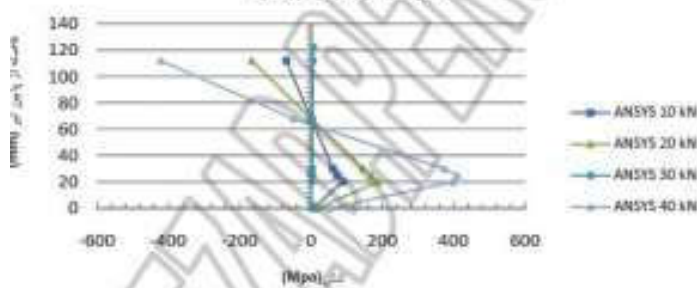
شکل 11 نمودار بار-خیز تیر 3 را نشان می‌دهد. در تیر شماره 3 ضخامت هر لایه از CFRP، 0/6 میلی‌متر می‌باشد. گسیختگی تیر 3 همانند تیر 1 در بار 45 KN در هر جک و در کامپوزیت CFRP رخ داد، ولی در مدل اجزای محدود ANSYS هیچ‌گونه گسیختگی در هیچ‌یک از مواد مشاهده نشد. در آزمایش مشاهده شده است که به دلیل استفاده از سیستم U شکل، پس از شکست CFRP نیز تا حدودی عملکرد مرکب بین تیر فولادی و سیستم بهسازی حفظ می‌شود. بار نهایی مقطع تقویت‌شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم‌سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل 12 توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره 3 را نشان می‌دهد.

شکل 13 نمودار بار-خیز تیر 4 را نشان می‌دهد. در تیر شماره 4 ضخامت هر لایه از CFRP، 1.2 میلی‌متر می‌باشد. در تیر 4 همانند تیر 2 هیچ‌گونه گسیختگی رخ نداد و آزمایش به دلیل خیز بیش از حد متوقف شد، در

مدل اجزای محدود ANSYS نیز هیچ‌گونه گسیختگی در هیچ‌یک از مواد مشاهده نشد. بار نهایی مقطع تقویت‌شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم-سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل 14 توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره 4 را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- نمودار بار- جزی تیر ۴



شکل ۱۴- توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۴  
توزیع-تنش-درمقاطع-بهینه-سازی-شده

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش و مدل‌سازی عددی نتایج زیر حائز اهمیت می‌باشند:

- 1- استفاده از HM-CFRP باعث شکل‌پذیرتر شدن تیر، جذب انرژی بیشتر، عدم وقوع شکست در لایه CFRP و افزایش 11 درصدی بارنهایی تیر در مقایسه با استفاده از UHM-CFRP شده است.
- 2- استفاده از سیستم بهسازی U شکل باعث شده است که حتی در تیرهایی که در آن‌ها لایه CFRP دچار شکست شده است، تیر تا حدودی عملکرد مرکب خود با سیستم بهسازی را حفظ نماید و شکل‌پذیری تیر تا حدودی حفظ شود.

3- با توجه به برازش بسیار خوب پاسخ‌های مدل اجزای محدود برنامه‌ی ANSYS با پاسخ‌های آزمایشگاهی، از مدل‌سازی انجام‌گرفته مقدار تنش در محل آسیب‌دیده‌ی تیر فولادی بال کششی به دست آمد. در تیر بهسازی شده‌ی شماره 10.46٪، تیر شماره 7.32٪، تیر شماره 3، 7.95٪، و تیر شماره 4، 4.81٪، مقدار تنش در بال کششی نسبت به تیر فولادی بهسازی نشده کاهش یافته است.

- 4- استفاده از سیستم بهسازی کامپوزیت کربن / شیشه معایب سیستم‌های پیشین بهسازی همچون جداشدگی، بلند شدگی، و شکل‌پذیری کم را برطرف کرده است.

به دنبال فرسوده شدن سازه‌های زیر بنایی و نیاز به تقویت سازه‌ها برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانه طراحی و لرزه‌ای، طی دو دهه اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌ها در سراسر جهان، با تکنیک‌های استفاده از مواد مرکب FRP به عنوان مسلح‌کننده خارجی صورت گرفته است. اطلاعات زیادی که از تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی اتصالات تیر-ستون بتنی بدست آمده، نشان‌دهنده وقوع شکست برشی در اتصال تحت بارهای لرزه

ای می باشد. جهت بررسی آزمایشگاهی اتصال بتن آرمه خارجی تقویت شده با FRP، دو نمونه با مقیاس 1:2 ساخته شده و تحت بارهای چرخه ای قرار گرفتند. در هر دو نمونه ضوابط شکل پذیری متوسط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان در مورد خاموت گذاری فشرده در ناحیه بحرانی تیر و چشمه اتصال رعایت نشده است. نمونه اول به عنوان مرجع ضعیف در نظر گرفته شده و نمونه دوم نیز با یک الگوی تقویت توسط ورق های FRP مقاوم سازی شد. پس از آزمایش های اتصالات، نتایج حاکی از آن بود که تقویت صورت گرفته در نمونه دوم باعث افزایش مقاومت و ظرفیت باربری اتصال شده است، همچنین از ایجاد شکست برشی در ناحیه بحرانی تیر و چشمه اتصال و انهدام و تخریب بتن در این نواحی جلوگیری شد.

برای تأمین شکل پذیری کافی اعضا و نیز اتصالات بتنی در برابر بارهای وارده، ضوابط ویژه ای در آئین نامه های مختلف وارد گردیده که رعایت آن ها در ساخت سازه های بتن آرمه ضروری می باشد و این در حالی است که بسیاری از ساختمان های بتن آرمه با سیستم قاب خمشی که در نیم قرن گذشته در سرتاسر دنیا احداث شده اند، به دلیل طراحی بر مبنای آئین نامه های قدیمی که ضوابط لرزه ای را منظور نکرده اند و یا به دلیل مشکلات اجرایی، ناحیه ویژه خاموت گذاری فشرده در تیر رعایت نشده که موجبات شکست برشی در این ناحیه حساس از تیر را فراهم می آورد و همچنین به دلیل کمبود آرماتورهای عرضی در این ناحیه، محصور شونده گی بتن فشاری به خوبی انجام نشده که در نتیجه شکل پذیری تیر و اتصال کاهش می یابد. از طرفی دیگر اتصالات تیر- ستون بتنی نیز در سازه های با سیستم قاب خمشی، در ناحیه چشمه اتصال و در ستون در زلزله های اخیر بیشترین خرابی و خسارت را داشته اند که این خسارات ناشی از ضعف اجرای اتصالات بتنی به دلیل عدم خاموت گذاری و یا ناکافی بودن خاموت های چشمه اتصال بوده و در نتیجه موجب ایجاد مفصل پلاستیک و ضعف برشی در اتصال می شود. لذا مقاوم سازی ساختمان ها برای جلوگیری از آسیب های احتمالی هنگام زلزله امری ضروری به نظر می رسد. از طرف دیگر پس از وقوع زلزله بسیاری از ساختمان های بتنی که ضوابط آرماتور گذاری عرضی را رعایت نکرده اند دچار آسیب های سازه ای شده و در اکثر موارد سطح کم این آسیب ها به گونه ای است که جایگزینی ساختمان موجود با یک ساختمان نوساز، امری اقتصادی نیست و می توان با یکی از تکنیک های ترمیم با هزینه های به مراتب کمتر، سازه ساختمان را دوباره جهت تحمل بارهای لرزه ای آماده ساخت.

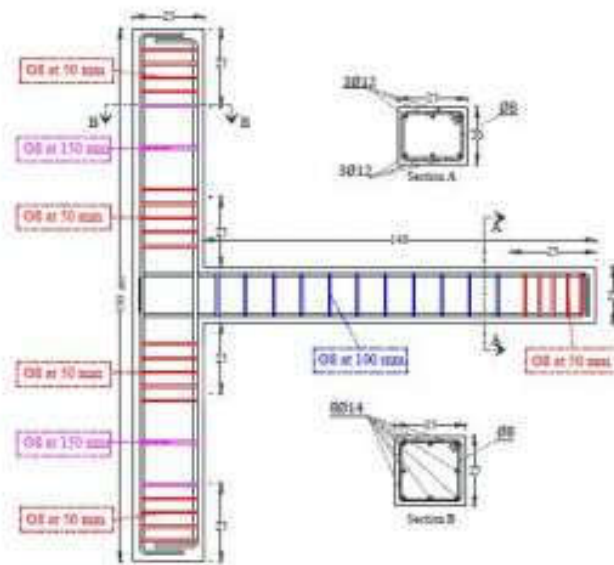
بنابراین در این مطالعه یک روش مقاوم سازی پیشنهادی با ورق های FRP برای تقویت این نوع اتصالات ضعیف ارائه می شود تا میزان تاثیر این روش مقاوم سازی بر کاهش آسیب های ناحیه چشمه اتصال و نواحی بحرانی تیر و ستون بررسی شده و محل تشکیل مفصل پلاستیک و قابلیت جابجایی آن از ناحیه چشمه اتصال و بر تیر در نمونه مرجع ضعیف، به فاصله ای دورتر در نمونه مقاوم سازی شده بررسی می شود. ضمناً وضعیت شکست برشی در ناحیه بحرانی تیر و میزان شکل پذیری ناحیه اتصال، در نمونه مرجع ضعیف و نمونه تقویت شده بررسی و مقایسه می شود. دو اتصال تیر- ستون خارجی بتن آرمه طراحی، ساخته و سپس تحت بار جانبی چرخه ای تا ظرفیت باربری نهایی مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه اول به عنوان نمونه مرجع و نمونه دیگر نیز به عنوان نمونه تقویت شده با ورق های FRP در نظر گرفته شدند. سپس رفتار کلی و موضعی این دو اتصال مشاهده شد و پارامترهای مهمی همچون ظرفیت باربری و شکل پذیری آنها مورد ارزیابی قرار گرفت.

### جزئیات اتصالات

دردو اتصال ساخته شده در این کار آزمایشگاهی ضوابط شکل پذیری متوسط در مورد خاموت گذاری فشرده در ناحیه بحرانی تیر و چشمه اتصال رعایت نشده است. نمونه اول به عنوان مرجع ضعیف (WR) انتخاب شد و نمونه دیگر (RW1) نیز با الگوی مقاوم سازی مناسب توسط ورق های FRP، مقاوم سازی شد. اتصالات مورد نظر که یک اتصال خارجی را در طبقات میانی یک قاب دوبعدی شبیه سازی می کنند، با مقیاس 1:2 ساخته شده و ابعاد کلیه نمونه ها یکسان می باشد که در آن ها ستون اتصال به طول 1900 میلیمتر دارای مقطع مربعی به عرض 250 میلیمتر بوده و

تیر اتصال نیز به طول 1400 میلیمتر دارای مقطعی با ارتفاع و عرض 200 و 250 میلیمتر می‌باشد. ابعاد مقطع و آرایش میلگردهای نمونه‌ها در شکل 1 نشان داده شده که با توجه به آن از 8 عدد آرماتور با قطر 14 میلیمتر به عنوان آرماتور طولی در ستون استفاده شده و از 6 عدد آرماتور با قطر 12 میلیمتر به عنوان آرماتور کششی هم در بالا و هم در پایین تیر استفاده گردید. همچنین فاصله کلیه خاموت‌های تیر در هر دو نمونه در ناحیه بحرانی و در خارج از آن 100 میلیمتر می‌باشد که در نتیجه ضابطه خاموت گذاری فشرده در ناحیه بحرانی تیر رعایت نشده است. در ستون تمامی نمونه‌ها در ناحیه بحرانی فاصله خاموت‌ها 50 میلیمتر و در نواحی دیگر فاصله خاموت‌ها 150 میلیمتر می‌باشد در حالی که ضابطه خاموت گذاری فشرده ناحیه بحرانی ستون در مورد چشمه اتصال رعایت نشده و چشمه اتصال فاقد هر گونه خاموت می‌باشد.

WR: Weak Reference, RW1: Retrofitted Weak-1



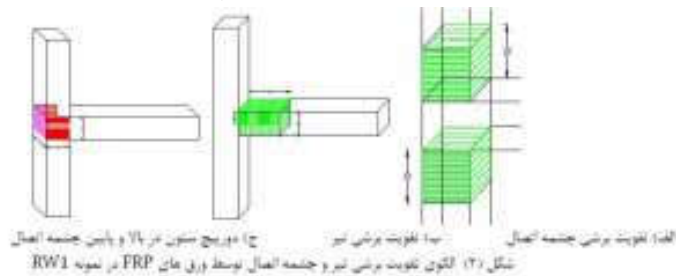
شکل (1) ابعاد مقطع و آرایش میلگردهای اتصالات WR و RW1

ابعاد-مقطع-آرایش-میلگرد-مقاوم-سازی

#### مقاوم‌سازی نمونه ضعیف با ورق‌های تقویتی FRP

در نمونه ضعیف با توجه به حذف خاموت‌های ناحیه چشمه اتصال و بررسی کارهای تحقیقاتی پیشین انتظار می‌رود با شروع بارگذاری، ترک‌های قطری در ناحیه چشمه اتصال بوجود آمده و با ادامه بارگذاری، چشمه اتصال کارایی خود را از دست داده و سازه ناپایدار و منهدم شود. بنابراین نمونه ضعیف RW1، قبل از بارگذاری طبق ضوابط آیین‌نامه ACI-440 و توسط ورق‌های FRP مقاوم‌سازی می‌شود. طرح تقویت در این نواحی به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که از ایجاد و گسترش ترک‌های برشی 45 درجه و توسعه خرابی در این نواحی مهم جلوگیری شده و امکان باربری در تغییر مکان‌های بالاتر فراهم شود که این موجبات افزایش شکل‌پذیری در اتصال را فراهم می‌آورد. در شکل 2 الگوی تقویت تیر و چشمه اتصال در نمونه RW1 همراه با ابعاد مربوطه نشان داده شده است. از یک ورق U شکل بر روی چشمه اتصال که جهت الیاف آن موازی طول تیر بوده، استفاده می‌شود که عرض آن 20 سانتیمتر (برابر ارتفاع تیر) و طول آن نیز 75 سانتیمتر (سه برابر بعد ستون) می‌باشد (الف). همچنین در طرح تقویت تیر از یک ورق U شکل در زیر تیر که دو وجه کناری یا جان تیر و سطح زیرین تیر را پوشانده، استفاده می‌شود که جهت الیاف آن در راستای عمودی می‌باشد. این ورق علاوه بر افزایش ظرفیت برشی تیر، ویژگی محصور کنندگی ناحیه بتن فشاری قسمت زیرین تیر را

نیز دارد. همچنین صفحات U شکل طوری در بالا و پایین تیر نصب می شوند که هیچ گونه همپوشانی بر روی یکدیگر نداشته و به عبارت دیگر از ایجاد دورپیچ در تیر جلوگیری شود که لبه های این دو ورق U شکل باید در نصف ارتفاع در دو طرف تیر با یکدیگر تلاقی کنند. ورق های U شکل مورد نظر دارای عرض 40 سانتیمتر ( برابر طول ناحیه بحرانی تیر) و طول 45 سانتیمتر ( برابر مجموع عرض و دو نیم ارتفاع تیر) می باشند. در این نمونه پیش بینی می گردد با بهره گیری از دورپیچ ستون، آرماتورهای تیر بتوانند رفتار غیرارتجاعی بیشتری از خود نشان دهند و شکل پذیری اتصال افزایش یابد. بنابراین همانطور که در شکل ج) نشان داده شده از دو عدد دورپیچ ستون در بالا و پایین چشمه اتصال که جهت الیاف آن به صورت افقی و در راستای طول ورق بوده استفاده می شود که دارای عرض 35 سانتیمتر و طول 110 سانتیمتر ( برابر محیط مقطع ستون به اضافه 10 سانتیمتر برای همپوشانی لبه های ورق به منظور دورپیچ کردن آن) می باشند. در شکل 3 نمونه تقویت شده RW1 پیش از انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۳) نمونه تقویت شده RW1 پیش از انجام آزمایش

لگوی-تقویت-نمونه-های-مقاوم-شده

### خصوصیات مصالح

مقاومت استوانه ای استاندارد 28 روزه بتن به کار رفته در اتصالات 35 مگاپاسکال بود و میلگرد های طولی ستون های اتصالات دارای مقاومت تسلیم 510 مگاپاسکال و مقاومت نهایی 588 مگاپاسکال بود. میلگرد های طولی مورد استفاده در تیرهای اتصالات نیز دارای مقاومت تسلیم 444 مگاپاسکال و مقاومت نهایی 677 مگاپاسکال بود. الیاف FRP به کار رفته در تقویت اتصالات از الیاف کربنی (CFRP) بوده که نمونه ای از این الیاف در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین رزین بکار رفته در چسباندن ورق ها شامل دو قسمت رزین پایه (Base) و واکنش دهنده (Reactor) می باشد.



ب) ورق های FRP نصب شده بر روی اتصال



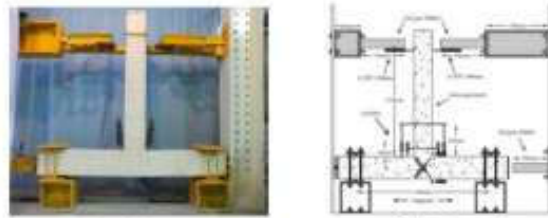
الف) صفحات الیاف FRP

شکل (۴) الیاف FRP که کار برده شده در تقویت اتصال RW1

### 1-1-17- مشخصات ساخته شده برای آزمایش اتصالات و ابزارهای اندازه گیری و ثبت اطلاعات

در شکل 5 جزئیات سیستم setup برای آزمایش اتصالات نشان داده شده است. به منظور تعیین کرنش چشمه اتصال و دوران تیر، تغییر مکان سنج های LVDT (مطابق شکل الف) در محل های نشان داده شده نصب گردید و از دو عدد LVDT نیز به منظور اندازه گیری تغییر مکان بالای تیر استفاده شد. همه ابزارهای اندازه گیری به منظور ذخیره سازی اطلاعات آنها، به دستگاه ثبت اطلاعات متصل شدند. از دو جک 200 کیلونیوتن که به صورت افقی در بالای نمونه قرار داده شده اند به منظور اعمال بار چرخه ای به انتهای تیر استفاده گردید. جهت اعمال بار محوری به ستون، یک جک 500 کیلونیوتن در انتهای ستون، در محل تکیه گاه غلطکی قرار داده شده و انتهای دیگر ستون به تکیه گاه مفصلی متصل شد. نیروی محوری ثابت 350 کیلونیوتن اعمال شده به ستون در طول آزمایش، 20 ظرفیت باربری محوری اسمی ستون بوده که به وسیله رابطه زیر محاسبه می گردد.

که در آن Ag سطح مقطع ناخالص مقطع ستون و Ast سطح مقطع کل فولادهای ستون می باشد. فاصله محل اعمال نیروی افقی به انتهای تیر تا بر ستون 1250 میلیمتر می باشد. نیروی افقی اعمالی به تیر به صورت کنترل تغییر مکان با سه چرخه در هر دریفتم بوده که با دریفتم 0.5٪ با تغییر مکان نظیر 6.25 میلیمتر آغاز گردید تا ترک های الاستیک خمشی نمایان گردند. در نهایت بارگذاری تا دریفتم 8٪ و تغییر مکان نظیر 85 میلیمتر ادامه پیدا کرد که در الگوی بارگذاری چرخه ای افزایشی، بارگذاری تا دریفتم 8٪ و تغییر مکان نظیر 85 میلیمتر ادامه پیدا کرد.

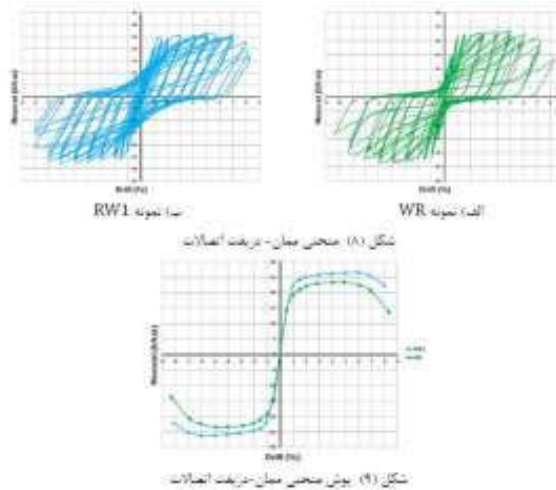


شکل (5) جزئیات Set-Up آزمایش

جزئیات-آزمایش

### 1-1-18- نتایج اولیه

مقادیر ممان متناظر با لحظه جاری شدن آرماتورهای طولی تیر My، ممان حداکثر Mmax و ممان نهایی Mu) متناظر با تغییر مکان حداکثر اتصال قبل از گسیختگی) برای هر یک از نمونه ها و نیز درصد افزایش این مقادیر در نمونه RW1 نسبت به نمونه مرجع ضعیف WR در جدول 1 آورده شده است. منحنی هیستریزس ممان- دریفتم نمونه های RW1 و WR تا دریفتم 8 در شکل 8 نشان داده شده است. پوش منحنی ممان- دریفتم اتصالات در شکل 9 نشان داده شده و با هم مقایسه شده اند. میزان شکل پذیری اتصالات بر اساس نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان جاری شدن تعریف می گردد که تغییر مکان نهایی برابر کمترین مقدار بین تغییر مکان نهایی و تغییر مکان نظیر 15 درصد افت بار حداکثر در نظر گرفته می شود.



منحنی-مقاوم-سازی-پوش

### تاثیر مقاوم‌سازی نمونه های ضعیف با ورق های FRP

وضعیت خرابی ها و خسارات بوجود آمده در دو اتصال WR و RW1 در شکل 10 نشان داده شده که با توجه به آن در اتصال مرجع ضعیف WR، چشمه اتصال دچار ترک خوردگی های شدید شد به طوری که تخریب و ریزش بتن در وجه زیرین چشمه اتصال مشاهده گردید. ضمناً ترک های خمشی شدید در بر اتصال تیر به ستون مشاهده شد به طوری که سطح مقطع بتنی تیر در بر اتصال، کاملاً از روی ستون جدا شد (ف). در اتصال RW1 نیز در تیر ترک خوردگی خمشی قابل توجه در بر اتصال تیر به ستون به وقوع پیوست و در طول تیر و در بالای قسمت تقویت شده، ترک های خمشی جزئی مشاهده شد. در پایان آزمایش، ترک خمشی در تمام سطح مقطع تیر گسترش یافته بود بنابراین با الگوی تقویت بکار رفته در مقاوم‌سازی این اتصال، این آسیب‌های اساسی در اتصال ضعیف برطرف شدند.



شکل (10) وضعیت خرابی های اتصالات WR و RW1 در پایان آزمایش

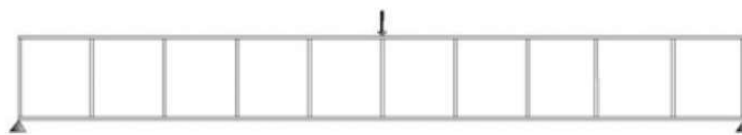
### وضعیت خرابی-در-پایان-آزمایش

شکل وضعیت خرابی های اتصالات WR و RW1 در پایان آزمایش مطابق شکل 8 مشاهده می‌شود منحنی ممان-دریفت اتصال WR دارای جمع شدگی قابل توجهی بیشتری می‌باشد و نیز برای مقایسه جمع شدگی منحنی ها، عرض منحنی ممان-دریفت اتصال WR در مبدا برابر 3 واحد می‌باشد، در حالی که این مقدار برای اتصال RW1 برابر 6.2 واحد می‌باشد که با توجه به این مقدار و نیز شکل ظاهری منحنی هیستریزس اتصال RW1 در مقایسه با عرض منحنی و نیز شکل ظاهری منحنی هیستریزس اتصال WR که لاغر و جمع شده می‌باشد، رفتار شکل پذیرتر و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بیشتر این اتصال تقویت شده نسبت به اتصال WR قابل دریافت می‌باشد.

### نتیجه گیری 1-1-19

مقاومت های تسلیم، حداکثر و نهایی در لحظه پایان بارگذاری نمونه RW1 نسبت به نمونه WR، به ترتیب 13 و 48 و 61 درصد افزایش می یابند که نشان دهنده بهبود مطلوب مشخصه های مقاومتی اتصال می باشند. در نمونه تقویت شده، افت بار در آخرین دریافت بارگذاری نسبت به بار حداکثر بسیار کمتر از نمونه ضعیف می باشد به طوری که نسبت بار نهایی به بار حداکثر در نمونه تقویت تقریباً 0.84 و برای نمونه ضعیف حدوداً 0.59 می باشد. شکل پذیری نمونه RW1 نسبت به نمونه WR، 16 درصد افزایش دارد که بوضوح موثر بودن الگوی تقویت بکار رفته در نمونه RW1 نتیجه می شود. در مجموع می توان این گونه بیان کرد که با توجه به مشکلات اجرائی و نیز تغییرات آئین نامه ای، اتصالاتی که در سازه ها از نوع WR اجرا شده اند، با بکار گیری الگوی مقاوم سازی بکار رفته در تقویت نمونه RW1، رفتار و مشخصه های مقاومتی و لرزه ای بهبود یافته ای در مقایسه با اتصالات ضعیف ( با نقیصه عدم خاموت گذاری فشرده در ناحیه بحرانی تیر و چشمه اتصال) کسب خواهند کرد.

### ارزیابی عددی المان محدود رفتار تیرورق های تقویت شده با CFRP



شکل ۲- تیرورق دو سر مفصل بارگذاری شده

جدول ۱- مشخصات هندسی تیرورق

	طول آزاد (دهانه (cm)	ارتفاع جان (cm)	ضخامت جان (cm)	عرض بال (cm)	ضخامت بال بالا (cm)	ضخامت بال پایین (cm)	عرض سخت کننده (cm)	ضخامت سخت کننده (cm)	فاصله سخت کننده (cm)
نمونه (۱)	۲۴۰	۲۵	۰.۱۲۵	۹	۰.۴	۰.۴	۳	۰.۱۲۵ و ۰.۴	۲۵ و ۲۰
نمونه (۲)	۲۴۰	۲۵	۰.۱۲۵	۹	۰.۶	۰.۴	۳	۰.۱۲۵ و ۰.۴	۲۵ و ۲۰
نمونه (۳)	۲۴۰	۲۵	۰.۱۲۵	۹	۰.۸	۰.۴	۳	۰.۱۲۵ و ۰.۴	۲۵ و ۲۰

تیر ورق یکی از اعضای سازه ای است که عناصر آن به منظور تامین کارایی بهتر از نیمرخ های نورد شده از ورق ساخته شود. استفاده از تیرورق زمانی اقتصادی خواهد بود که دهانه تیر به اندازه کافی بزرگ باشد. تیر ورقها را میتوان با اتصالات پیچی، پرچی و یا جوشی ایجاد کرد. از آغاز دهه 1950 میلادی که استفاده از صنعت جوشکاری توسعه یافت به تدریج تهیه ی تیرورق از ترکیب سه ورق جایگزین روش های قبلی شد. تیرورقها به دلایلی از جمله اصلاح ضرایب آئین نامه ها، کاهش سختی بدلیل خوردگی و نیز اضافه بار ناشی از وسایل نقلیه نیاز به تقویت خواهند داشت. روش های مختلفی از جمله جوش کردن ورق فولادی و پس کشیدگی اعضا برای مقاوم سازی این نوع سازه ها وجود دارد که در این میان روش نوین تقویت با مصالح FRP بدلیل داشتن مزایایی از جمله اجرای سریع و راحت، هزینه های نسبتاً پایین، افزایش عمر مفید سازه بعد از تقویت و همچنین امکان اجرای کار در محل هایی که دسترسی به سازه با مشکل مواجه است، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. کامپوزیت های FRP از الیاف با مقاومت بالا مانند کربن، شیشه و کولار که به صورت رزین ماتریسی در کنار هم قرار می گیرند، تشکیل شدند. کامپوزیت های کربنی CFRP خصوصیات مکانیکی بهتری از لحاظ مقاومت کششی و مدول الاستیسیته دارند به طوری که متوسط مقاومت کششی شان 10 برابر بیشتر از فولاد می باشد و دارای مدول



الاستیسیته کم میزان Gpa140 تا Gpa165 و مدول الاستیسیته متوسط در محدوده Gpa200 تا Gpa230 و مدول الاستیسیته بالا به میزان Gpa400 تا Gpa500 می باشند، از طرفی وزن مخصوصی معادل 20٪ وزن مخصوص فولاد دارند. در این تحقیق از ورق های CFRP با مدول الاستیسیته متوسط برای تقویت و افزایش ظرفیت تیورق های فولادی در زیر بال کششی استفاده شده است.

در سال های اخیر مطالعات متعددی درباره استفاده از لمینیت های CFRP برای مقاوم سازی سازه های فولادی انجام گرفته است. در سال 2002 در نیوکاسل پل فولادی Ashland بوسیله لمینیت های CFRP به عرض ۳۷ mm و ضخامت ۵.۲۵ mm تقویت شد. پل فولادی Acton در لندن جهت افزایش مقاومت خستگی که در معرض چرخه بارهای افزایش در اثر ترافیک زیاد بود با چسباندن لمینیت های CFRP به بال پایینی تیرها تقویت شد. همچنین پل Pottawattamie county در آمریکا جهت تقویت خمشی تیورق ها با چسباندن ورق های CFRP به بال کششی تقویت شده است. در دانشگاه بیرمنگام یک تحقیق در مورد تقویت بال کششی تیرهای I شکل غیر متقارن فشرده فولادی صورت گرفت که نتایج تحقیق افزایش 62 درصدی در ظرفیت خمشی مقطع را نشان داد.

نقش جان در نیمرخ خمشی تیر ورق ها عملاً متصل کننده دو بال و تحمل کننده ی برش موجود می باشد و لذا اختصاص ضخامت بالا برای جان به جز افزایش وزن نیمرخ نقشی ایفا نخواهد کرد و بدین جهت هر قدر ضخامت جان کمتر و بجای آن از ورق های تقویت شده استفاده شود، وزن تیورق کمتر خواهد بود.

اگر تیر ورقی به درستی طراحی شده باشد، یعنی دارای قطعات تقویتی قائم با فواصل صحیح باشد بعد از کمانش، جان تیر ورق مانند خرابایی عمل خواهد کرد که در آن جان کمانش یافته بمانند قطر های کششی و قطعات تقویتی قائم به عنوان اعضای قائم و فشاری خرابا رفتار خواهند نمود. به عبارتی می توان گفت که اگر تیورقی توسط دو بال و چندین ورق تقویتی قائم تقویت شده باشد درای استحکام پس کمانشی قابل ملاحظه ای خواهد بود که این امر ظرفیت نهایی تیورق را به طور چشمگیری افزایش می دهد.



جدول ۱- مشخصات هندسی تیورق

شماره	شماره کمانش	عرض	ضخامت بال	ضخامت بال	ضخامت بال	ضخامت بال	ضخامت بال	ضخامت بال
کمانش	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	۱	۳۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۲	۳۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

تیر-ورق-مشخصات-هندسی

### مشخصات مصالح

لمینیت های CFRP به صورت الیاف تک جهته می باشند. لمینیت ها از لحاظ مدول الاستیسیته در رده متوسط و از لحاظ مقاومت کششی در رده بالا قرار دارند. چسب مدل سازی شده اپوکسی نوع Sikadur-30 که مورد سفارش کارخانه سازنده لمینیت های CFRP است، برای چسباندن لمینیت ها به سطح تیورق ها استفاده می شود. چسب بکار رفته از مخلوط یک رزین اپوکسی با یک ماده سخت کننده با نسبت اختلاط 3 به 1 بدست می آید.

برای مدل سازی فولاد تیر ورق منحنی تنش کرنش بصورت الاستوپلاستیک دو خطی و از المان 4 گرهی S4R استفاده شده است. همچنین لمینیت CFRP با المان 4 گرهی S4R مدل شده و برای مدل سازی خرابی CFRP از گزینه

Hashin damage استفاده شده است. برای تعریف خصوصیات الاستیک لمینیت ها مشخصات به صورت Lamina فرض شده و المان های چسب به صورت المان Cohesive مدل شده است.

### نمونه آزمایشگاهی

نمونه 1 که برای نرم افزار المان محدود طراحی شده بود در آزمایشگاه ساخته شد و پس از set up کردن کرنش سنج ها و LVDT ها در محل های پیش بینی شده نصب شدند و به دستگاه Data logger متصل شدند. مهارهای جانبی در فواصل 40cm از هم بر روی مدل تعبیه شدند. در زیر جک بار گذاری یک Load cell برای کنترل بار وارده قرار داده شد. برای جلوگیری از لهیدگی موضعی هنگام اعمال بار متمرکز در زیر Load cell یک صفحه مربعی صلب به ضخامت 2cm و طول 9cm قرار گرفت. برای اعمال بار به صورت استاتیکی سرعت بار گذاری نمونه خیلی کم انتخاب شد. شمای کلی تیر شاهد و LVDT ها در شکل (3) آورده شده است.

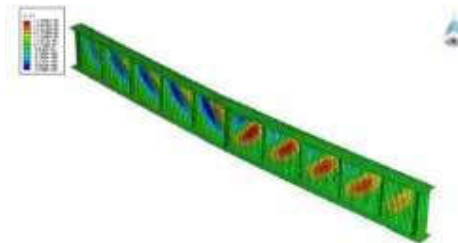


شکل ۳- تیر ورق دو سر مفصل بار گذاری شده

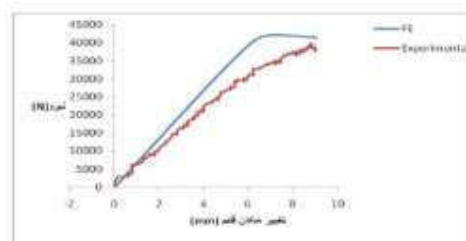
تیر-ورق-دو-سر-مفصل-بار-گذاری-شده

### تحلیل نتایج

بعد از تست نمونه در آزمایشگاه، نتایج مورد نیاز از Data logger استخراج شد و با نتایج حاصل از نرم افزار مقایسه گردیدند، شکل (5) مربوط به مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان قائم در این دو حالت میباشد. داده های آزمایشگاهی نیرو مربوط به قرائت Load cell و تغییر مکان مربوط به LVDT قرار داده شده در مرکز دهانه و بال پایینی می باشد و داده های نرم افزاری نیز از نقاط مشابه انتخاب گردیدند.



شکل ۴- مدل نرم افزاری بعد از تحلیل



شکل ۵- نمودار نیرو-تغییر مکان وسط تیر

مدل-نرم-افزاری-نمودار-تغییر-مکان

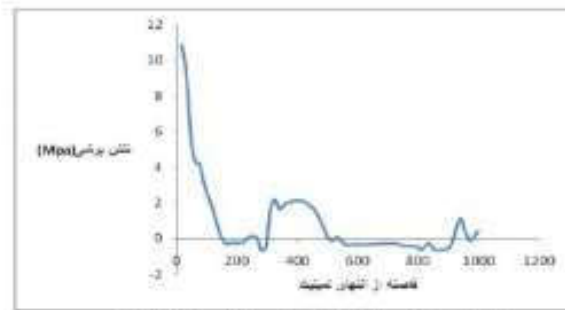
در شکل (5) با مقایسه دو نمودار و اختلاف سختی بین دو حالت، به نظر می رسد که علت این اختلاف وجود یک ناکاملی اولیه در محل استقرار بار متمرکز بر روی نمونه آزمایشگاهی است که در آزمایشات نیز منجر به اعمال نامتقارن بار بر نمونه گردید و از اوایل نمودار با جذب انرژی توسط بال فوقانی موجب کاهش سختی تیر شد. ناکاملی در نمونه آزمایشگاهی فقط 5٪ در ظرفیت نهایی اثر داشته و سختی سیستم را نیز کاهش می دهد. شکل (6) که مربوط به نمودار نیرو-تغییر مکان در راستای عمود بر جان در مرکز پانل های مرکزی است، موید تطبیق نتایج المان محدود با نتایج بدست آمده از آیین نامه ی طراحی سازه های فولادی AISC-LFRD می باشد.

با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای مربوط به نرم افزار المان محدود، آزمایشگاهی مربوط به نمونه 1 و آیین نامه طراحی سازه های فولادی AISC-LRFD، مشاهده می شود که هم خوانی خوبی بین نتایج وجود دارد که این می تواند دلیلی بر صحت نتایج حاصل از نرم افزار ABAQUS باشد.

#### بررسی عددی تاثیر تقویت بال کششی با لمینیت CFRP

برای بررسی تاثیر چسب، در حالت اول، نمونه (3) از جدول شماره (1) را با نرم افزار مدل سازی کرده و در حالت دوم همین نمونه را یک بار با اتصال CFRP بدون لغزش (Merge) و در حالت سوم با در نظر گرفتن لغزش، المان چسب را نیز در روند مدل سازی وارد می کنیم. بعد از بارگذاری و تحلیل مدل ها نتایج حاکی از آن بود که در حالت سوم ظرفیت باربری نسبت به حالت دوم مقدار ناچیزی کاهش یافته و نمودارها تقریباً روی هم هستند، ولی ظرفیت باربری آن از مدل حالت اول بیشتر است. در شکل (7) مقایسه ای میان ظرفیت باربری در سه حالت مذکور، تحت بارگذاری افزایشی Riks صورت گرفته است. از آنجایی که حالت سوم واقعی تر از حالت دوم می باشد ظرفیت باربری آن اندکی کمتر از حالت دوم می باشد در کل هر دو حالت دوم و سوم افزایش ظرفیت 19٪ را نسبت به حالت اول نشان می دهد.

از نتایج مهم این تحلیل دستیابی به نحوه توزیع تنش های برشی طولی در محل اتصال CFRP به تیورق است که از آن به عنوان تنش های چسبندگی نام برده می شود. با توجه به خروجی تحلیل حالت سوم نحوه توزیع این تنشها در عرض نوار CFRP، در قسمت انتهایی لمینیت بصورت شکل (8) است.



شکل ۸- توزیع تنش های برشی طولی در المان چسب

#### توزیع تنش-های-برشی

وجود یک تغییر ناگهانی در توزیع تنش ها در فاصله 30 cm از انتهای لمینیت به نظر میرسد که مربوط به نوع بار گذاری نقطه ای در این مدل باشد چون این تغییر ناگهانی در مرجع که مربوط به بارگذاری گسترده است دیده نشد. با این حال طبق شکل (8) مشاهده می شود که تمرکز تنش ها در انتهای لمینیت اتفاق می افتد که این تنشها عامل وقوع پدیده جداسازی می باشد. با بررسی بیشینه مقدار تنش برشی می توان گفت که ما جداسازی بین CFRP و تیورق نخواهیم داشت چون در این مدل مقاومت برشی چسب 18 Mpa میباشد که میتواند به سادگی تنش برشی 11 Mpa را تحمل کند.

## نتیجه‌گیری:

- با بررسی نمونه‌های تقویت شده، با ضخیم تر شدن بال فوقانی، درصد افزایش ظرفیت نهایی تیوروق مقاوم سازی شده بیشتر می شود.
- در مورد روند تغییرات سختی سیستم مقاوم سازی با افزایش ضخامت بال فوقانی دقیقاً نمی توان اظهار نظر کرد.
- با تقویت بال کششی، کمانش قطری جان تیوروق در بارهای کمتری نسبت به حالت تقویت نشده اتفاق می افتد.
- با بکار بردن لمینیت CFRP انعطاف پذیری در راستای قائم اندکی کاهش می یابد.
- مدل لایه چسب بین فولاد و لمینیت CFRP تاثیر چندانی در نتایج نداشت.
- نتایج نمونه آزمایشگاهی با دقت قابل قبول، موید نتایج آنالیز عددی و تئوری می باشد.

آغاز دهه شصت میلادی مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی آغاز گشت. یکی از اولین روش‌های مقاوم‌سازی دورگیری تیرها و ستون‌های بتنی با ورق‌های فولادی بود. این روش به دلایلی مانند اعمال وزن اضافی به سازه و سخت بودن اجرا امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیشنهاد دیگری که بعد از آن برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی ارائه گشت، استفاده از پلیمرهای الیاف مصنوعی (FRP) بود. اولین مقاله در رابطه با استفاده از این پلیمرها در سال 1973 ارائه گشت. اولین پل در سوئیس در سال 1986 با FRP مقاوم‌سازی گشت و به تدریج استفاده از این مصالح گسترش یافت به گونه‌ای که در آغاز هزاره سوم میلادی FRP تبدیل به مهم‌ترین مصالح مقاوم‌سازی در سطح جهان گردید. خواص بسیار مناسب پلیمرهای الیاف مصنوعی و سادگی اجرای آن باعث گردیده است که مهندسان تمایل بسیاری به استفاده از آن داشته باشند. علاوه بر این توان FRP در ترمیم سازه‌های بتنی در خمش و برش، همچنین توانایی در ترمیم سازه‌های بنایی و ساختمان‌های باستانی بر محیوبیت این مصالح افزوده است. در کنار همه مزایای فنی FRP قیمت تمام‌شده این مصالح نیز نسبتاً مناسب است. اگرچه امروزه FRP به پرکاربردترین مصالح مقاوم‌سازی در جهان تبدیل شده است، اما متأسفانه در ایران مهندسان از این مصالح شناخت کافی ندارند و از آن به صورت بسیار محدود استفاده می‌شود. شاید یکی از دلایل این امر عدم اهمیت مقاوم‌سازی در ایران باشد. به‌رحال بی‌تردید امروزه شناخت و ترویج فرهنگ مقاوم‌سازی و مصالح آن یکی از ضروری‌ترین مسائل مهندسی کشور ماست. در این تحقیق سعی گردیده است که وضعیت مقاوم‌سازی تیرهای T شکل تحت برش و خمش مورد بررسی قرار گیرد.

## خواص FRP

در حال حاضر FRP مصالحی است که معمولاً در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. گرچه اخیراً تحقیقاتی بر روی FRP به عنوان مسلح کننده اصلی بتن نیز انجام گرفته است اما بیشترین کاربرد اجرایی FRP تاکنون در شاخه مقاوم‌سازی بوده است. در این صورت این مصالح در محاسبات اولیه مقاومت سازه مورد محاسبه قرار نمی‌گیرند بلکه عموماً جهت افزایش طول عمر سازه و تعمیر یا بهسازی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه در ترمیم سازه‌های بنایی نیز از FRP استفاده شده است، اما عموم کاربرد آن در تیرها، ستون‌ها و اتصالات بتنی می‌باشد. در مجموع FRP بانام کامل Fiber Reinforced Polymer نوعی کامپوزیت است که به آن پلیمر الیاف مصنوعی نیز می‌گویند.

## کاربرد

برای مقاوم‌سازی به دو شکل لایه‌های پیوندی و میله‌های نزدیک به سطح (NSM) می‌باشد. هر دو مورد فوق از نظر فنی غالب مشخصات بتن را تقویت می‌نمایند از جمله کارایی در کرنش‌های بالا را امکان‌پذیر می‌سازند و در برابر خستگی مقاومت زیادی ایجاد می‌کنند و دارای عمر مناسب می‌باشند. اغلب سازه‌هایی که از اوایل دهه هشتاد میلادی با FRP بهسازی شده‌اند نتایج قابل قبولی را ارائه داده‌اند بطوریکه امروزه بسیاری از سازه‌های حیاتی با FRP

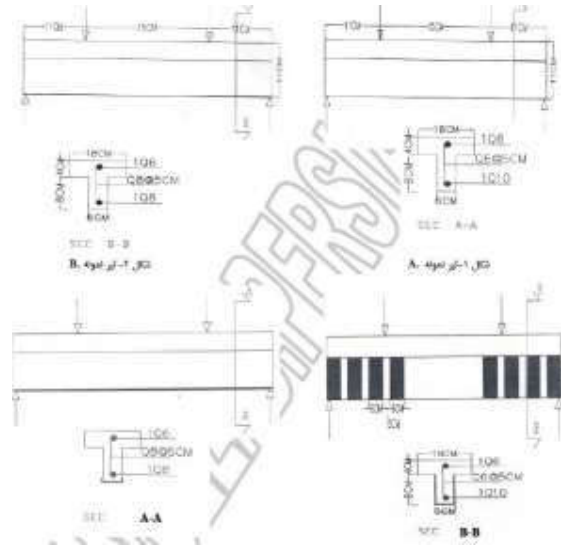
مقاوم‌سازی می‌شوند. میله‌های نزدیک به سطح میله‌هایی از جنس FRP هستند که در نزدیکی سطح بتن جاسازی می‌شوند اما لایه‌های پیوندی مانند باند دور تیر یا ستون بتنی پیچیده می‌شوند. این لایه‌ها از دو بخش متمایز الیاف و ماتریس تشکیل شده‌اند. الیاف عضو باربر سازه بوده و بسته به نوع، قطر فیبر آن 5 تا 25 میکرون می‌باشد و ماتریس الیاف‌ها را در محل و آرایش مطلوب نگه می‌دارد. الیاف‌ها که فاز تقویت‌کننده هستند قسمت اصلی مقاوم‌سازی را بر عهده‌دارند و در واقع قسمت اعظم نیرو را تحمل می‌نمایند و بنابراین الیاف‌ها بایستی استحکام کششی بالایی داشته باشند. اما ماتریس پلیمری است که الیاف را در برمی‌گیرد و ضمن حفاظت الیاف از صدمات فیزیکی و شیمیایی، کار انتقال نیرو را به الیاف انجام می‌دهد. ضمناً همانند یک چسب الیاف را کنار هم نگه می‌دارد و البته گسترش ترک را محدود می‌نماید. عموماً به ماتریس قبل از سخت شدن رزین می‌گویند. اما جدا از بحث مقاوم‌سازی اخیراً کاربرد FRP به‌عنوان مسلح‌کننده اصلی بتن موردنظر محققان واقع گردیده است.

### تقویت برشی و خمشی توسط الیاف

گسیختگی‌های برشی و خمشی از مهم‌ترین مدهای گسیختگی برای تیرهای تقویت نشده می‌باشند. گسیختگی خمشی عموماً بر گسیختگی برشی ارجح می‌باشد. زیرا که اولی نرم و دومی ترد می‌باشد. گسیختگی نرم اجازه می‌دهد که تنش بار توزیع شود و این خود می‌تواند هشدار برای کاربر باشد در صورتی که گسیختگی ترد باشد، می‌تواند به‌صورت ناگهانی سبب فاجعه گردد. در مقاوم‌سازی خمشی به کمک ورقه‌های خارجی FRP، نشان داده شده که شکل‌پذیری تیر نسبت به حالت مقاوم‌سازی نشده بسیار کمتر می‌باشد. با این وجود این مد گسیختگی از گسیختگی برشی نرم‌تر می‌باشد بنابراین یک تیر مقاوم‌سازی شده باید دارای ظرفیت برشی کافی بوده به‌طوری که به ظرفیت خمشی برسد. زمانی که یک تیر بتن‌آرمه در برش ناقص باشد یا ظرفیت برشی آن از ظرفیت خمشی تیر کمتر باشد پس از انجام مقاوم‌سازی خمشی، مقاوم‌سازی برشی باید مورد توجه قرار گیرد. باید دانست که اندازه‌گیری ظرفیت برشی تیر مقاوم‌سازی شده بسیار مهم می‌باشد مقاوم‌سازی برشی، برخی مواقع نقشی کلیدی از استراتژی مقاوم‌سازی برای ساختمان‌های بتن‌آرمه را بازی می‌کند. اخیراً استفاده از نوارهای FRP برای تقویت خمشی و برشی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در کنار سایر نتایج عالی FRP ها از جمله مقاومت در مقابل خوردگی و مقاومت بالا در مقابل وزن کم انعطاف‌پذیری FRP ها جهت فیت شدن با سایر شکل‌ها و گوشه‌ها همواره برای مقاوم‌سازی سودمند واقع شده‌اند مطالعات بر روی مقاوم‌سازی برشی از سال 1990 شروع شده است.

### 20-1-1- نمونه‌های آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی رفتار تیرهای T شکل بتنی تقویت‌شده به الیاف CFRP 4 تیر بتنی ساخته و تحت آزمایش قرار گرفتند، نمونه‌های آزمایشگاهی به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل تیرهای A1 و A2 بودند که این تیرها دارای ضعف خمشی بودند. در گروه دوم تیرهای B1 و B2 بودند که ضعف این تیرها در برش بود. شکل‌های (1) تا (4) تیرهای A1 و B1 بدون تقویت مورد آزمایش قرار گرفتند و تیرهای A1 و B2 بسته به نیاز سازه‌های توسط ورق‌های CFRP تقویت شدند. بارگذاری توسط جک 10 تنی تا مرحله شکست انجام گرفت. اطلاعات مربوط به کرنش و تغییر مکان وسط در هر مرحله از بارگذاری اندازه‌گیری و ثبت گردید. هدف از انجام این آزمایش‌ها، تعیین خمشی و برشی تیرهای تقویت‌شده با ورق‌های CFRP با رزین مناسب تحت بار استاتیکی و همچنین بررسی نوع شکست و علل شکست تیرها قبل و بعد از تقویت بود.



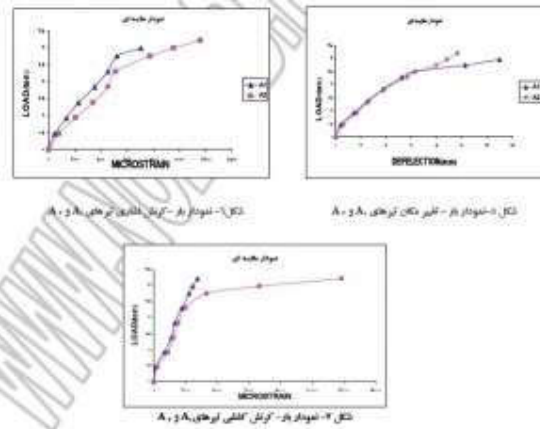
نمونه های تیر-T شکل-مقاوم سازی-FRP

پس از چسباندن ورق های تقویتی، حداقل باید یک هفته منتظر ماند تا چسب به خوبی خود را بگیرد و بعد عمل بارگذاری را انجام داد که برای انجام این آزمایش 10 روز پس از تقویت اقدام به بارگذاری گردید. سیستم بارگذاری بر روی تیر A 2 دقیقاً با تیر A1 به یک شکل انجام گرفت. در این تیر نیز نتایج کرنش سنج و تغییر مکان وسط تیر بعد از هر مرحله بارگذاری ثبت شدند. که در شکل های (5) تا (7) مشخص شده است. اولین ترک ایجاد شده در این تیر از نوع خمشی و به مقدار  $1.3 \text{ ton}$  بوده که بیش از 2 برابر تیر A 1 می باشد. همچنین اولین ترک برشی آن نیز در بار  $1.3 \text{ ton}$  صورت گرفت که تقریباً برابر با تیر A 1 می باشد. شکست این تیر در بار  $3.4 \text{ ton}$  اتفاق افتاد و نوع شکست آن نیز به صورت برشی بود و امتداد شکست آن از محل بارگذاری شده به صورت مورب تا نزدیکی های تکیه گاه ادامه می یابد.

تیرهای گروه A

تیر A1: طراحی این تیر به صورتی انجام شد که ضعف این تیر در خمش باشد. مقاومت 28 روزه نمونه مکعبی آن 20 مگا پاسکال بود.

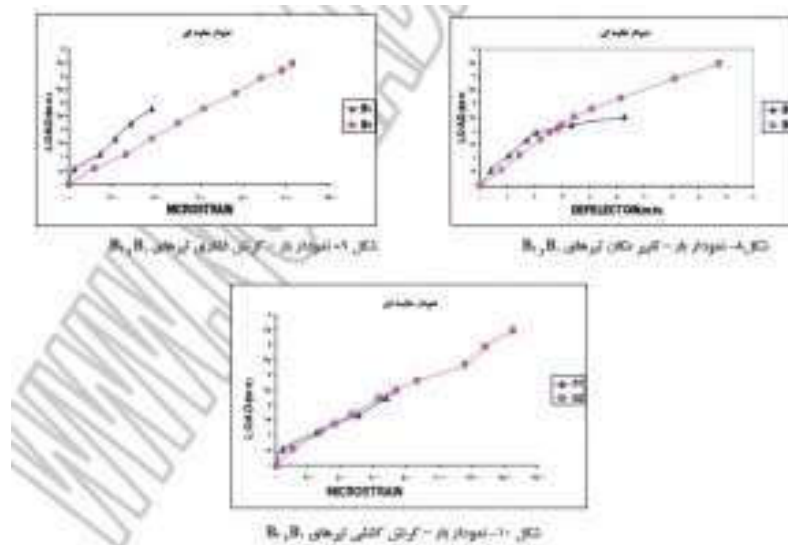
بارگذاری بر روی تیر A1 اعمال گردید. اولین ترک خمشی این تیر در بار  $0.60 \text{ ton}$  مشاهده شد و با افزایش مقدار بار به این تیر، ترک های خمشی دیگری نیز در اطراف اولین ترک ایجاد گردید با ادامه بارگذاری، ترک های برشی نیز در تیر پدیدار شدند اولین ترک برشی در  $1.2 \text{ ton}$  به وجود آمد که با ادامه روند بارگذاری، تعداد ترک های برشی افزایش یافت و همچنین عرض ترک های خمشی هم به میزان قابل توجهی افزایش یافت تا اینکه در بار  $2.6 \text{ ton}$  این تیر گسیخته شد. شکست این تیر همان طور که انتظار می رفت از نوع خمشی بوده و به دلیل جاری شدن میلگردهای کششی صورت پذیرفت.



نمودار-بار-تغییر مکان-کرنشی-مقاوم-سازی

تیرهای گروه B:

تیر: B1 طراحی این تیر به صورتی انجام شد که ضعف آن در برش باشد. مقاومت 28 روزه نمونه مکعبی آن 180 مگا پاسکال بود. بارگذاری بر روی تیر B1، مطابق تیرهای قبل صورت گرفته که بار اولین ترک خمشی آن 1.01 ton می‌باشد. با ادامه روند بارگذاری، ترک‌هایی به صورت خمشی، برشی در بار 1.3 ton ایجاد گردید که با افزایش بار، ترک‌های برشی نیز در تیر ایجاد گردید. با ادامه روند بارگذاری، به تعداد ترک‌های برشی اضافه گردید تا اینکه این تیر در بار 2.6 ton گسیخته شد؛ و شکست این تیر همان‌طور که انتظار می‌رفت از نوع برشی بود.



نمودار-مقاوم-سازی-تیر-B

نتیجه‌گیری

- عمل تقویت برشی بر روی تیرهایی انجام گردید که به لحاظ پایین بودن مقاومت فشاری از مقاومت کششی کمی برخوردار بودند، لذا در این تیرها مقاومت رزین اپوکسی از مقاومت کششی بتن بیشتر بوده و قبل از اینکه CFRP گسیخته شود CFRP همراه با لایه‌ای از بتن از تیر جدا می‌شود که این شکست

نامطلوب‌ترین نوع شکست تیرهای تقویت‌شده می‌باشد. علت این امر عدم استفاده از تمام ظرفیت برشی CFRP می‌باشد.

- شکل‌پذیری تیرهایی که تقویت خمشی و برشی بر روی آن‌ها انجام شد به مقدار اندکی کاهش یافت که این مقدار قابل صرف‌نظر کردن است.

- هرچه قدر مقاومت فشاری بتن بیشتر باشد افزایش مقاومت باربری بیشتر می‌باشد.

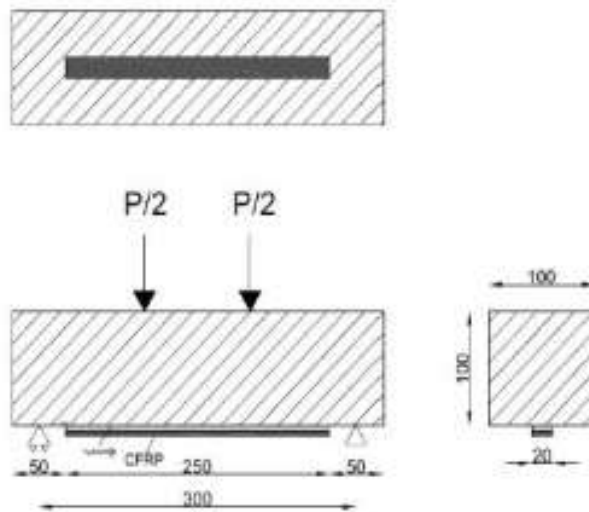
- تغییر شکل تیر تقویت‌شده خمشی تقریباً برابر با تغییر شکل تیر تقویت نشده خمشی بوده که این برخلاف انتظار می‌باشد که دلیل آن ضعف مقاومت بتن در تیر تقویت‌شده نسبت به تیر تقویت نشده می‌باشد.

در تیرهای تقویت‌شده برشی شکست به صورت ترکی که از نقطه بارگذاری شروع شده و تا نزدیکی تکیه‌گاه ادامه‌دار می‌باشد و در این شکست‌ها نزدیک‌ترین قسمت ورق CFRP به تکیه‌گاه از تیر جدا می‌شود که می‌بایست در نزدیکی‌های تکیه‌گاه تمهیدات خاصی در نظر گرفت.

جمله پیشرفت‌های اخیر در صنعت مقاوم‌سازی، استفاده از روکش‌های تقویت‌کننده پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) است که برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، فولادی، بئانی و حتی چوبی به کار گرفته می‌شود.

پذیرش روش مقاوم‌سازی با سیستم FRP ارتباط نزدیکی با سطح اعتماد مهندسان سازه، مسئولان و کارفرمایان به این روش دارد. اعتماد کافی می‌تواند از طریق انجام آزمایش‌های استاندارد و درک بهتر رفتار سازه‌های تقویت شده با FRP در شرایط مختلف بدست آید. درک درست از رفتار سازه در شرایط عادی، دمای بالا و دمای

پایین، برای پذیرش این روش ضروری است.



مشخصات-نمونه-تست

در سال 2003 میلادی، برای بررسی نیازهای تحقیقاتی در حوزه مواد FRP برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، کمیته‌ای تشکیل شد. در این بررسی‌ها مشخص شد که “دوام” و “مقاومت در برابر آتش” سیستم‌های FRP، نیازمند بررسی‌های جدی است. یکی از جنبه‌های “دوام” این بررسی‌ها که ارتباط نزدیکی با مقاومت در برابر آتش دارد، اثر دمای بالا بر رفتار سازه‌های تقویت‌شده با FRP است.



در مطالعه ای دیگر که برای شناسایی و اولویت بندی اطلاعات مهم مرتبط با دوام ورق ها و میلگرد های FRP انجام شد، مشخص شد که اطلاعات موجود در رابطه با سازه های تقویت شده با FRP، زمانی که در معرض دماهای بالا و یا چرخه های یخ و ذوب قرار می گیرند، بسیار اندک است.

در نشریه شماره 345 سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، اثر آتش سوزی روی سازه های تقویت شده با FRP بصورت یک بار ویژه بهشمار میرود که در آن سهم FRP در مقاومت، ناچیز در نظر گرفته میشود. این موضوع بدان معناست که پس از نبود FRP، سازه باید توانایی مقاومت در برابر بارهای وارده با ضرایب ایمنی مورد نظرا (ضرایب بار و مصالح) داشته باشد. اعتقاد بر این است که بدین ترتیب از ریزش ناگهانی سازه تقویت شده با FRP پس از بین رفتن یک باره چسبندگی بین بتن و FR (بطور مثال در هنگام آتش سوزی و یا خرابکاری) جلوگیری می شود.

این پیشنهاد ها، مقدار حداکثرافزایش مقاومت حاصله را به تفاوت ضرایب ایمنی مربوط به ترکیب بارهای ویژه و ترکیب بارهای نهایی محدود می کند. در مطالعات صورت گرفته، مشخص شده است که چسبندگی موجود بین بتن و لایه FRP، در نزدیکی و یا بالای دمای گذار شیشه ای چسب یعنی  $T_g$ ، از بین میرود. رفتار FRP های تقویتی میتواند تحت تاثیر تغییرات دمایی محیط بهره برداری، به دلیل اختلاف زیاد بین ضرایب انبساط دمایی بتن و FRP باشد. وجود این اختلاف، تنش های حرارتی در محل اتصال FRP با چسب و چسب با بتن را موجب می شود که بر رفتار سازه تاثیر می گذارد. علاوه بر این، مشخصات فاز های مختلف بتن، چسب، FRP و مرز بین آنها تحت تاثیر قرار می گیرند. گفته میشود که افزایش دما، تاثیرات منفی خاصی روی چسب موجود، حتی در دماهای پایین تر از دمای گذار شیشه ای چسب دارد.

هدف اصلی تحقیقاتی که نتایجش در این مقاله آورده شده است، درک صحیح از رفتار تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر و سخت، تحت شرایط دمایی بالا و نیز یخ زدگی بوده است که با بکارگیری تیر های بتنی و چسباندن ورق های CFRP و تعیین مقاومت نهائی آنها در خمش، نوع شکست این نمونه ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور 24 نمونه تیر بتنی بدون آرماتور به ابعاد  $100 \times 100 \times 350$  میلیمتر ساخته شدند. در این نمونه ها از سه رده مقاومتی بتن استفاده و سپس با CFRP سخت و انعطافپذیر بصورت خمشی تقویت شده و تحت سیکل های تغییر دمایی  $+50^\circ C, -20^\circ C$  و  $+80^\circ C$  قرار گرفته و بوسیله دستگاه آزمون خمشی 4 نقطه ای تست شده و با نمونه های شاهد قرار گرفته در محیط اتاق از نظر مقاومت نهایی، نوع شکست و غیره مقایسه شدند.

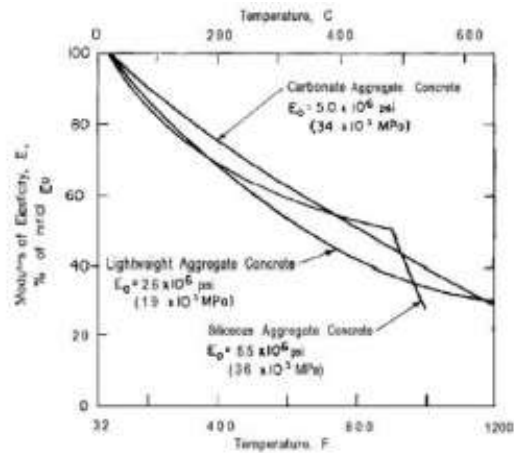
#### اثر گرما بر خواص مواد

یک سازه بتنی مقاوم شده با FRP از موادی مانند بتن، میلگرد، FRP و چسب تشکیل شده است. بعضی از این مواد بیشتر تحت تاثیر حرارت قرار میگیرند، بویژه مشخصات چسب بطور قابل توجهی حدود دمای گذار شیشه ای تغییر می کند. دمای گذار شیشه ای دمایی است که در آن مواد بیشکل مانند شیشه یا پلیمرهایی با جرم مولکولی بالا، از حالات شکنندگی به حالات خمیری تبدیل می شوند.

#### بتن

اثر گرما بر خواص بتن توسط بسیاری از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته و بعضی ها به این نتیجه رسیده اند که گرما منجر به تبخیر آب از بتن و تغییرات در ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی آن میشود. معمولا این تغییرات محدود به خمیره سیمان هستند و سنگدانه ها تاثیر کمی می پذیرند. در دمای 90 درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری بتن به 65 تا 90 درصد مقاومت اولیه کاهش می یابد. این کاهش مقاومت عموماً "به دلیل تبخیر آب آزاد بتن و از دست رفتن چسبندگی بین خمیره سیمان و سنگدانه ها به دلیل وجود اختلاف ضریب انبساط دمایی بین مواد است.

به همین منظور، در آئین نامه ((2001 ACI 201-R89)) نمودارهایی برای کاهش مقاومت فشاری بتن در دماهای بالا بر اساس نوع سنگدانه های بکار رفته در بتن ارائه شده است. همچنین گفته میشود مدول یانگ بتن با افزایش گرما به دلیل فقدان چسبندگی در ریز ساختارهای خمیره سیمان، کاهش مییابد. مقایسه نتایج تحقیقات مختلف انجامشده به دلیل تاثیرات رطوبت، خشک شدن بتن، بارگذاری اولیه و نرخ گرمادهی مشکل است. شکل (1) اثر دماهای بالا برمدول یانگ بتن های ساخته شده با سه نوع سنگدانه را نشان میدهد. این اطلاعات از مطالعاتی بدست آمده است که در آن از یک روش اپتیکی استفاده شده است. همچنین نشان داده شده است که نوع سنگدانه و مقاومت بتن تاثیر قابل توجهی بر مدول یانگ بتن در دماهای بالا ندارند.



اثر-گرما-بر-مدول-یانگ-با-سنگ-دانه-مختلف

### الیاف FRP

اطلاعات در مورد مشخصات FRP در دماهای بالا محدود است. به علاوه، اثر گرما بر خواص مواد تشکیل دهنده FRP در تولیدات مختلف تفاوت دارد، چون FRP از چند نوع الیاف (شیشه، آرامید و کربن) و چند نوع ماتریس (وینیل استر، پلی استر و اپوکسی) تشکیل شده است. بویژه اینکه خواص ماتریس در دماهای بالا تغییر می کند که میتواند روی خواص FRP نیز تاثیر بگذارد. با افزایش دما، مقاومت انواع مختلف FRP، کاهش می یابد. همچنین باور این است که کاهش مقاومت کششی مصالح FRP، بیشتر از کاهش مقاومت الیاف است که دلیل آن وجود ماتریسی است که الیاف در آن قرار دارند. همچنین روابطی برای تاثیر دما بر مقاومت کششی انواع FRP پیشنهاد شده است. بر اساس این روابط، با اینکه مقاومت کششی CFRP و AFRP تا C1000 بدون تاثیر می ماند، مقاومت کششی GFRP با افزایش دما بطور ناگهانی کاهش می یابد.

### چسب

اثرات گرما بر چسب هایی که برای چسباندن FRP به بتن استفاده می شوند مانند مواد ماتریس است، چون در اصل آنها مشابه هستند. چسب ها رفتار متفاوتی در مقابل گرما داشته و ضرایب انبساط حرارتی متفاوتی دارند. به هر حلا ضریب انبساط حرارتی چسب به مراتب پایین تر از مواد ماتریس است. چسب مورد استفاده در این تحقیقات یک چسب دو جزئی است که رزین آن با نام تجاری اپیکوت 828 و جزء سخت کننده آن با نام تجاری اپیکور شناخته میشود. رزین اپوکسی بر پایه دیگلیسریل اتر فنول و اف 205 سخت کننده بر پایه جزء عمل آورنده آمینی است. طبق اطلاعات کارخانه تولید کننده چسب، نسبت استوکیومتری اختلاط این دو جزء بصورت 58 جزء عمل آور به ازای 100 واحد وزنی رزین اپوکسی است.

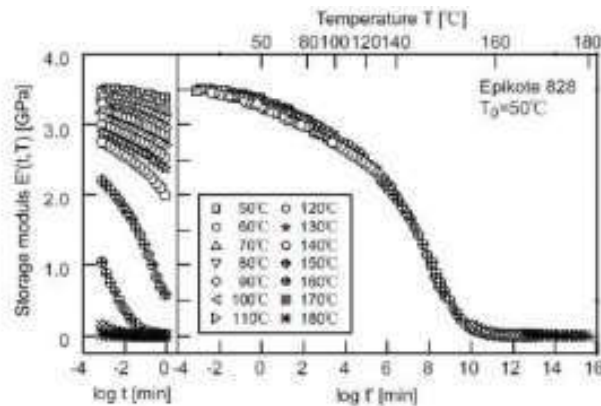
یکی از محققین تحقیقات گسترده ای بر روی دمای گذار شیشه‌ای و همچنین مدول الاستیسیته اپوکسی مورد نظر با تغییر نسبت جزء سخت‌کننده انجام داده است. او این پارامترها را به عامل نسبت (۲) مربوط کرده است. مقادیر مختلف نسبت اختلاط و ۲ مربوط به هر کدام در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: نسبت نمونه های رزین اپوکسی اپیکوت ۸۲۸ و جزء سخت‌کننده اپیکور اف ۲۰۵ (۱۱)

نسبت اپوکسی معادل یا آمین (I)	جرم اپیکوت ۸۲۸ (گرم)	جرم اپیکور اف ۲۰۵ (گرم)	حجم آمین (نسبت در صد)
۰/۵	۳۱/۰	۹/۰	۳۹/۰
۰/۶	۲۹/۷	۱۰/۳	۳۴/۷
۰/۷	۲۲/۰	۱۳/۰	۴۰/۶
۰/۸	۲۴/۰	۱۱/۰	۴۵/۸
۰/۹	۲۹/۶	۱۵/۴	۵۲/۰
۱/۰	۲۵/۳	۱۵/۰	۵۹/۲
۱/۲	۲۳/۹	۱۶/۶	۶۹/۵
۱/۳	۲۲/۹	۱۷/۳	۷۵/۵

نسبت-نمونه-ها-رزین-اپوکسی

دمای گذار شیشه ای می تواند با افزایش سیکل های دمایی افزایش یابد در این ارتباط، اثر دما بر روی چسب مورد استفاده در این تحقیقات نیز در شکل (۴) آورده شده است.

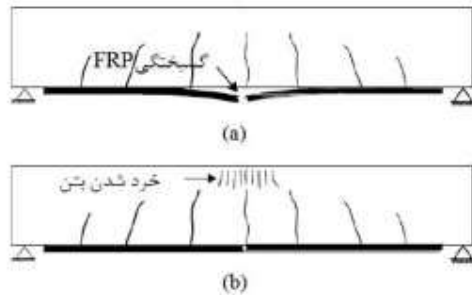


اثر-گرما-بر-مدول-یانگ

## 1-1-21 گسیختگی سازه های بتنی مقاوم شده با FRP در خمش

برای پی بردن به اثرات دمای بالا و پائین بر عملکرد سازه های بتنی مقاوم شده با FRP، باید رفتار سازه های مقاوم شده با FRP در دماهای عادی مورد توجه قرار گیرد. بطور کلی حالات گسیختگی این سیستم هارا می توان به گسیختگی خمشی، گسیختگی برشی و جداسدگی لایه های FRP از بستر بتنی تقسیم نمود. گسیختگی خمشی و برشی یک تیر همان حالات گسیختگی معمول در سازه های بتن مسلح معمولی است

حالات اول گسیختگی خمشی معمولاً جاری شدن فولاد به دنبال گسیختگی FRP (شکل 5(a)) حالات دوم گسیختگی خمشی جاری شدن فولاد به دنبال خرد شدن بتن یا خرد شدن بتن بدون جاری شدن فولاد (شکل 5(b)) و حالات سوم گسیختگی خمشی گسیختگی خمشی، جداشدگی لایه FRP است.



شکل 5: گسیختگی خمشی در اثر گسیختگی FRP (a) و خورد شدن بتن (b)

گسیختگی - خمشی - مقاوم - سازی - خورد - شدن

## 22-1-1- مراحل ساخت نمونه ها

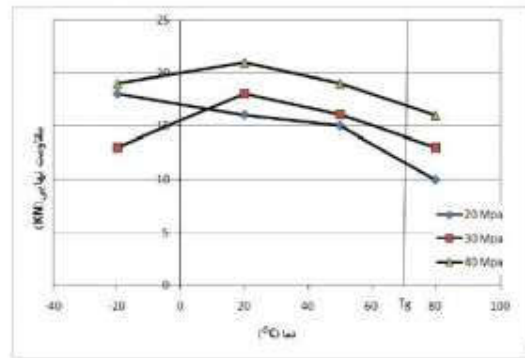
پس از انجام دانه بندی و طرح اختلاط بتن مورد نظر، برای هر رده مقاومتی، در یک مرحله قلاب های آماده شده در سه لایه پر شده و هر بار با 25 ضربه متراکم شدند. همچنین به دیواره های قلاب با چکش پلاستیکی ضربه هایی وارد آمد تا تراکم مناسب حاصل شود. سپس قلاب ها روی میز لرزان قرار داده شدند و بوسیله ماله و یا خط کش فلزی سطوح بالایی تسطیح شدند. قلاب ها در شرایط آزمایشگاهی به مدت 24 ساعت باقیمانده و سپس قلاب ها به آرامی باز شده و اطلاعات مربوط به تاریخ و مقاومت هر نمونه روی آن نوشته شده و به حوضچه آب انتقال یافته و به مدت 28 روز عملآوری شدند.

پس از 28 روز نمونه ها از آب خارج شدند تا سطح آنها خشک شده و برای چسباندن CFRP آماده شوند. قبل از چسباندن ورقه های CFRP، سطح بتن بوسیله سمباده برقی برای از بین بردن لایه ضعیف رویی و گرد و غبار آماده شدند. سپس ورقه های CFRP به ابعاد مورد نظر بریده و با بکارگیری چسب مربوطه که شامل مخلوطی از مولفه های رزین اپوکسی و سختکننده با اوزان توصیه شده می شدند، چسباندن شده و به مدت یک هفته، برای عمل آوری چسب در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. برای اعمال شرایط یخ زدگی به نمونه های تیرهای تقویت شده با CFRP از ، استاندارد دستورلاعمل ASTM C884/C884M-98 استفاده شد. بر اساس این دستورلاعمل، پس از عمل آوری اپوکسی، نمونه ها در معرض 5 سیکل تغییر دما بین  $25^{\circ}\text{C}$  تا  $-21^{\circ}\text{C}$  قرارداده می شوند. بنابراین پس از عمل آوری چسب اپوکسی، تیر های تقویت شده به مدت 24 ساعت، درون فریزر با دمای  $-21^{\circ}\text{C}$  و سپس به مدت 24 ساعت در دمای اتاق ( $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) قرار گرفت. این روند یک سیکل آزمایش را تشکیل میدادند برای اعمال شرایط دمای بالا نیز نمونه های تیر های تقویت شده، به همان ترتیب با 5 سیکل 48 ساعته در درون اون قرار گرفت. برای یک سیکل نمونه هابه مدت 24 ساعت در دمای 50 و یا 80 درجه و سپس به مدت 24 ساعت در دمای اتاق قرار داده میشوند. درون اون، سطح تقویت شده با CFRP رو به بالا قرار داده شدند.

## 23-1-1- مقاومت نهایی به عنوان تابعی از درجه حرارت

با مشاهده نتایج حاصل از انجام آزمون خمشی بر روی تیرهای تقویت شده با CFRP که در شکل های 15 و 16 نشان داده شدهاند، مشخص است که در نمونه های قرار گرفته در دمای بالاتر از دمای اتاق، کاهش مقاومت نهایی رخ داده است. همچنین مشاهده میشود که این کاهش مقاومت، در نمونه های تقویت شده با ورقه های

CFRP انعطافپذیر در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  نسبت به دمای  $50^{\circ}\text{C}$  بیشتر است. همچنین ملاحظه میشود که در نمونه های تقویت شده با CFRP سخت، این کاهش مقاومت با شیب کمتری ادامه مییابد. همچنین پیداست که مقاومت نهایی مربوط به دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ، نسبت به مقاومت متناظر در دمای اتاق، افزایش مقاومت را در نمونه های با مقاومت فشاری  $19.68\text{ MPa}$  و کاهش مقاومت نهایی را در نمونه های با مقاومت فشاری  $30.75\text{ MPa}$  و  $39.55$  را نشان می دهد.



مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده با CFRP در مقابل دما

#### نتیجه گیری

از مباحث بالا می توان نتیجه گرفت که گرما هم بر روی مقاومت نهایی و هم بر روی نوع رفتار گسیختگی تیر های بتنی تقویت شده با CFRP تاثیر میگذارد. تصور اینست که تاثیر افزایش دما بر روی پخش تنش برشی در بتن، ناشی از سه عامل مهم: گسترش تنش های حرارتی در نتیجه اختلاف ضریب انبساط حرارتی، کاهش سختی چسب و کاهش مقاومت چسبندگی سطح تماس چسب-بتن، در دماهای بالا است. همچنین می توان گفت که میزان کاهش مقاومت نهایی در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  نسبت به مقاومت نهایی در دمای اتاق، با بالا رفتن رده مقاومت بتن کاهش یافته و مقدار کاهش مقاومت نهایی در دمای اتاق تا رده مقاومتی  $30.79\text{ MPa}$  افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. تیرهای تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر، در هر سه رده مقاومتی بتن، نسبت به تیرهای تقویت شده با CFRP سخت، در دماهای  $20^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$  مقاومت نهایی بالاتری از خود بروز دادند.

تیرهای تقویت شده با CFRP قرار گرفته در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  و  $80^{\circ}\text{C}$  در هر سه رده مقاومتی بتن و هر دو نوع CFRP، مقاومت نهایی کمتری داشتند. نمونه های با CFRP انعطافپذیر با رده مقاومتی بتن  $19.68\text{ MPa}$  که در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته اند، مقاومت نهایی بالاتری را نسبت به نمونه های دمای اتاق نشان دادند که میتواند ناشی از کنش تنش های حرارتی بر خلاف تنش های بارگذاری باشد. این مسئله در نمونه های با رده مقاومتی  $30.79$  و  $39.55\text{ MPa}$  دیده نمیشود که احتمالاً ناشی از مشارکت کمتر تنش های حرارتی در مقاومت برشی کلی است، ولی نمونه های مقاوم شده با CFRP سخت که در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته اند، در هر سه رده مقاومتی بتن، مقاومت کمتری از خود نشان دادند.

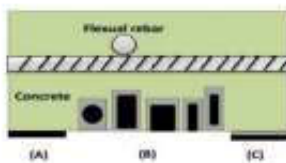
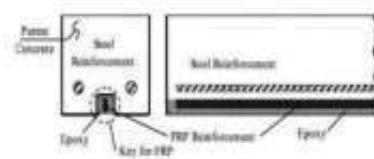
روند شکست تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP انعطافپذیر بدین صورت است که در دماهای  $20^{\circ}\text{C}$  جداسازی CFRP، لایه نازکی از بتن چسبیده به لایه چسب باقی می ماند (گسیختگی در بتن) در حالیکه در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  و  $80^{\circ}\text{C}$  پس از جداسازی، بتن خیلی کمتری باقی می ماند (گسیختگی بین سطحی چسب-بتن) روند شکست تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP سخت بدین صورت است که در دماهای  $20^{\circ}\text{C}$  و  $20^{\circ}\text{C}$  پس از جداسازی CFRP، لایه نازکی از بتن چسبیده به لایه چسب باقی می ماند (گسیختگی در بتن)، در حالیکه در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  پس از جداسازی بتن خیلی کمتری متصل به چسب روی CFRP باقی مانده (گسیختگی بین

سطحی چسب-بتن) و در دمای 80 °C + پس از جداسازی هیچ بتن و چسبی روی CFRP باقی نمی ماند (سیختگی بین سطحی چسب-CFRP)

در دمای 20 v + در هر سه رده مقاومتی بتن، نتایج آزمایشگاهی تیر های مقاوم شده با CFRP انعطافپذیر تطابق بهتری با مقاومت بدست آمده از روابط آئین نامه های ACI440-02 و نشریه 345 نشان دادند. در دماهای C 50 ° و 80 °C +، در هر سه رده مقاومتی بتن، نتایج آزمایشگاهی تیر های بتنی مقاوم شده با CFRP سخت، تطابق بهتری با مقاومت بدست آمده از روابط آئین نامه های ACI-02440 و نشریه 345 نشان دادند. در دمای C 20 ° - در هر سه رده مقاومتی بتن، نتایج آزمایشگاهی تیر های بتنی مقاوم شده با CFRP سخت، تطابق بهتری با مقاومت بدست آمده از روابط آئین نامه های ACI-02440 نشان دادند

مقاوم سازی سازه های بتن مسلح با استفاده از الیاف تقویت کننده پلیمری در مقایسه با سایر روش های مقاوم سازی به دلیل رسیدن به مقاومت بیشتر در ازای زحمت کمتر و بدون تغییر باقی ماندن ابعاد و شکل سازه پس از مقاوم سازی، به عنوان روشی متداول در سرتاسر جهان پذیرفته شده است. نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت در برابر خوردگی و حمل و نصب آسان، مواد تقویت کننده پلیمری را به عنوان گزینه ای مورد توجه در بسیاری از پروژه های مقاوم سازی مطرح کرده است.

اخیرا روش جدیدی به منظور تقویت سازه های بتن مسلح به کمک مصالح تقویت کننده پلیمری به نام “روش نصب در نزدیکی سطح/ روش نصب سطحی مطرح شده است. کاربرد این روش ها با توجه به معضل خوردگی مصالح جایگزین فولاد در بتن تحت شرایط مهاجم و افزایش توان مقاومتی سازه های بتنی، افزایش یافته اند، که در میان شیوه های مورد استفاده می توان “روش نصب سطحی” به صورت کار گذاشتن میلگرد یا تسمه در شیارهای تعبیه شده را معرفی کرد. در این تحقیق سعی گردیده تا با معرفی کامل “روش نصب سطحی” به عنوان روشی موثر و مناسب در مقاوم سازی سازه های بتنی با مصالح کامپوزیت، مزیت های آن در مقایسه با “روش تسلیح با اتصال خارجی نشان داده شده است. و تحقیقات انجام شده بر کاربرد این روش در زمینه های مختلف مقاوم سازی مورد اشاره قرار گیرند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که افزایش مقاومت در روش نصب سطحی بیش از روش تسلیح با اتصال خارجی است و از طرفی کاربرد این روش، نگرانی های موجود در خصوص جداسازی الیاف تقویت کننده را نیز مرتفع می سازد.



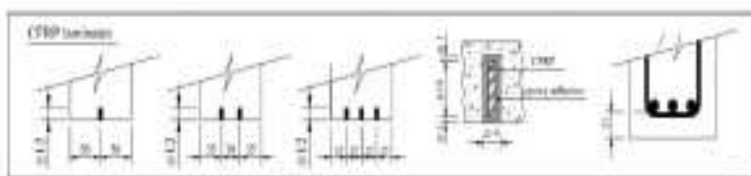
مقاوم سازی-به-روش-نصب-سطحی

تلاش محققان در سال های اخیر در راستای مقاوم سازی به منظور تقویت ساختمان های فرسوده و یا به خاطر بالا بردن ظرفیت خمشی اعضای بتنی باعث ارائه راهکارهای جدیدی در علم مهندسی ترمیم سازه ها شده است، که با جایگزینی شیوه های جدید مقاوم سازی در جهت سهولت مقاوم سازی و بالا بردن ظرفیت سازه ها، باعث شده تا مهندسی سازه به استفاده از سیستم های پلیمری تقویت شده با الیاف تقویت کننده پلیمری روی بیاورند.

تعمیر یک سازه بتنی در زمانی که اجزای آن قادر به تامین سرویس دهی یا مقاومت لازم نباشند، اشتباه در ساخت و یامحاسبات ویا به دلیل قصور عوامل ذیربط و نبود کیفیت لازم برای مصالح و اجراء امری ضروری است. از دیدگاه عملی می توان گفت سازه ها بر اساس اصول و ضوابط حال حاضر آیین نامه های طراحی، اجراء نشده اند، لذا امکان مقاوم سازی این قبیل سازه ها به لحاظ زمان ، هزینه و راهکار اجرایی وجود ندارد. بنابراین راه حل مناسب برای موضوع مقاوم سازی به روش نوین توسط الیاف تقویت کننده پلیمری می باشد. روش های مقاوم سازی متعددی، بسته به نوع ساختمان و شرایط مورد نظر، توسعه داده شده اند. به طور سنتی تعمیر یا بازسازی سازه های بتنی به کمک چسباندن ورقه های فولادی انجام شده است. این روش دارای دو اشکال مشخص و اثبات شده می باشد.

**الف:** ورقه های فولادی در معرض خوردگی و جداسازی می باشند.

**ب:** وزن ورقه های فولادی در تیرهای با دهانه زیاد ایجاد مشکل می نماید.



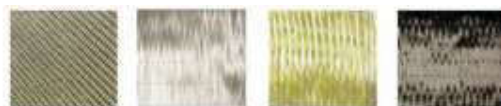
شکل ۱- مقاوم سازی به روش "نصب سطحی" با استفاده از انواع تسمه های الیاف پلیمری تقویتی کربنی [۱۸]

مقاوم-سازی-به-روش-نصب-سطحی-NSM

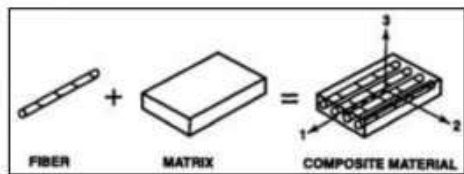
#### معرفی مواد الیافی مقاوم پلیمری

کامپوزیت ها (مواد مرکب)، دسته ای از مواد هستند که همان طور که از نام آنها بر می آید، از اجزا مختلفی تشکیل یافته اند. به طور کلی الیاف تقویت کننده پلیمری از دو جزء تشکیل شده اند که اجزای این ماده مرکب را می توان در شکل (4)

مشاهده نمود. جزء اول که قانوناسمت برابر آن محسوب می شود، الیاف هستند. این جزء کاملاً ارتجاعی رفتار می کند، شکننده هست و مقاومت کششی بسیار بالایی دارند. قطر این الیاف بسته به نوع آنها در محدوده 5 تا 25 میکرون قرار دارد. جنس الیاف می تواند از شیشه، کربن، آرامید، یا وینیل باشد که الیاف ساخته شده با هریک از این مواد را به ترتیب از نوع شیشه، کربن، آرامید و الیاف بازالتی می نامند. تصویر این الیاف در شکل (3) قابل مشاهده است. در بین انواع ذکر شده، جنس کربن آن به خاطر خواص بهتر نسبت به سه دسته دیگر، دارای بیشترین کاربرد است. الیاف بکار رفته در نوع کربنی، با نام شیمیایی پلی از خود نشان می دهند. جزء دوم آکریلونیتریل، مقاومت بسیار بالایی دارند، به طوری که مقاومتی نزدیک به 4000 Mpa از خود نشان می دهند. ساختار این الیاف، چسب یا رزین است. این جزء که به عنوان یک محیط چسبنده الیاف را در کنار هم نگه می دارد، نقش چندانی در باربری ندارد. چسب های موجود در ساخت این الیاف از دو نوع ترکیب ترموست 1 و ترموپلاستیک 2 ساخته می شوند. مقاومت این الیاف در برابر خوردگی با هیچ ماده ای قابل مقایسه نیست. این خصیصه از الیاف تقویت کننده پلیمری آنها را به عنوان جایگزین مناسبی برای فولاد در بتن مطرح ساخته است.



شکل ۳- انواع مختلف پلیمرهای تقویتی از نظر جنس



شکل ۴- اجزای یک ماده مرکب (کامپوزیت)

انواع-مختلف-پلیمر-های-مقاوم-سازی

اجرای-یک-ماده-مرکب

رزین (ماتریس) را می توان از مخلوط های ترموست و یا ترموپلاستیک انتخاب کرد. رزین های ترموست با اعمال حرارت سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی آیند در حالی که رزین های ترموپلاستیک را می توان با اعمال حرارت، مایع کرده و با اعمال برودت به حالت جامد در آورد. به عنوان رزین های ترموست می توان از پلی استر، وینیل استر و اپوکسی و به عنوان رزین های ترموپلاستیک از پلی وینیل کلرید، پلی اتیلن و پلی پروپیلن نام برد. الیاف پلیمری تقویت شده، نوعی ماده کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین از جنس پلیمر احاطه شده است. الیاف تقویت کننده پلیمری به روش پلی اکریلونیتریل ساخته می شوند و میلگردها و پروفیل ها به روش پالترژن تولید می گردند که در این روش دسته های الیاف پس از آغشته شدن با رزین پس از عبور از یک قالب در کنار هم قرار گرفته و یک پروفیل دارای مقطع ثابت را به وجود می آورند. محصولات پلیمری مورد استفاده در سازه ها به شکل ورق های الیاف تقویت کننده پلیمری، میلگردهای کامپوزیت، شبکه های آماده کامپوزیتو پروفیل های کامپوزیت با الیاف تقویت کننده پلیمری وجود دارد. از این محصولات برای ساخت و تقویت سازه ها استفاده می شود.

#### معرفی روش تسلیح با اتصال خارجی

روش تسلیح با اتصال خارجی، رایج ترین روش تقویت سازه های بتن آرمه می باشد. در این روش بعد از آماده سازی سطحی از ورقه های تقویت کننده ی پلیمری به وسیله ی چسب در وجه کششی بال استفاده می شود. در طول دهانه، نظیر الیاف قرار گرفته در جهت عمودی و به صورت یو شکل در اطراف سطح مقطع تیر و همچنین فرآیند آماده سازی سطحی نظیر زبرسازی سطح با جت آب، هوا و یا ماسه پاشی می توانند پدیده جدادشدگی را تا حدودی به تعویق بیندازند. در این روش ابتدا باید سطح مورد نظر را با انجام یکسری عملیات، جهت نصب کامپوزیت ها آماده کرد. این عملیات عبارتند از: تسطیح سطوح عضو سازه، تخریب قسمت های آسیب دیده از حملات شیمیایی، تمیز کردن سطح عضو، زدودن سطح عضو از روغن و رطوبت و آغشته کردن سطح عضو به بتون.

نتیجه گیری:

به طور کلی مزایا و معایب روش تسلیح با اتصال خارجی به شرح زیر می باشد:

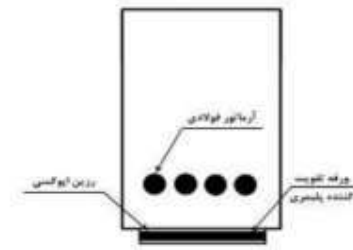
#### 1-1-24- مزایای روش تسلیح با اتصال خارجی:

نصب آسان، هزینه اجرای پایین، استفاده فوری از سازه تقویت شده.

#### 1-1-25- معایب روش تسلیح با اتصال خارجی:

- مود شکست ترد به دلیل جدادشدگی زودرس ورقه تقویت کننده پلیمری از سطح بتن، که سبب می شود این مصالح به مقاومت نهایی کششی خود نرسند و نتوان از تمام ظرفیت باربری این سیستم استفاده شود.
- با توجه به اینکه در این روش، مصالح کامپوزیت در سطح خارجی نمایان هستند، آسیب پذیری آنها تحت تاثیر عوامل محیطی نظیر چرخه های حرارت / یخ زدگی، ضربه های مکانیکی، محیط های اسیدی و قلیایی، آتش سوزی، خرابکاری و پرتوهای فرابنفش وجود دارد.
- تغییر ظاهر سازه پس از مقاوم سازی که در شکل (6) این موضوع قابل مشاهده است.





شکل ۶- مقطع تقویت شده به روش تسلیم با اتصال خارجی

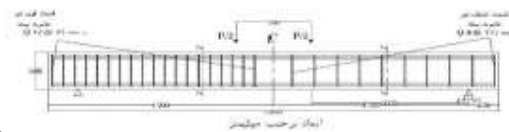
مقطع-تقویت-شده-مقاوم-سازی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای الیاف پلیمری FRP استفاده برای مقاوم‌سازی تیرها و اعضای بتنی و صفحات جانبی تیر برای افزایش ظرفیت برشی تیرها می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات و آزمایش‌ها وسیعی در عرصه استفاده از تقویت برشی سازه‌های بتنی به روش " تسلیم با اتصال خارجی " EBR صورت گرفته است که موجب پیشرفت‌های زیادی در آنالیز و مدل‌سازی این روش گردیده است.

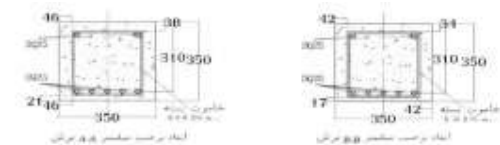
یکی از متداول‌ترین روش‌های تقویت سازه‌های بتن آرمه، استفاده از ورق‌های تقویتی FRP جهت بالا بردن مقاومت خمشی و برشی اعضاء بتنی می‌باشد. نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت در برابر خوردگی و حمل و نصب آسان، مواد FRP را به‌عنوان گزینه‌ای مورد توجه در بسیاری از پروژه‌ها مطرح کرده است. مدول الاستیسیته ورق‌های FRP با بتن تفاوت زیادی دارد که این مسئله منجر به جداشدگی سریع صفحات تقویتی از سطح بتن می‌گردد. به طوری که اگر روش مرسوم آماده‌سازی سطحی EBR برای اتصال این صفحات به کار گرفته شود، استفاده از مقاومت نهایی ورق‌های FRP بسیار مشکل است. برای این منظور روش‌های جدیدی جهت تقویت تیرهای بتنی مطرح گردید که مؤثرترین این روش‌ها روش "نصب در نزدیک سطح" NSM که بر اساس ایده‌ی کار گذاشتن مصالح مقاوم کننده در شیارهای تعبیه‌شده در سطح تیرها شکل گرفته است.

این مقاله شرح برنامه آزمایشگاهی جهت آزمایش تیر بتنی RC5 در مقیاس واقعی و در شرایطی کاملاً کارگاهی جهت شناخت بهتر ظرفیت و رفتار تیرهای بتنی RC تقویت‌شده به روش NSM در برش و مقایسه ظرفیت و رفتار این تیرهای تقویت‌شده با روش EBR را در این روش تقویت بیان نماییم. پارامترها و متغیرهای در نظر گرفته‌شده برای این آزمایش عبارتند از:

نحوه پوشش و تقویت تیرهای RC و فاصله قرارگیری میلگردهای FRP و همچنین فاصله قرارگیری این میلگردها با در نظر گرفتن شرایط کارگاهی می‌باشد. همه تیرهای تقویت‌شده افزایش مقاومتی را نسبت به تیر کنترل از خود نشان دادند که به تفصیل در ادامه به آن خواهیم پرداخت.



هندسه طرح-مقاوم-سازی-الیاف-



شکل ۷ مشخصات تیر بتنی RC5: تیر بتنی عادی (a)؛ تیر بتنی با هم‌راهِ آرماتور گذاری طولی (b)؛ مقطع تیر بتنی به هم‌راهِ آرماتور گذاری

مشخصات-تیر-های-بتنی-مقاوم-سازی

شیشیه

برای انجام این آزمایش تیر بتنی RC به طول 399mm و با مقطع عرضی مستطیلی و به ابعاد 349mm× با نظر گرفته شد.

همگی تیرها توسط آرماتور طولی در بخش خمشی به نحوی طراحی و ساخت گردید که مکانیزم غالب شکست تیرها مکانیزه برشی گردد. برای همین منظور 4 عدد میلگرد 24mm در قسمت کششی تیر و 2 عدد میلگرد 24mm در بخش فشاری تیر استفاده گردید شکل . بخش برشی تیر که متشکل از دو ناحیه از خاموت فولادی بسته می‌باشد، ناحیه کنترل 3 شکل مقطع A که نصف تیرها و ناحیه قوی 5 شکل مقطع B نصف دیگر تیرهای مورد آزمایش را تشکیل می‌دهد علت این تقسیم‌بندی صرفه‌جویی در میزان میلگرد GFRP مصرفی در آزمایش می‌باشد. در این آزمایش تنها بخش کنترل تیرها با FRP تقویت شده و استرین گیج‌های کنترل در آن بخش نصب شد. طراحی صورت گرفته برای سیستم برشی تیر با توجه به دو ناحیه برشی تیر شامل خاموت بسته میلگرد 8mm در فواصل 175mm در ناحیه کنترل شکل مقطع A و خاموت بسته میلگرد 12mm در فواصل 75mm در ناحیه قوی شکل مقطع B می‌باشد. ضخامت بتن و پوشش‌های در نظر گرفته شده در شکل نشان داده شده است. یکی از تیرها بدون تقویت و تیر دیگر 3 در ناحیه ضعیف تقویت برشی شده‌اند. متغیرهای آزمایش عبارت‌اند از: سیستم آزمایش : FRP توجه این تحقیق به تقویت برشی تیر به روش NSM می‌باشد لذا 2 تیر به روش NSM تقویت شده و به منظور مقایسه بین این روش و روش تقویت خارجی EBR یکی از تیرها به روش پوشش دورتادور U-Warp و با توجه به آیین‌نامه‌های مربوطه با CFRP تقویت شده است. زاویه قرارگیری میلگردهای NSM با توجه به محور تیر : دو زاویه 09 درجه Vertical Reinforcement و 54 درجه جهت قرارگیری میلگردهای NSM در نظر گرفته شده است. فاصله قرارگیری میلگردهای : NSM فواصل قرارگیری میلگردهای NSM عبارتند از : 73mm برای میلگردهای 09 درجه و 145mm برای میلگردهای 54 درجه که همه این اندازه‌ها نسبت به محور تیر می‌باشد. نوع رزین مورد استفاده برای همه تیرها از یک نوع بوده و جزء متغیرها محسوب نمی‌گردد. کدهای تیر متشکل از دو پارامتر بوده که قسمت اول نمایانگر نوع تقویت برشی که UW نمایانگر پوشش پوششی شکل توسط ورق CFRP و علامت NS نشان‌دهنده تقویت به روش NSM می‌باشد. قسمت دوم بیانگر زاویه قرارگیری میلگردها و الیاف پلیمری می‌باشد. سطح تیری که با روش EBR تقویت شده است کاملاً آماده‌سازی شده و خلل و فرج‌های باقی‌مانده نیز توسط بتونه اپوکسی پر شده و دوباره سطح آن پرداخت گردید تا سطحی کاملاً صاف و پرداخت شده و آماده جهت نصب ورق CFRP داشته باشیم. تیرهای که با میلگردهای NSM تقویت شده‌اند برای جاسازی میلگردها از شیارهای به عرض 29 میلی‌متر و عمق 59 میلی‌متر استفاده گردید که  $b =$  عرض شیار ،  $a =$  عمق شیار می‌باشد. قبل از جاسازی میلگردها نیز ابتدا سطح این شیارها کاملاً پرداخت گردیده و سپس با جاسازی میلگردهای 2 میلی‌متر آردار GFRP در داخل این شیارها توسط رزین پر گردید.

تیرها بر روی تکیه‌گاه ساده و تحت بارگذاری 5 نقطه‌ای قرار گرفته و دهانه خالص بارگذاری 2699 میلی‌متر بوده و دهانه برشی در طرفین میلی‌متر 999 می‌باشد. شکل سه عدد LVDT جهت ثبت میزان خیزهای ایجاد شده در وسط دهانه و از بر تکیه‌گاه در ناحیه کنترل و ناحیه قوی نصب شده است و جهت اعمال بارگذاری بر روی تیر از جک 99 تنی با میزان تغییر مکان 0.02mm/s استفاده شده است.

مصالح تشکیل‌دهنده این آزمایش را می‌توان به بتن، آرماتور فولادی، آرماتور ، GFRP ورق و CFRP رزین تقسیم‌بندی نمود.

جدول ۲

آزمون کششی			علامت مشخصه	طبقه بندی
حداقل ازدیاد طول نسبی (درصد)	حداقل مقاومت کششی U.T.S	حداقل تنش تسلیم $\sigma_p$	آج ۴۰۰ 	میلگرد آجدار جنالی
16	600	400		

## مشخصات-مصالح

مقاومت فشاری بتن استفاده شده در ساخت تیرها  $29.23 \text{ Mpa}$  نمونه مکعبی  $4 \times 4 \times 4$  سانتی متر بوده و دارای مدول الاستیسیته  $25410 \text{ Mpa}$  می باشد. آرماتورهای فولادی دارای مشخصات مقاومتی به شرح جدول 2 بوده و دارای مدول الاستیسیته  $211.3 \text{ Gpa}$  می باشد.

ویژگی های ساختاری میلگردهای FRP بر اساس آیین نامه ACI440.3R-04 بوده و میلگردهای استفاده شده در این آزمایش از نوع میلگردهای آجدار ساخت شرکت FireP کشور سوئیس می باشد و دارای مشخصات به شرح جدول 3 می باشد.

ورق های CFRP به کار برده شده در این تحقیق ساخت کارخانه T & Korea RE کره می باشد که از نخ های کربن تریکای آمریکا استفاده نموده است و دارای مشخصات به شرح جدول 5 می باشد.

## نتایج آزمایش :

نتایج اصلی آزمایش در جدول شماره 4 آورده شده و توضیحات مربوط به آن در ادامه بیان شده است. در این جدول در ستون اول نام تیرها، ستون دوم بار نهایی تحمل شده، ستون سوم باربرشی تحمل شده، در ستون چهارم درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به تیر کنترل و ستون پنجم میزان نیروی برشی تحمل شده توسط FRP بیان شده است در مدت بارگذاری تیر کنترل، ترک های قطری در دهانه برشی در وسط تیر شروع شده و این ترک ها از بار اعمالی 299 کیلو نیوتن نمایان شده و با افزایش بارگذاری به تعداد ترک ها افزوده شده و هنگامی که به محدوده بارگذاری 289 کیلو نیوتن رسیده ترک برشی از فاصله  $d$  از بر تکیه گاه و با زاویه  $54^\circ$  درجه شروع گشته و تا محل بارگذاری ادامه پیدا می کند.

جدول 3. مشخصات میلگردهای GFRP

نوع تیر	نوع رزین	وزن واحد سانتی‌متر طول (kg/m)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت طولی-عرضی (GFR)	نسبت طولی-عرضی (GFR)	طول (mm)	قطر (mm)	وزن (kg)
Fiber Glass	Vinyl Ester Resin(Vg)	~1,000	~60,000	~1.2	~1.2	12	3.1	~1.5

جدول 4. مشخصات رزین GFRP

نوع رزین	وزن واحد سانتی‌متر طول (kg/m)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت طولی-عرضی (GFR)	نسبت طولی-عرضی (GFR)	طول (mm)	قطر (mm)	وزن (kg)
Fiber Glass	180	~1,000	~60,000	~1.2	12	3.1	~1.5

مشخصات-میلگردها-ورق ها-

جدول 5. نتایج آزمایش

نوع تیر	بار نهایی (KN)	بار برشی نهایی (KN)	افزایش طولی برشی نسبت به طول کنترل (mm)	F <sub>max</sub> (KN)
BT	179.56	189.79	0	0
NS90	423.79	211.895	11.65	22.115
NS45	403.86	201.93	6.40	12.15
NS90	226.455	226.455	19.23	36.675



شکل 5. میلگرد GFRP

CFRP-GFRP-جدول-نتایج-

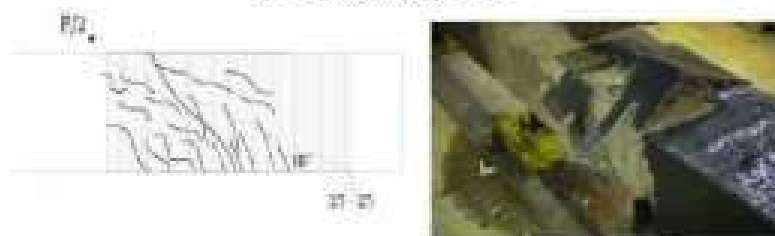
آزمایش-مقاوم-سازی

در تیر NS45 در ابتدا ترک‌های برشی به صورت ترک‌های در داخل رزین و با زاویه 54 درجه ایجاد گشته و با افزایش بار عملی ترک‌های از ناحیه خمشی تیر به سمت دهانه برشی امتداد پیدا کرده و با ادامه پیدا کردن این ترک‌ها با زاویه 54 درجه تا زیر محل بارگذاری موجب شکست تیر گردید. این تیر به دلیل جدایش میلگردهای GFRP از رزین احاطه شده و ترک برداشتن شیارهای ایجاد شده در بار 403.86 کیلو نیوتن دچار شکست گردید. شکل 4. در تیر NS90 که میلگردهای GFRP به صورت قائم در داخل شیارها جاسازی شده بودند، تردی ایجاد شده به علت کمی فاصله‌ها موجب شده بود که در هنگام بارگذاری 249 کیلو نیوتن تقریباً هیچ ترک‌گی در تیر نمایان نبوده و بعداً این حد بارگذاری بود که اولین ترک‌ها در رزین استفاده شده

نمایان گردید. این ترک‌های ابتدایی در داخل شیارها و با زاویه 54 درجه تشکیل و نرخ رشد آن‌ها به سمت محل بارگذاری پدیدار گشت. در محدوده بارگذاری بین 329-249 کیلو نیوتن ترک‌های از ناحیه خمشی تیر شروع شده و به سمت محل بارگذاری در حال پیشروی بودند. با افزایش بارگذاری مشاهده گردید که ترک‌های برشی وجه جانبی تیر در حال افزایش هستند ولیکن ترک‌های عمیقی در انتهای محل شیارهای ایجاد شده تشکیل می‌شود شکل 6b که در امتداد d از محل اعمال بار می‌باشد.



شکل ۲. مکانیزم ترک‌های ایجاد شده در تیر کنترل



شکل ۳. مکانیزم ترک‌های ایجاد شده در تیرهای EBR و CFRP



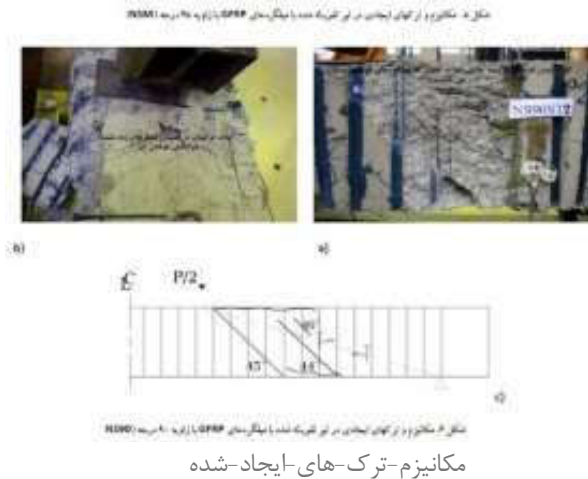
مکانیزم ترک‌های ایجاد شده-مقاوم-سازی

بر اساس گزارش‌ها مندرج در جدول 2 تمامی تیرهای تقویت شده نسبت به تیر کنترل افزایش مقاومت داشتند به طوری که در تیر UW90 که توسط ورق‌های CFRP به روش پوشش کامل تقویت شده بود افزایش 64 درصدی در مقاومت و تیر NS45 و NS90 که با میلگردهای GFRP و آن‌هم به روش جاسازی در نزدیک سطح تقویت شده بودند افزایش مقاومت برشی 6/9 تا 23/0 درصدی را از خود نشان داده‌اند. برای تقویت تیرها با ورق‌های CFRP به صورت چسباندن ورق‌ها در سطح صاف تیرها EBR روش‌های مختلفی جهت طراحی وجود دارد. جهت محاسبه میزان VFRP برای تیر UW90 استاندارد آمریکا و اروپا و از مدل Teng and Chen استفاده شده است. که در آن‌ها میزان VFRP 4/8-54/28 کیلو نیوتن بیان شده است. بر اساس نتایج میزان VFRP 2/22 کیلو نیوتن به دست آمده و با توجه به استفاده یک لایه از ورق CFRP و آن‌هم با دانسیته پایین، تقریباً از 77 درصد پتانسیل مقاومتی ورق‌های CFRP استفاده شده است. درصد اختلاف موجود را با توجه به گسیختگی صورت گرفته در ورق‌های CFRP در آزمایش را می‌توان در عواملی چون شرایط ساخت کارخانه‌ای و نصب ورق‌ها دانست.

در تیرها NS90 و NS45 زاویه قرارگیری میلگردها تفاوت نموده است به طوری که در NS90 میلگردها به صورت قائم و در NS45 با زاویه 54 درجه جاسازی شده است که همین امر باعث شده تا با کاهش زاویه 09 به 54 مقاومت تیرها نیز کاهش پیدا کند ولی با کاهش مقاومت سختی نیز کاهش پیدا کرده و موجب رفتار نرم‌تر تیر NS45 نسبت به تیر NS90 گشته است.

فاصله قرارگیری میلگردها رابطه مستقیم با ظرفیت برشی تیرها دارد به نحوی که با کاهش فاصله میلگردها افزایش مقاومت و سختی و کاهش انعطاف پذیری را شاهد هستیم. به عبارتی با کاهش فواصل جاسازی ظرفیت و مقاومت افزایش پیدا می‌کند. در تیرهای NS90 و NS45 فاصله قرارگیری میلگردها باهم اختلاف زیادی دارند به عبارتی این

فواصل تقریباً دو برابر هستند. در تیر  $NS90.S = 73 \text{ mm}$ ,  $S = 146 \text{ mm}$  تیرهای آزمایش شده همان طور که اشاره شد در شرایط کاملاً کارگاهی ساخته شده‌اند و طی مقایسه صورت گرفته با نتایج آزمایش‌ها در دسترس که تیرهای مورد آزمایش آن‌ها در شرایط کاملاً آزمایشگاهی و ایدئال ساخته شده‌اند. در تیرهای  $NS90$  و  $NS45$  کاهش مقاومت 39 تا 49 درصدی و تیر  $UW90$  کاهش مقاومت 36 درصدی مشاهده گشته است که نشان‌دهنده عملکرد تقریباً ضعیف روش  $NSM$  در استفاده از ظرفیت  $FRP$  در شرایط واقعی می‌باشد. و در حالی که در روش  $EBR$  این اختلاف کمتر می‌باشد.



با افزایش فاصله قرارگیری و تغییر زاویه قرارگیری میلگردها رفتار تیرهای تقویت شده همانند تیر کنترل شده و عملکردی شبیه تیر کنترل از خود نشان می‌دهند نمودار، و این در حالی است که چنین رفتاری در تیر  $UW90$  مشاهده نمی‌شود. اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق جواب به سؤالات مطرح شده در مقدمه این تحقیق که مقایسه روش‌های مقاوم‌سازی در برش می‌باشد.

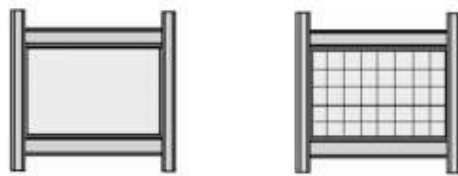
#### نتیجه گیری:

1. تیر تقویت شده با میلگردهای  $GFRP$  و به صورت قائم  $NS90$  بیشترین میزان افزایش مقاومت را در مقابل کمترین میزان جابجایی از خود نشان داده است. تردترین رفتار را داشته است.
2. تیر تقویت شده با میلگردهای  $GFRP$  و با زاویه جابجاری 54 درجه جابجایی مناسب و افزایش مقاومت کمی را داشته است. نرم‌ترین رفتار را از خود نشان داده است.
3. میلگردهای  $GFRP$  استفاده شده به صورت 54 درجه و در فواصل زیادتر، بیشتر کشیده شده و از ظرفیت بیشتری از آن‌ها استفاده شده است. به عبارتی اگر میلگردها در فواصل بیشتر از 73 میلی‌متر استفاده شود از ظرفیت مناسبی از میلگردها می‌توان بهره برد.
4. تیر جکت شده  $UW90$  عملکرد مقاومتی و تغییر شکلی مناسبی از خود نشان داده است ولی افزایش مقاومت آن به اندازه تیر  $NS90$  نمی‌باشد.
5. کنده شدن تکه بزرگ از وجه برشی تیر  $NS90$  نشان‌دهنده یکی از ضعف‌های بزرگ این روش در هنگام نزدیک کردن شیارها به هم می‌باشد، چون با نزدیک شدن شیارها به هم احتمال کنده شدن کلی این شیارها زیادتر می‌شود.

در میان بلایای طبیعی مختلف زلزله به دلیل ماهیت غیر قابل پیش بینی بودن و نحوه ایجاد خسارت در سازه‌های ساخت انسان بیش از سایر حوادث طبیعی ذهن بشر را به خود معطوف داشته است. بنابراین به دنبال سازه‌هایی با

ضرایب اطمینان بالاست که مقاومت زیادی را در برابر بارهای جانبی بزرگ از خود نشان دهد. دیوار برشی یکی از این سازه ها می باشد. این سیستم به دلیل عملکرد مناسب از جمله شکل پذیری و استهلاک انرژی زیاد مقاومت و سختی بالا، سبکی و سرعت بالای اجرا و نصب و هم چنین اقتصادی بودن در دهه های اخیر کاربرد فراوانی یافته اند. در این پژوهش به ارزیابی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار تقویت شده با ورق FRP پرداخته شده است. بدین منظور از روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار ABAQUS6-12-3 و تحلیل استاتیکی غیر خطی، به مطالعه اثر ورق FRP بر رفتار دیوار برشی فولادی با اشکال مختلف و تأثیر طول موج بر رفتار دیوار برشی فولادی موجدار تقویت شده با ورق FRP پرداخته شده است. نتایج این تحقیق بیانگر این است، در حالتی که از ورق مثلثی استفاده می شود کماتش زودتر از دو فرم دیگر اتفاق می افتد و سیستم دچار افت ظرفیت باربری می شود. که این نقص با تقویت ورق FRP برطرف می شود.

دیوارهای برشی فولادی را می توان بر حسب فلسفه طراحی شان به دو دسته تقسیم کرد: دسته اول، دیوارهای برشی فولادی سخت شده که در آن ها از کماتش صفحات فولادی پرکننده تحت بارهای خدمت قبل از تسلیم برشی جلوگیری شده است و دسته دوم، دیوارهای برشی صفحه فولادی سخت نشده، که در آنها از مقاومت پس کماتشی پانل ها استفاده می شود. از آن جایی که مقاومت حد کماتش در ورق ها حتی اگر پانل ها تقویت شده باشند بسیار کمتر از مقاومت پس کماتشی همان ورق ها به صورت تقویت نشده می باشد، توجه به استفاده از ظرفیت پس کماتشی صفحات فولادی زیادتر شده است. علاوه بر آن، امکان ساخت سازه هایی با قابلیت شکست نرم و امکان بازسازی سریع و کم هزینه سازه های آسیب دیده در این روش بر مزایای سیستم دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق نازک (بدون سخت کننده) می افزاید. در انتخاب دیوار برشی فولادی سخت نشده یا سخت شده، لازم است که طراح، عملکرد سازه ای، ملزومات طراحی، اقتصادی، راحتی ساخت، انتقال و احداث را در نظر بگیرد. در شکل (1) نمونه ای از دیوار برشی فولادی با سخت کننده و بدون سخت کننده نشان داده شده است.



شکل 1- دیوار برشی فولادی (الف) سخت شده و (ب) سخت نشده (ماده)

#### دیوار برشی فولادی-مقاوم-سازی

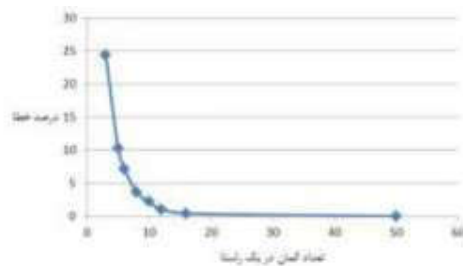
در دیوار برشی فولادی موجدار به علت وجود خمهای متعدد در ورق و تبدیل نیروی درون صفحاتی به نیروهای برون صفحاتی و برعکس در این مکانها، ورقهای صاف تشکیل دهنده ورق موجدار، یکدیگر را مقید نموده و در واقع به نوعی، نقش سخت کنندهها را ایفا مینمایند. بنابراین دیوار برشی فولادی موجدار را از نظر عملکرد سازه ای می توان جزء دیوارهای برشی سخت شده محسوب نمود. دیوارهای برشی فولادی موجدار میتوانند مزایای هر دو نوع دیوار برشی سخت شده و سخت نشده را دارا باشند.

از آنجایی که دیوار برشی فولادی موجدار دارای ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و سختی مناسبی میباشد و از سوی دیگر دارای هزینه اجرایی و وزن کمتری در شرایط یکسان طراحی خواهد بود بنابراین مطالعه پارامتریک بر روی این دیوارها موضوعیت پیدا می کند.

#### صحت سنجی

در این پژوهش به بررسی تاثیر ورق FRP بر دیوار برشی فولادی موجدار با اشکال مختلف و تأثیر طول موج بر رفتار دیوار برشی فولادی موجدار تقویت شده با ورق پرداخته شده است.

بارگذاری در این آزمایش به صورت جابه جایی کنترل می‌باشد و تا جابجایی 3 درصد ارتفاع طبقه انجام شد. همچنین در مورد سازه‌ها باید توجه داشت که اگر از المانهای بزرگ استفاده شود، پاسخها دقت کافی را نداشته و اگر از المانهای بسیار کوچک استفاده شود، زمان انجام تحلیل طولانی خواهد شد، باید اندازه‌های مناسبی را برای المانها انتخاب شود. برای این کار اعضای سیستم را با اندازه‌های مختلف مدل کرده و مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد المانها، پاسخهای مربوط به برش پایه به همگرایی می‌رسند. شکل (2) نمودار میزان خطا بر حسب اندازه مش را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که وقتی اندازه المان 10 سانتیمتر است، میزان خطا حدود 1 درصد می‌باشد، که قابل صرف نظر کردن است.

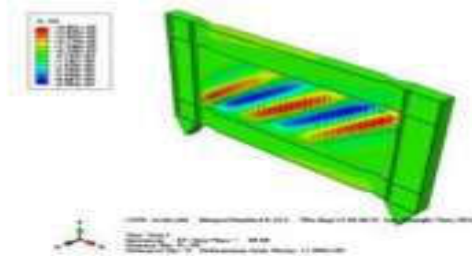


شکل 2- نمودار درصد خطا بر حسب تعداد المان

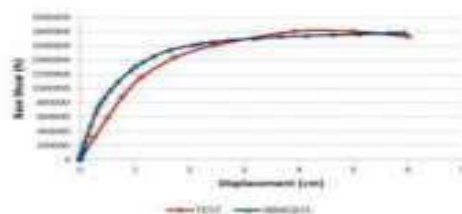
ن

مودار درصد خطا بر حسب المان

همانگونه که در شکل (3) و (4) مشاهده می‌شود، خروجی شبیه سازی و مدل آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارند.



شکل 3- مدل سازی در نرم افزار Abaqus



شکل 4- مقایسه منحنی نیرو - تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی

مدل سازی مقایسه منحنی نیرویی-مقاوم سازی

بررسی تاثیر ورق FRP بر دیوار برشی فولادی موجدار با اشکال مختلف

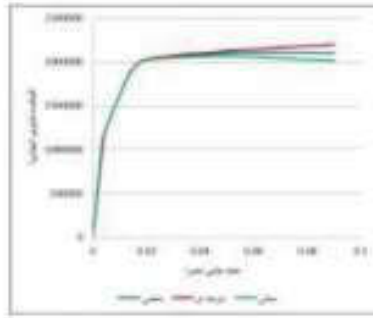
در این قسمت به بررسی اثر تغییرات شکل موج ورق فولادی بدون و با الیاف FRP بر ظرفیت و توزیع تنش پرداخته می‌شود. بدین منظور شرایط مرزی را ثابت در نظر گرفته و شکل مقطع ورق فولادی تغییر داده می‌شود (نحنی، دوزنقهای و مثلثی). جدول (1) و (2) و شکل (5) به ترتیب نمره پروفیل، هندسه ورق و مشخصات مصالح به کار رفته در دیوار را نشان می‌دهد.



جدول ۱- مشخصات مقطع

شماره پنل	سکون	ایر	شکل ویرا فولادی	راستای الیاف
۱	W1.8*70	W11*95	موج	-
۲	W1.8*70	W11*95	موج	موج
۳	W1.8*70	W11*95	موج	-
۴	W1.8*70	W11*95	موج	موج
۵	W1.8*70	W11*95	موج	-

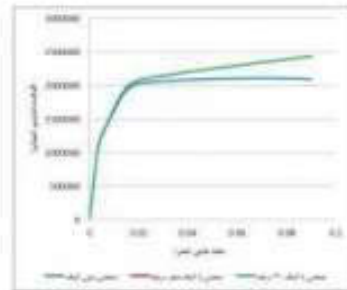
مشخصات-مقاطع-مقاوم-



شکل ۶- منحنی نیرو- تغییر مکان دیوار برشی فولادی موجدار با شکل های موج متفاوت

منحنی نیرو-تغییر-

سازی



شکل ۷- منحنی نیرو- تغییر مکان دیوار برشی فولادی موجدار منحنی شکل با الیاف

مکان منحنی نیرو-با-الیاف-مقاوم-سازی ورق با سطح مقطع دوزنقهای نسبت به دو فرم دیگر ظرفیت باربری بیشتری دارد. همچنین از لحاظ توزیع تنش فون میزس نیز وضعیت بهتری را دارا میباشد. نکته قابل توجه در شکل موج برای حالت مثلثی میباشد. ورق مثلثی زودتر دچار کمانش میشود در نتیجه منحنی نیرو- تغییر مکان این سیستم دچار افت ظرفیت باربری خواهد شد. ولی این عیب با تقویت FRP برطرف شد. همچنین الیاف FRP ظرفیت باربری سیستم را افزایش میدهد و نکته قابل اشاره اینجاست که راستای صفر و 90 الیاف تاثیر به خصوصی بر عملکرد سیستم نداشته است.

#### نتیجه گیری

ورق با سطح مقطع دوزنقهای نسبت به دو فرم دیگر ظرفیت باربری بیشتری دارد. همچنین از لحاظ توزیع تنش فون میزس نیز وضعیت بهتری را دارا می باشد. همچنین در حالتی که از ورق مثلثی استفاده می شود کمانش زودتر از دو فرم دیگر اتفاق می افتد و سیستم دچار افت ظرفیت باربری می شود. که این نقص با تقویت ورق FRP برطرف می شود. با توجه به اینکه در تغییر مکانهای کوچک میزان جذب انرژی و ظرفیت باربری سیستم های دارای طول موج کوتاهتر بیشتر است و با افزایش تغییر مکان میزان جذب انرژی و ظرفیت سیستمهایی که دارای طول موج کوتاهتری هستند، کاهش می یابد، بنابراین در مناطقی که میزان لرزه خیزی کمتر است، استفاده از دیوار برشی با طول موج

کوتاهتر ارجحیت دارد. تقویت سیستم با الیاف FRP در طول موج 46 سانتی متر موجب کاهش 31 درصدی تغییر شکل خارج از صفحه می شود ولی در طول موج 2/9 تاثیری ندارد.

### مقاوم سازی سازه های بتنی با پوشش FRP

امروزه استفاده از پوشش FRP در سازه های بتنی با توجه به مزیت های آن در حال رشد است. سازه هایی که بر اساس دستورالعمل های گذشته طراحی و ساخته شده اند در برابر زلزله عملکرد نامناسبی مانند مقاومت جانبی پایین، پتانسیل کم در جذب انرژی، کاهش سریع مقاومت و ... از خود نشان می دهند.

بنابراین با توجه به دو فاکتور شکل پذیری و مقدار جذب انرژی در اثر بار جانبی، همواره می بایستی از موادی بهره بگیریم که این نیاز را برطرف نماید. در این بحث سعی شده تا به صورت اجمالی اثر پوشش الیاف کربن CFRP بر ستون بتن آرمه و تغییرات حاصله بر روند انرژی را با استفاده از شبیه سازی آن در نرم افزار آباکوس مورد تحلیل قرار دهیم.

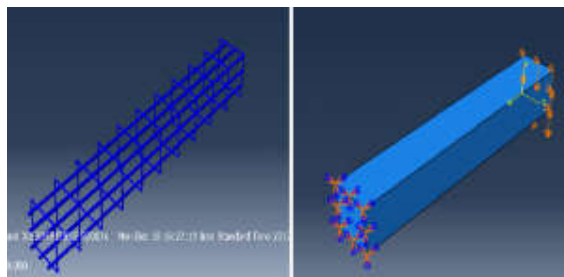
همانطور که می دانیم یکی از روش های تقویت مقاطع، استفاده از محصورشدگی این اجزا با استفاده از سایر مصالح مناسب است که نوع انتخاب مصالح محصورکننده حائز اهمیت می باشد، در این انتخاب نکاتی از جمله مقاومت در برابر خوردگی، اثر وزن، نحوه به کارگیری این مصالح، ضریب ارتجاعی، میزان فضای اشغال شده و ... دخیل هستند. پس با توجه به این عوامل، استفاده از فیبرهای پلیمری تقویت شده (CFRP, GFRP, AFRP) گزینه مناسبی می باشد اما در کنار همه ی مزایای گفته شده باید به این نکته توجه شود که اگر بخواهیم از فیبرهای پلیمری تقویت شده پیش تنیده نشده در سازه های استفاده کنیم نمی توان از تمام ظرفیت آن بهره برد. هنگامی که مهندس محاسب قصد طراحی یک سازه را دارد، بایستی تا حد امکان دید کافی نسبت به نحوه ایجاد رفتار غیر خطی در سازه اش داشته باشد و از توانایی مفصل پلاستیک (که از پتانسیل های خوب برای اتلاف انرژی زلزله هستند) استفاده کند.

در رابطه با این موضوع دو مکانیزم می تواند در طراحی سازه ها مطرح شود:

- 1- مکانیزم حرکت جانبی ستونی، در این مکانیزم مفاصل پلاستیک اغلب در ستون ها خواهد بود و بحرانی ترین حالت این مکانیزم وقتی است که مفاصل پلاستیک تنها در ستون ها تشکیل شده و هیچ تیری مفصل پلاستیک نداشته باشد.
- 2- حرکت جانبی تیری، تلاش می شود که تسلیم در تیرها قبل از ستون ها شروع شود و در نهایت مفاصل پلاستیک اغلب در تیرها خواهند بود. آیین نامه های طراحی بتن ضوابط خود را به گونه ای تنظیم می کنند که مکانیزم دوم (حرکت جانبی تیر) در هنگام رخ دادن زلزله بر سازه حاکم شود، این موضوع که به قاعده تیر ضعیف-ستون قوی معروف است، در روح ضوابط آیین نامه ها حاکم است.

### مدل سازی در نرم افزار

برای مدل سازی از یک ستون بتن مسلح با ابعاد  $30 \times 30$  سانتی متر و به طول 2 متر شکل (1) که با پوشش CFRP در دو وجه عمود بر بار (عمود بر راستای Y) تقویت شده بود، استفاده شد، این ستون یک سر آن گیردار و سر دیگر آن تحت بار چرخه ای به مدت 2 ثانیه قرار گرفت و رفتار آن با نمونه بدون پوشش تقویتی مقایسه شده است. در بارگذاری چرخه ای زمان مفهوم دارد و بارگذاری با دوره تناوب مشخصی انجام می شود لذا به لحاظ فیزیکی کاملاً استاتیکی نیست. از طرف دیگر این بارگذاری کاملاً دینامیکی نیست چرا که به آرامی و به گونه ای اعمال می شود که اثرات ناشی از اینرسی سازه به حداقل برسد. با توجه به موارد فوق الذکر می توان نتیجه گرفت که بارگذاری چرخه ای مورد استفاده در مطالعه اثر هیستریزس به صورت شبه استاتیکی به سازه اعمال می شود.

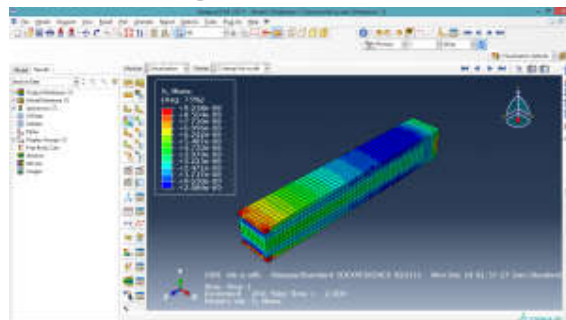


شکل (1) ستون بتن مسلح قبل از پردازش در آباکوس

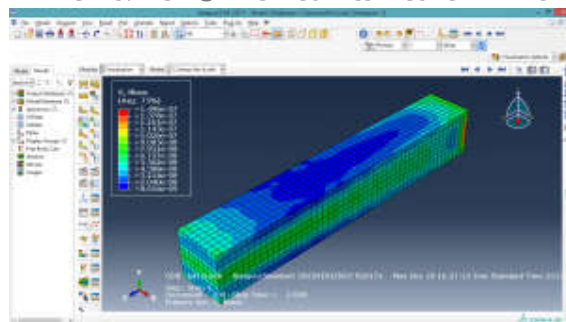
مشخصات مکانیکی CFRP

چگالی ( $\text{kg/mm}^3$ )	ضخامت (MM)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)
$10^{-6}$	3	0.3	3000	350000

شکل (2) تنش فون میزز ستون بتن مسلح فاقد پوشش CFRP



شکل (3) تنش فون میزز ستون بتن مسلح دارای پوشش CFRP



همانطور که در مقایسه دو شکل بالا مشخص است با قرار دادن پوشش CFRP در صفحه‌ی XY برای شکل (3) تنش وارده بر بتن در پای ستون کاهش چشمگیری داشته و می‌توان گفت که آن را از تشکیل شدن مفصل پلاستیک در پای ستون دور کرده است و تنش وارده بر پای ستون را کاهش داده که این کاهش تنش به میزان 17 درصد برای شکل (3) بوده است.

با توجه به اینکه سیستم‌های سازه‌ای اغلب رفتار غیرخطی در برابر تحریکات طبیعی مانند زلزله از خود نشان می‌دهند و با در نظر داشتن این شاخص که انرژی مستهلک شده معیار اندازه‌گیری خوبی برای آسیب‌دیدگی است و یا در حقیقت بازتاب تاریخچه بارگذاری است می‌توان گفت در این شرایط تحت نیروهای بازگشتی، ستون دارای پوشش CFRP رفتار قابل توجه از خود نشان می‌دهد بدین صورت که سطح زیر نمودار که در حقیقت مقدار انرژی مستهلک

شده‌ی حاصل از بارها در ستون است بزرگ‌تر بوده و ستون دارای پوشش پتانسیل بیشتری در مستهلک کردن انرژی وارده داشته است.



شکل (4) نمودار میزان استهلاک انرژی بار جانبی وارد بر ستون

با توجه به بار رفت و برگشتی وارد بر ستون می‌توان عکس‌العمل‌های پای ستون را به دست آورد که برای ستون دارای CFRP مقدار عکس‌العمل بالاتری ثبت شده است ولی در ستون فاقد CFRP از یک زمان به بعد نیروی عکس‌العمل روند صعودی خود را از دست داده که می‌تواند ناشی از تشکیل مفصل پلاستیک در پای ستون باشد.



شکل (5) عکس‌العمل نیرو در پای ستون

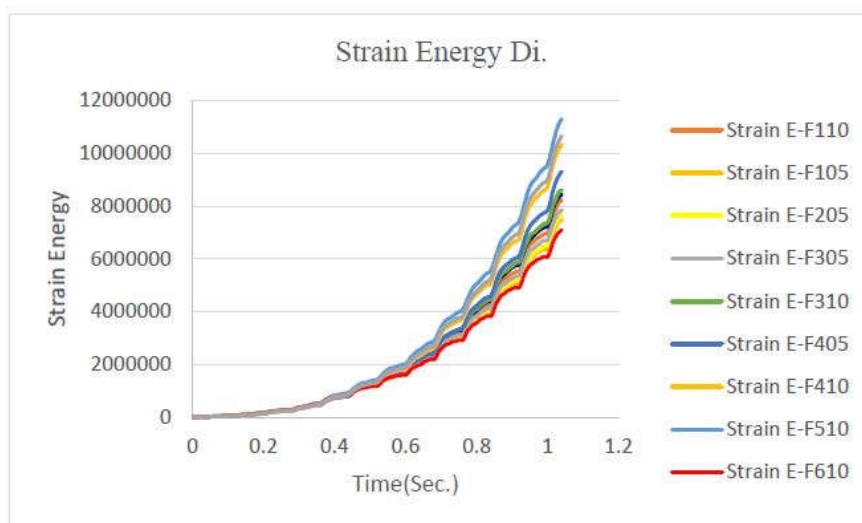
با توجه به بار رفت و برگشتی وارد بر ستون می‌توان عکس‌العمل‌های پای ستون را به دست آورد که برای ستون دارای CFRP مقدار عکس‌العمل بالاتری ثبت شده است ولی در ستون فاقد CFRP از یک زمان به بعد نیروی عکس‌العمل روند صعودی خود را از دست داده که می‌تواند ناشی از تشکیل مفصل پلاستیک در پای ستون باشد. شکل (5)

#### نتیجه‌گیری

- 1- استفاده از CFRP باعث افزایش 53 درصدی انرژی مستهلک شده در ستون شده است.
- 2- خرابی ستون‌ها در سازه از نوع پیش رونده است این موضوع یعنی خرابی ستون‌ها به سرعت به بقیه سازه منتقل می‌شود در حالی که خرابی تیرها از نوع موضعی بوده و به بقیه سازه منتقل نمی‌شود پس با توجه به مطالب گفته شده، استفاده از FRP می‌تواند به نوعی کمک‌کننده برای رسیدن به مکانیزم دوم (تیر ضعیف-ستون قوی) در ساختمان‌های در حال بهره‌برداری باشد.

#### مقاوم سازی و بهسازی لرزه ای

**مقاوم سازی دیوارهای برشی با الیاف کامپوزیتی FRP تحت بار چرخه ای**



تقویت دیوارهای برشی بتن مسلح از طریق اتصال ورق های CFRP یکی از روش های متداول در افزایش شکل پذیری و جذب انرژی و کاهش خسارت در آنهاست. در این تحقیق با مدل سازی و تحلیل توسط نرم افزار ABAQUS، شکل پذیری و میزان انرژی جذب شده دیوارهای برشی تقویت شده با صفحات CFRP با دیوار برشی تقویت نشده مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج حاصل از تحقیق با نتایج آزمایشگاهی موجود صحت سنجی شد. در این تحقیق 10 دیوار برشی مقاوم سازی شده با الیاف CFRP با نمونه آزمایشگاهی تقویت نشده مورد مقایسه قرار گرفت. متغیرهای اصلی تحقیق شکل هندسی ورق های CFRP و موقعیت قرارگیری آنها روی دیوار برشی و ضخامت لایه ورق های CFRP می باشد. نتایج حاصله از تحلیل نرم افزاری نشان می دهد که استفاده از ورق های CFRP باعث افزایش شکل پذیری و کاهش توزیع تنش میانگین در بتن دیوار می گردد.

دیوارهای برشی بتنی ممکن است به دلایل متعددی همچون بروز اشتباه در طراحی، ضعف و اشکال در اجرا، تغییر کاربری ساختمانها، افزایش بارهای وارده و همچنین کاهش سطح عملکرد به علت گذشت زمان و زوال بتن، خرابیهایی در آنها بوجود آید که نیاز به مقاوم سازی داشته باشند. به همین خاطر محققین زیادی مسأله تقویت را مورد توجه قرار دادند. تقویت سازه ها به این صورت بیشتر به منظور افزایش مقاومت و بهبود شکل پذیری و رفتار اجزای موجود میباشد. این تقویت ها میتواند منجر به افزایش ظرفیت خمشی و برشی و یا هردوی آنها گردد. روش های مختلفی برای تقویت خمشی و برشی مورد استفاده قرار می گیرد. از جمله استفاده از کابل های پیش تنیده، استفاده از آرماتورهای خارجی، اتصال صفحات فولادی یا پلیمری (CFRP) به وسیله چسب اپوکسی به دیوار برشی روشی بسیار ساده و قابل اجرا در افزایش شکل پذیری و تقویت خمشی و برشی دیوارهای برشی میباشد. استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف CFRP به عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوه ها موجود مقاوم سازی معرفی شده است. مصالح CFRP سبک، مقاوم در برابر خوردگی و مقاومت کششی بالا هستند. این مصالح به شکل های مختلف در گسترهای از انواع ورق های چندلایه کارخانه ای گرفته تا ورق های خشک قابل پیچش روی اشکال مختلف سازه های قبل از اضافه کردن رزین، قابل دسترس باشد. در اغلب موارد سیستم های CFRP به صورت پروفیل های نسبتاً نازک عمل آوری شده در اجرا مطلوب می باشند. برای مدل سازی از نرم افزار Abaqus/CAE برای تحلیل از Abaqus/Explicit و برای پردازش نتایج از Abaqus/Viewer استفاده شده است. پس از اتمام تحلیل، نحوه و مقدار توزیع پارامترهایی نظیر شکل پذیری و میزان جذب انرژی از مدل ها محاسبه و مورد مقایسه با نمونه مرجع قرار گرفت.

## مصالح

دیوار برشی مرجع را در این پژوهش یک دیوار برشی بتنی مسلح می‌باشد شرایط مرزی پای دیوار در تمامی جهات و دوران بسته شده است و قسمت بالای دیوار نیز در جهت برای جابه جایی و دوران محدود شده است. دیوار برشی تحت بار جانبی بصورت چرخه‌ای و بار قائم KN200 می‌باشد، شکل پذیری و میزان جذب انرژی در دیوارهای تقویت شده با دیوار مرجع مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های FRP

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	$E_c$ (GPa)	$E_f$ (GPa)	$K_f$	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{fu}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
CFRP	1480	141	141	1.0	1410	1410	1410

جدول ۲- مقادیر تنش فرورفتگی ورق‌های FRP

	Tension		Compression		Shear $T_{cr}$ (MPa)
	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)	$\sigma_{cc}$ (MPa)	$\sigma_{cc}$ (MPa)	
CFRP	1410	1410	1410	1410	86

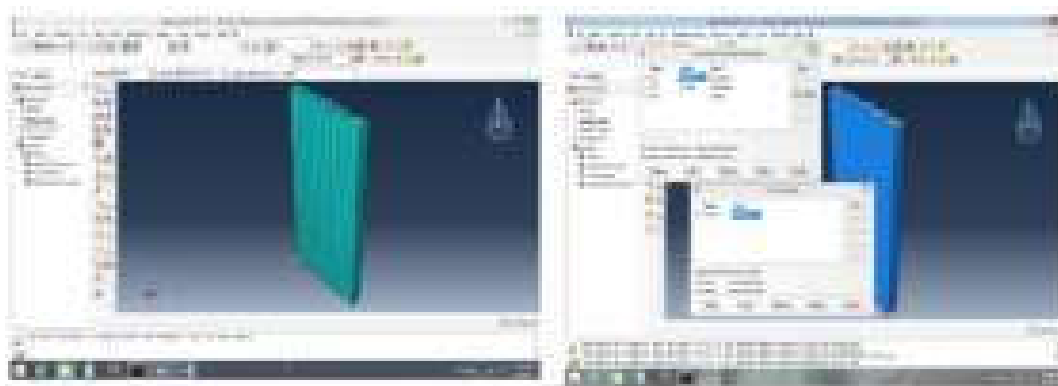
جدول ۳- مقادیر انرژی فرورفتگی ورق‌های FRP

	Tension		Compression		Shear $F_{cr}$
	$F_{cu}$	$F_{tu}$	$F_{cc}$	$F_{cc}$	
CFRP	197.71kN	197.71kN	197.71kN	197.71kN	11.97kN

مشخصات مصالح-مقاوم-سازی-دیوار-برشی

## فرآیند مدل سازی

سازه مورد بررسی در این تحقیق دیوار برشی به ابعاد 1400\*700 و با ضخامت 100 میلی‌متر می‌باشد این دیوار با آرایش متفاوت ورق‌های CFRP و با ضخامت‌های متفاوت در دو سمت دیوار تقویت شد با توجه به نسبت کوچک ضخامت با ابعاد سازه برای مدل‌سازی از المان پوسته S4R استفاده گردید. شکل زیر تصویر محل قرارگیری تکیه گاه‌ها در دیوار برشی را نشان می‌دهد. ابعاد مورد استفاده در مش بندی 25\*25\*25 میلی‌متر می‌باشد. قیود Embedded region برای گیرایی بین بتن و آرماتورها و Tie برای ارتباط ورق CFRP با بتن انتخاب شده است.



شکل ۱- مدل سه بعدی دیوار برشی

شکل ۲- شبکه مش و بین‌بندی المان‌های دیوار برشی

فرآیند-مدل-سازی-مقاوم-سازی

### مشخصه های مصالح

**FRP:** یک نوع ورق کامپوزیتی در این تحقیق بکار گرفته شده است. رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی و الیاف از جنس کربن (T300) به منظور بررسی تأثیر ضخامت بر پارامترها ضخامت ورق های CFRP 0/5 و 1 میلیمتر انتخاب شده است CFRP های مورد است.

**بتن:** مقاومت فشاری بتن در پژوهش 29,5 مگاپاسگال در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب در آن از مدل خسارت مومسانی بتن (concrete Damage plasticity) استفاده شده است. مقادیر تنش و کرنش پلاستیک موردنیاز در این مدل از گزارش نتایج پژوهش های آزمایشگاهی پیشین گرفته شده است. مشخصات مورد استفاده برای مدلسازی بتن در جدول زیر ارائه شده است.

**فولاد:** با در نظر گرفتن اینکه میلگردهای به کار رفته در دیوار بتنی تحت بار لرزه ای وارد ناحیه غیر خطی می شوند، در مورد شبیه سازی رفتار فولاد بایستی هر دو ناحیه کشسان و مومسان را در نظر گرفته و مشخصات مورد نظر در هر دو ناحیه به نرم افزار داده شود. در ناحیه کشسان، ضریب کشسانی 210 گیگاپاسگال، ضریب پیواسون 3/0 و چگالی نسبی 7,85 در نظر گرفته می شوند. ویژگی های فولاد در ناحیه مومسان در جدول 6 آورده شده است.

جدول 4- مشخصات پلاستیک بتن در کشش

Tensile stress (MPa)	Inelastic cracking strain
3.38	0.0001
3.49	0.0001
3.59	0.0001
3.77	0.0001
3.99	0.0001

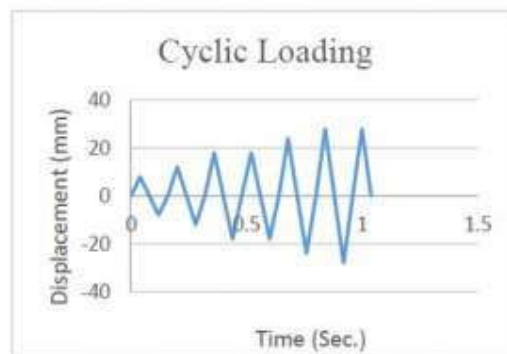
جدول 5- مشخصات پلاستیک بتن در فشار

Compressive Stress (MPa)	inelastic strain
3.49	0.0001
3.59	0.0001
3.78	0.0001
3.99	0.0001
4.19	0.0001
4.39	0.0001
4.59	0.0001
4.79	0.0001

مشخصات-بتن-مصالح-مقاوم-سازی

### بارگذاری

بارگذاری لرزه ای به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. یک قطعه صلب بالای دیوار برشی اعمال شده جهت جلوگیری از تمرکز تنش و بارگذاری جانبی از طریق صفحه صلب به دیوار اعمال می گردد و بار قائم 200KN به مرکز ثقل جسم صلب وارد می شود. بارگذاری چرخه ای اعمالی به دیوار در شکل زیر آورده شده است.



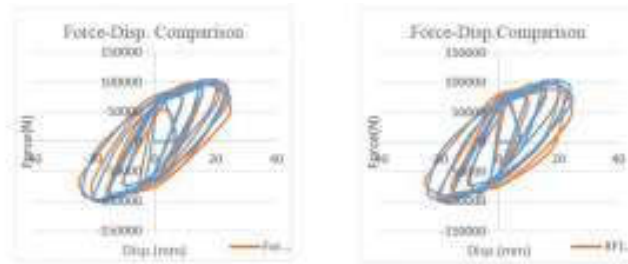
بارگذاری-اعمالی-به-دیوار-مقاوم-سازی

### تحلیل و بررسی یافته ها

برای تحلیل مدل ها از تحلیلگر صریح (Explicit) نرم افزار Abaqus استفاده شده است. از این تحلیلگر در مواردی که هدف، تحلیل دینامیکی مدل در زمان اندک مورد نظر باشد، استفاده می گردد. در این پژوهش شکل پذیری با توجه

به چرخه های هیستریزیس مدل تقویت شده و مدل تقویت نشده و همچنین میزان جذب انرژی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

ابتدا دیوار برشی بتن مسلح مدل سازی گردید و پس از تحلیل چرخه هیستریزیس مدل و میزان انرژی جذب شده توسط دیوار تعیین گشت. سپس دیوارهای تقویت شده با آرایش های متفاوت ورق های FRP به ضخامت ها 5/0 و یک میلی متری مدل سازی و تحلیل شد. جدول زیر مشخصات دیوارهای تقویت شده را نمایش میدهد با مقایسه ی نتایج بدست آمده پس از تحلیل دیوار برش ها تقویت شده با دیوار مرجع، کارایی روش مقاوم سازی و پارامترهای بهینه حاصل می شود.

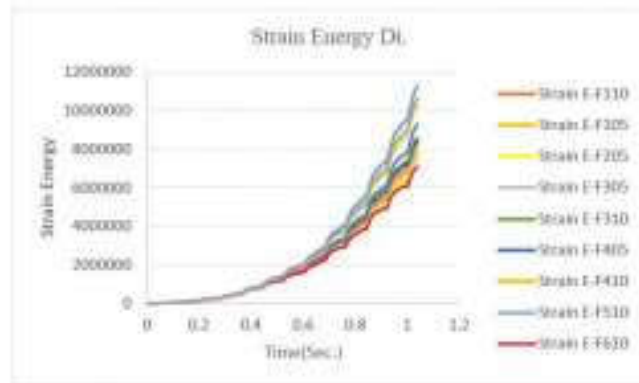


نمودار-چرخه-هیستریزیس-مقاوم-سازی-نمونه ها

پارامترهایی برای مقایسه بین رفتار دیوار برشی تقویت شده با دیوار مرجع انتخاب شد عبارت بود از: شکل پذیری میزان جذب انرژی آشکار است که یک سیستم مقاوم سازی مطلوب بایستی شکل پذیری سازه را محدود نموده و میزان جذب انرژی را افزایش دهد.

با بررسی چرخه های هیستریزیس اثر به کارگیری ورق های CFRP با ضخامت های 5/0 و 1 mm برای تقویت دیوار برشی واضح است. با به کارگیری CFRP در دیوار برشی میزان شکل پذیری در نمونه پنج که بهترین روش مقاوم سازی می باشد را به طور نمونه های تقویت شده افزایش می یابد.

میزان جذب انرژی میزان جذب انرژی در دیوار برش های تقویت شده و دیوار برشی مرجع در شکل 14 آورده شده است. میزان جذب انرژی با توجه به آرایش های متفاوت مقاوم سازی، بیشترین جذب انرژی مربوط به نمونه 5 که دیوار برشی تقویت شده با آرایش ضربدری با ضخامت 1 mm می باشد.



مقایسه-انرژی-کرنشی-نمونه ها-مقاوم-سازی

#### نتیجه گیری

از بررسی رفتار لرزه ای دیوار برش بتن مسلح مقاوم سازی شده با الیاف CFRP به وسیله نرم افزار المان محدود نتایج زیر قابل بیان می باشد. مقاوم سازی با استفاده از ورق های CFRP تأثیر قابل توجهی بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار لرزه ای داشته و شکل پذیری دیوار برشی را افزایش می دهد.



– با به‌کارگیری ورق‌های CFRP در تقویت دیوار برشی میزان جذب انرژی نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌یابد که نمونه تقویت‌شده با آرایش X با ضخامت mm1 بیشترین میزان جذب انرژی را دارد.  
 – با افزایش ضخامت ورق‌های CFRP میزان شکل‌پذیری نیز افزایش پیدا می‌کند.  
 – در بین انواع آرایش‌های مقاوم‌سازی دیوار برشی در این تحقیق، آرایش X شکل عملکرد مطلوبی بین پارامترهای مورد مقایسه در این تحقیق را دارا است

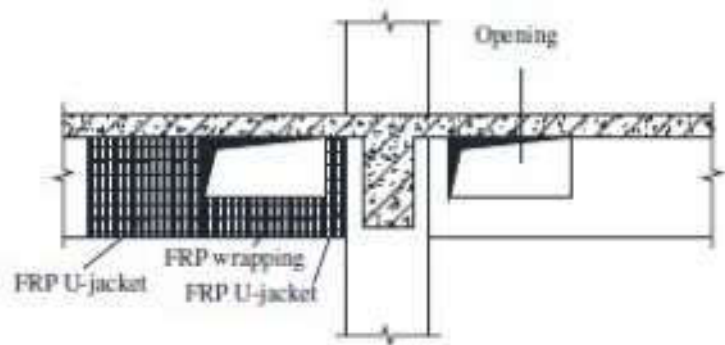
#### مقاوم‌سازی تیر T شکل بتن‌آرمه

تئوری ستون قوی-تیر ضعیف که به‌منظور دستیابی به عملکرد لرزه‌ای مناسب، به‌طور گسترده موردقبول طراحان قرار گرفته است، در بسیاری از سازه‌های موجود که بر اساس آیین‌نامه‌های پیشین طراحی شده‌اند، رعایت نشده است. لذا روش نوین مقاوم‌سازی بر اساس تکنیک ضعف خمشی-مقاومت برشی (FWSS) برای مقاوم‌سازی چنین سازه‌هایی پیشنهاد گردید. بدین منظور در جان تیر T شکل به‌منظور کاهش مقاومت خمشی تیر، یک بازشو ایجاد می‌گردد. موضع موردنظر با FRP تقویت می‌شود تا از شکست برشی المان جلوگیری کرده و از وقوع شکست نرم در مقطع تیر اطمینان حاصل گردد.

در سازه‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری لرزه‌ای ایجاد مکانیزم در تیرها (مفصل پلاستیک در دو سر تیر) بر ستون‌ها ارجحیت دارد. چراکه شکست المان تیر معمولاً بر اجزای محدودی از سازه تأثیر می‌گذارد حال آنکه تخریب ستون می‌تواند نتایج مخربی از جمله خرابی پیش‌رونده را به دنبال داشته باشد. بدین منظور فلسفه‌ی طراحی سازه بر اساس تئوری تیر ضعیف-ستون قوی توسعه یافت. گرچه اکثر آیین‌نامه‌های موجود به‌منظور اطمینان از ایجاد مکانیزم در تیرها، یک نسبت مقاومت خمشی (نسبت مجموع ظرفیت خمشی ستون‌ها به تیرها) بزرگ‌تر از یک تعیین کرده‌اند، اما مطالعه‌ی سازه‌ای تخریب‌شده در زلزله‌های شدید حاکی از آن است که مکانیزم به‌ندرت در تیرها تشکیل شده است. چراکه اکثر سازه‌های موجود بر اساس آیین‌نامه‌های قبلی طراحی و ساخته شده‌اند. از جمله می‌توان به عدم توجه به سهم دال‌های درجا در مقاومت خمشی تیرها اشاره کرد.  
 در چنین شرایطی یک راهکار جهت دستیابی به مکانیزم ستون قوی-تیر ضعیف، تقویت ستون به‌منظور افزایش ظرفیت آن خواهد بود؛ اما به دو دلیل تقویت ستون به‌تنهایی معمولاً ناکافی است:

- استفاده از ژاکت بتنی یا فولادی منجر به افزایش جرم و/یا سختی ستون شده و بنابراین نیروی لرزه‌ای ستون را افزایش می‌دهد. همچنین پوشش FRP تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت ستون، علی‌الخصوص ستون‌های غیر دایره‌ای ندارد.
  - حتی در صورت تأمین مقاومت کافی، موقعیت شکست به‌سادگی از انتهای ستون به فونداسیون و/یا محل اتصال تیر به ستون منتقل می‌گردد که مقاوم‌سازی آن‌ها امری بس دشوار است.
- با توجه به محدودیت‌های فوق‌الذکر، روش نوین مقاوم‌سازی لرزه‌ای بر اساس مفهوم کاهش مقاومت خمشی انتهای تیر همراه با تقویت برشی موضعی توسعه یافت که از آن با عنوان FWSS یاد می‌شود. به‌منظور کاهش مقاومت خمشی انتهای تیر سه روش پیشنهاد گردیده است:

- روش بازشو تیر (BO)
- روش کاهش سطح مقطع تیر (SR)
- روش شکاف دال (SS)



شکل (1) طرح شماتیک از بازشو تیر جهت کاهش مقاومت خمشی

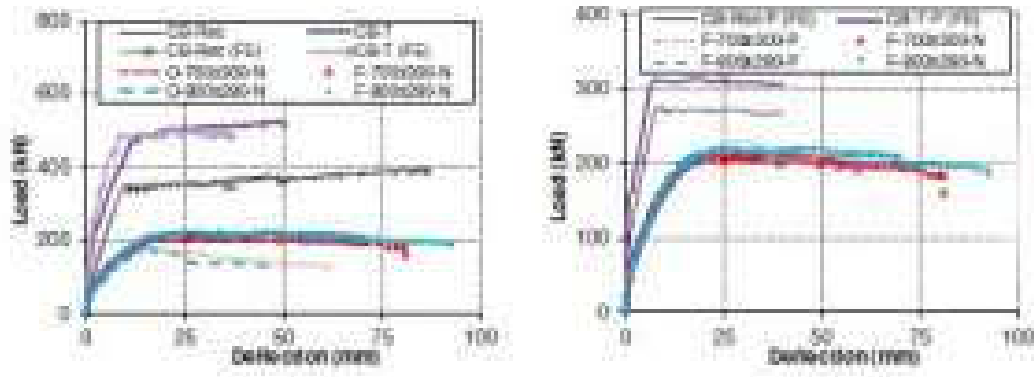
در این مطالعه از روش بازشو تیر که شامل ایجاد بازشو در هر دو انتهای تیر T شکل همراه با نصب سیستم تقویت موضعی به منظور جلوگیری از شکست برشی در تیر می‌شود، استفاده شده است. چنانکه مطالعات نشان داده است پوشش‌های FRP تأثیر بسزایی در افزایش ظرفیت برشی تیرهای بتن‌آرمه دارند. استفاده از روش بازشوی تیر از دو منظر دیگر نیز قابل توجه است:

1. بازشوی ایجادشده در جان تیر T شکل می‌تواند به‌عنوان داکت جهت عبور تأسیسات ساختمان مورداستفاده قرار گیرد.
2. از این تکنیک می‌توان به‌عنوان یک قاعده کلی در طراحی سازه‌های جدید استفاده کرد بدین ترتیب که از دیتیلینگ خاص برای دو انتهای تیر به‌جای استفاده از پوشش‌های FRP استفاده گردد. با ایجاد بازشوهایی فوق‌الذکر نیاز به افزایش ارتفاع طبقات جهت عبور داکت‌های تأسیسات و لوله‌ها وجود نخواهد داشت که موجب کاهش ارتفاع سازه و کاهش بارهای وارد بر آن می‌شود. در میان طرح‌های مختلف تقویت تیر T شکل، استفاده از ژاکت U شکل FRP در کنترل ترک‌های برشی و شکست‌های برشی که از گوشه‌های المان شروع می‌شوند، مؤثرتر است. در مجموع 8 تیر بتن‌آرمه با مقیاس واقعی، شامل یک تیر مستطیلی و 7 تیر T شکل تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. تأثیر ابعاد بازشو و FRP نیز مورد قرار گرفته است. مطابق جدول 1، دو نمونه اول فاقد بازشو در جان تیر هستند و به‌عنوان نمونه‌های مبنا در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (1) مشخصات نمونه‌ها

Specimen	Opening size		Web damage chord height (mm)	FRP strengthening	Bending direction	Cylinder compressive strength of concrete $f_c$ (MPa)
	length (mm)	height (mm)				
CB-Ref	NA	NA	NA	NO	Negative bending	42.5
CB-T	NA	NA	NA	NO	Negative bending	42.7
Q-100-300-N	700	300	100/100	NO	Negative bending	42.7
F-700-300-N				YES	Negative bending	41
F-700-300-P	800	200	120/100	YES	Positive bending	44.1
Q-800-200-N				NO	Negative bending	42.7
F-800-200-N	800	200	120/100	YES	Negative bending	41
F-800-200-P				YES	Positive bending	44.1

CB-Rec تیر مستطیلی شکل است که جهت شبیه‌سازی شرایطی که سهم دال در مقاومت ناچیز است در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر CB-T یک تیر T شکل است که شرایط یک سازه‌ی واقعی را نشان می‌دهد جایی که دال سهم قابل توجهی در مقاومت خمشی تیر ایفا می‌کند. سایر 6 نمونه مانند CB-T بوده با این تفاوت که دارای بازشو با ابعاد مختلف در یک یا دو دهانه هستند.



شکل (2) منحنی‌های بار-تغییرشکل. سمت چپ: تحت لنگر خمشی منفی و سمت راست: تحت لنگر خمشی مثبت مطابق نمودارهای بالا دو نمونه‌ی بدون بازشو، رفتار بار-تغییرشکل مرسوم تیرهای بتن‌آرمه را نشان می‌دهند که از سه بخش (1) قبل از ترک بتن پایین مقطع در کشش (2) بعد از ترک‌های کششی بتن و (3) بعد از تسلیم آرماتورهای طولی پایین مقطع تشکیل شده است.

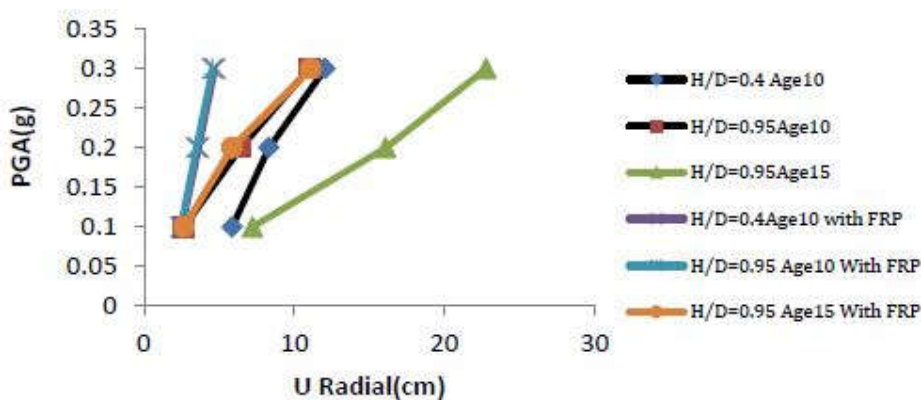
نمونه‌های با بازشو جان و بدون تقویت تحت لنگر خمشی منفی رفتار مشابه نمونه‌های بالا نشان دادند با این تفاوت که شیب ناحیه دوم منحنی آن‌ها به مراتب کوچک‌تر است. بعد از تقویت نمونه‌های فوق، بار منجر به ترک تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند، شیب ناحیه دوم اندکی افزایش می‌یابد. همچنین تخت‌شدگی بیشتر ناحیه‌ی سوم منحنی در نمونه‌های تقویت‌شده حاکی از افزایش ظرفیت تغییرشکل و شکل‌پذیری است. با این حال بار تسلیم و نهایی نمونه‌های تقویت‌شده به مراتب کوچک‌تر از نمونه‌ی مستطیلی است که بیانگر آن است که ابعاد بازشو بیش از اندازه بزرگ در نظر گرفته شده‌اند به طوری که موجب ضعف کلی تیر شده است

شکل (3) نمونه ساخته‌شده جهت آزمایش بارگذاری



## نتایج:

1. روش پیشنهاد شده به طور مؤثر باعث کاهش ظرفیت خمشی منفی (بال تیر در کشش) و ظرفیت خمشی مثبت (بال تیر در فشار) تیر T شکل می‌گردد.
  2. آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ارتفاع بازو نسبت به طول بازو تأثیر بیشتری بر کاهش مقاومت خمشی تیر دارد.
  3. سیستم تقویت پیشنهاد شده با FRP که شامل پوشش کامل CFRP بر بال مقطع T شکل و دو ژاکت U شکل در جان تیر، نه تنها باعث افزایش مقاومت برشی تیر که شکل‌پذیری را به طور چشمگیری در فرایند شکست افزایش می‌دهد.
  4. ابعاد بازو موجود در نمونه‌ها منجر به کاهش مقاومت خمشی تا حدود 47٪ شد؛ اما در نمونه‌های واقعی و اجرایی مقاوم‌سازی، درجات کمتری از کاهش مقاومت کافی خواهد بود که البته نیاز به مطالعات بیشتر دارد.
- بررسی پدیده خوردگی روی کمانش مخازن استوانه‌ای جدارنازک فلزی تقویت شده با FRP تحت بار لرزه ای**



شکل ۱۹- نمودار شبه مسیر تعادل کلیه مخازن در سنین مختلف تحت اثر زلزله پارکفیلد.

یکی از عوامل تاثیرگذار بر کارکرد مخازن در طول عمر مفید آن‌ها، پدیده خوردگی است که در اجزای مختلف مخازن می‌تواند به وجود آید. این پدیده، تاثیراتی را بر رفتار کمانشی و پاسخ لرزه ای مخازن خواهد داشت. تحقیق حاضر به بررسی اثرات خوردگی بر کمانش مخازن استوانه‌ای تحت اثر بار لرزه ای و مقاوم سازی آن‌ها به کمک ورقه‌های کامپوزیت می‌پردازد. بدین منظور دو مدل مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.4 و 0.95 در نظر گرفته شده است. اثرات خوردگی، در بخش بالایی و پایینی دیواره مخزن و بانرخ وقوع 0.5 میلی متر در سال فرض شده است. هر کدام از مخازن در بازه‌های زمانی 10، 15 و 20 سال از آغاز بهره برداری در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی تحریکات لرزه ای، از شتاب نگاشت زلزله پارکفیلد (1966) استفاده شده است و برای تعیین PGA بحرانی نظیر وقوع کمانش در هر مخزن، این شتاب نگاشت، با PGA های متفاوت بین 0.1g تا 0.3g بر پای هر مدل اعمال گردیده است. ورقه‌های کامپوزیت جهت تقویت مخازن در یک سوم پایین دیواره مخازن مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.4 پس از گذشت 10 سال از عمر خود با الیاف FRP به هیچ وجه دچار کمانش نمی‌شود و تغییر شکل‌های محیطی ایجاد شده در پای مخزن به شدت کاهش می‌یابد. در مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.95 پس از گذشت 10 سال از آغاز بهره برداری پس از تقویت با ورقه‌های کامپوزیت مشخص شد که پاسخ

دینامیکی وقوع کمانش کاهش خواهد یافت. این درحالی است که همین مخزن پس از گذشت 15 سال علاوه بر کاهش پاسخ، از ایجاد تغییر شکل های زیاد دورتا دور مخزن جلوگیری می کند. مخزن با نسبت 0.95 پس از 20 سال از عمر خود دچار تغییر شکل های بسیار زیادی در پای خود و کمانش در قسمت های مختلف در ابتدای تحلیل استاتیکی است. به همین علت در این تحقیق از تقویت آن صرف نظر شده است.

### مدل مخازن

هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثرات خوردگی بر کمانش مخازن استوانه ای تحت اثر بار لرزه ای و مقاوم سازی آن ها به کمک ورقه های کامپوزیت می باشد. زمانی که پایه یک مخزن مایع تحت اثر لرزش زمین قرار می گیرد، فشار مایع نسبت به حالت تعادل استاتیکی دچار تغییر شکل می شود. درحالی که مخزن تحت اثر شتاب افقی قرار دارد و سطح مایع داخل آن آزاد است، قسمتی از مایع در طول دیواره و کف مانند یک جسم صلب هماهنگ با مخزن حرکت می کند، درحالی که قسمت باقی مانده مایع حول محور افقی عمود بر جهت تحریکات زلزله بصورت گهواره ای نوسان کرده و بابه عبارت دیگر دچار پدیده امواج سطحی می شود.

برای در نظر گرفتن میزان کاهش ضخامت، دیواره ی مخزن به سه قسمت مساوی تقسیم شد: کمر بند پایینی و بالایی به طور متوسط برابر 0.5 میلی متر در سال در نظر گرفته شده است. در نتیجه با توجه به ضخامت اولیه دیواره مخزن، نتایج مورد بررسی، مربوط به 10 تا 20 سال بعد از شروع بهره برداری مخزن می باشد. مشخصات مدل های مورد بررسی در جدول شماره 1، به طور خلاصه آورده شده است.

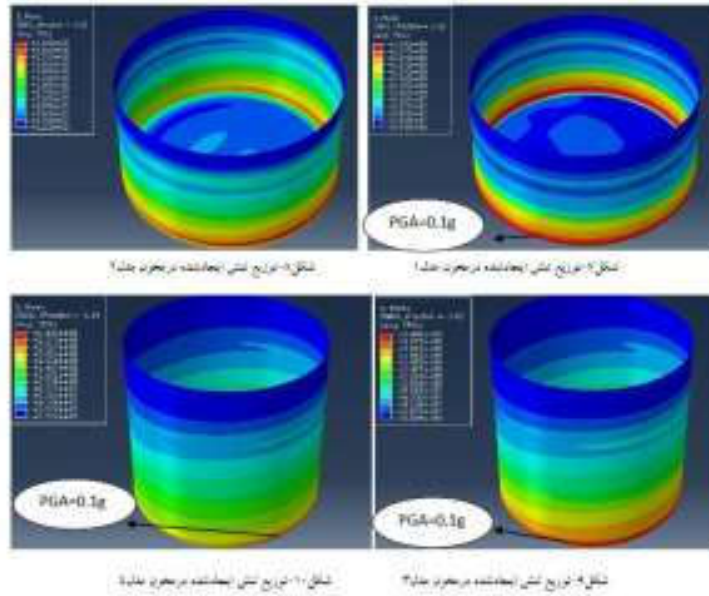
جدول 1- مشخصات مخازن مورد بررسی

Model	Age (Years)	(HUD)	مخازن قسمت تحتانی مخزن (mm)	مخازن قسمت جانبی مخزن (mm)	مخازن قسمت فوقانی مخزن (mm)	تقویت دیواره تحتانی مخزن به کمک ورقه های CFRP
1	۷۰	0.4	5.2	20.2	5.2	تقویت نشده است
۲	۷۰	0.4	5.2	20.2	5.5	تقویت شده است
۳	10	0.95	16.4	21.4	16.4	تقویت نشده است
4	۷۰	0.95	16.4	21.4	16.4	تقویت شده است
5	۷۰	0.95	13.9	21.4	13.9	تقویت نشده است
۶	15	0.95	13.9	21.4	13.9	تقویت شده است

مشخصات-مخازن-مورد-بررسی-مقاوم-سازی-FRP

مقاوم سازی مخازن خورده شده، تحت اثر بار لرزه ای به کمک ورقه های کامپوزیت CFRP

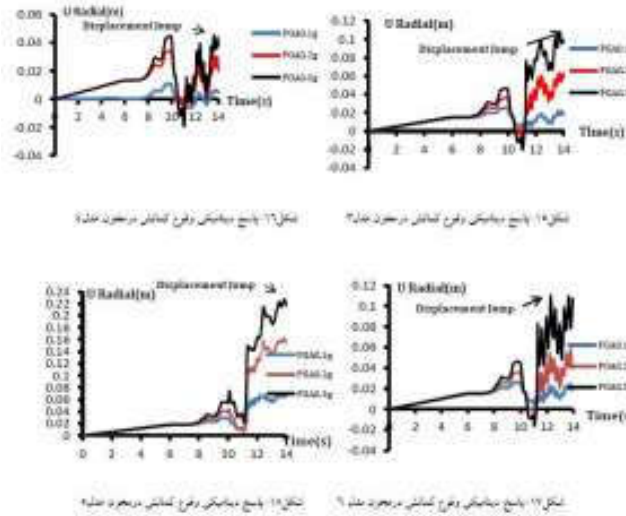
در این بخش، توزیع تنش و شکل کمانش ایجاد شده تحت اثر زلزله پارکفیلد، در مخازن مدل شده به وسیله آنالیز تاریخیچه زمانی آورده شده است.



توزیع-تنش-در-مخازن

### 1-1-26 پاسخ دینامیکی وقوع کماتش به زلزله پارکفیلد در مخازن مدل شده

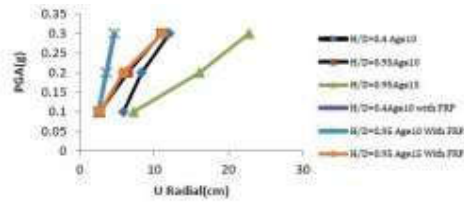
در این بخش، پاسخ های دینامیکی متفاوتی را که مخازن نسبت به زلزله پارکفیلد به وسیله آنالیز تاریخیچه زمانی داشته است، آورده ایم:



پاسخ-دینامیکی-زلزله-مخازن

### 1-1-27 مسیرشبه تعادل کلیه مخازن مدل شده در سنین مختلف تحت اثر زلزله پارکفیلد

به منظور تشخیص راحت تر و مقایسه ای بهتر از تحلیل های صورت گرفته، نمودار PGA ها بر حسب جابه جایی برای کلیه مخازن در شکل 19 آورده شده است که با توجه به شباهت این نمودار به نمودارهای مسیر تعادل، به آن هانمودارهای شبه مسیر تعادل می گویند:



شکل ۱۹- نحوه ارتقا سازه‌های مختلف در سنین مختلف تحت اثر زلزله

مسیر- تعادل- مخزن- زلزله- پارکفیلد

### بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق رامی توان به شرح زیر بیان نمود:

مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.4 پس از گذشت 10 سال از آغاز بهره برداری با اعمال ورقه های کامپوزیت دچار کماتش نمی شود پس از گذشت چند ثانیه FRP و تغییر شکل های محیطی به شدت کاهش می یابد این در حالی است که همین مخزن بدون تقویت با از آغاز تحلیل استاتیکی به کماتش رسیده و تغییر شکل های محیطی زیادی در پای مخزن به وجود می آید.

در مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.95 پس از گذشت 10 سال از آغاز بهره برداری پس از تقویت باالیاف مشخص شده که پاسخ های دینامیکی حاصل از زلزله نسبت به حالت بدون الیاف کاهش یافته و همین طور زمان وقوع کماتش به تعویق می افتد.

در مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.95 پس از 15 سال کار کرده کمک الیاف کامپوزیت مشخص شد پاسخ های دینامیکی حاصل از زلزله به شدت کاهش یافته همچنین از وقوع کماتش های خطرناکی که دور تا دور مخزن بدون تقویت باالیاف به وجود می آمد جلوگیری می کند.

مخزن بانسبت ارتفاع به قطر 0.95 پس از 20 سال شاهد تغییر شکل های محیطی بسیار بزرگ در پای خود و کماتش در قسمت های مختلف مخزن در ابتدای تحلیل استاتیکی است. در تحقیق حاضر از مقاوم سازی این مخزن صرف نظر شده است.

برای آن که مقایسه ای بر اساس بیشترین پاسخ دینامیکی حاصل شده از زلزله در مخازن خورده شده در طول عمر خود داشته باشیم می توان به جدول زیر اشاره کرد.

جدول ۳- حداکثر پاسخ دینامیکی حاصل شده از زلزله در مخازن ورقه های کامپوزیت

Model	H/D	Age(Years)	PGA	حداکثر پاسخ دینامیکی (cm)
1	0.4	10	0.1g	5.87
1	0.4	10	0.2g	8.31
1	0.4	10	0.3g	12.06
2	0.4	10	0.1g	2.58
2	0.4	10	0.2g	3.645
2	0.4	10	0.3g	4.711
3	0.95	10	0.1g	2.67
3	0.95	10	0.2g	6.44
3	0.95	10	0.3g	10.99
4	0.95	10	0.1g	2.44
4	0.95	10	0.2g	3.492
4	0.95	10	0.3g	4.538
5	0.95	15	0.1g	7.21
5	0.95	15	0.2g	16.1
5	0.95	15	0.3g	22.77
6	0.95	15	0.1g	2.67
6	0.95	15	0.2g	5.85
6	0.95	15	0.3g	11.68

### مقاوم سازی

مقاوم سازی ساختمان‌ها پس از مشاهده نتایج زیان بار زلزله‌هایی نظیر زلزله منجیل و بعد از آن زلزله بم در ایران مورد توجه قرار گرفت. هرچند در زمان جنگ تحمیلی نیز بازسازی بعضی از ساختمان‌ها که در اثر حملات هوایی آسیب‌های جزئی و قابل بازسازی داشتند را می‌توان پیدا کرد. عوامل متعددی موجب نیاز ساختمان به مقاوم سازی می‌گردد. برخی از این عوامل خطای طراحی - مشکلات اجرایی - تغییر کاربری - حوادث غیر مترقبه - تغییر در جایگاه عضو سازه - عمر سازه - آتش سوزی و ... می‌باشند.

روش‌های گوناگونی برای مقاوم سازی موجود است که با توجه شرایط سازه، مزایا و معایب آن، یک روش را انتخاب می‌نمائیم. از جمله پرکارترین روش‌های ترمیم و مقاوم سازی سازه مقاوم سازی با FRP - مقاوم سازی با ژاکت فولادی و بتنی - مقاوم سازی با مهارندهای فلزی - مقاوم سازی با شاکریت یا بتن پاش - مقاوم سازی با افزودن دیوارهای برشی - مقاوم سازی با افزودن قاب بتنی یا فولادی می‌باشند.

### ترمیم و مقاوم سازی سیلوها

امروزه مقاوم سازی سازه‌های مختلف به دلیل صرفه اقتصادی و زمانی، نسبت به تخریب و ساخت مجدد بنا در سراسر دنیا بیشتر کاربرد دارد.

سیلوها از جمله سازه‌های صنعتی مهم و پرهزینه جهت ساخت می‌باشند. این سازه‌ها جهت ذخیره سازی سیمان، مواد خوراکی و ... استفاده می‌شوند. سیلوها در معرض دائمی خشک و تر شدن به دلیل ماهیت کاربری آن‌ها بوده که این امر موجب خوردگی و زنگ زدگی میلگردها و در نتیجه ایجاد ترک در دیواره‌های بتنی می‌شود.

کاهش مقاومت سازه که بر اثر خوردگی آرماتورها حاصل شده، با پر کردن ترک‌ها به عنوان مثال با استفاده از اپوکسی برطرف نمی‌شود لذا به یک مقاوم سازی کلی نیازمندیم. اتصال ورق فولادی به پوسته خارجی سیلو نیز بسیار بد منظر است و به علاوه خود این روش نیازمند تعمیر و نگهداری جدی است. به علاوه اتصال این ورق‌ها به نقاط گسسته‌ای از سیلو سبب عدم توزیع مناسب بار می‌شود. علاوه بر این موارد در صورت عدم مقاوم سازی در زمان وقوع زلزله آسیب‌های بزرگ و پرهزینه‌ای وارد خواهد شد.



مشکل دقیق سازه ابتدا باید توسط یک کارشناس مجرب طی عملیات شناسایی و معاینه مشخص گردد.

در مرحله دوم یک گروه متخصص شروع به تخریب بتن معیوب کرده و تخریب بتن در سه مرحله به شرح زیر انجام می‌گیرد.

- تخریب تا روی آرماتور که معروف به تخریب سطحی است که در صورتی که بقیه بتن معیوب نباشد تخریب را پایان می‌دهیم.
  - تخریب بتن تا دو سوم آرماتورها ادامه می‌یابد.
  - تخریب تا دو الی سه سانتی متر پشت آرماتور ادامه می‌یابد.
- لازم بذکر است در هنگام تخریب با دستگاه‌های الکتریکی و یا مکانیکی باید مواظب بود تا به آرماتور ضربه نخورد.



در مواردی که به دلیل بتن‌ریزی غلط در زمان اجرا وضعیت بتن قدیم نامناسب می‌باشد، تخریب بتن را تا هنگامی که بتن معیوب وجود دارد ادامه می‌دهیم. باید در هنگام تخریب در بعضی مواقع که ارتفاع سیلوها زیاد است و همچنین بار طبقات بالای سیلو بر روی جداره پائین وارد می‌گردد به صورت مرحله‌به‌مرحله در حدود یک متر تخریب گشته و مراحل کاشت آرماتور با توجه به ابعاد آئین‌نامه سوراخ‌کاری انجام گیرد. عملیات آرماتوربندی و کاشت گل‌میخ در جداره سیلو نیز با توجه به طراحی به عمل آمده انجام می‌گیرد و سپس قالب‌بندی انجام می‌شود. در این مرحله به مدت 22 ساعت بتن قدیم را آب دهی می‌کنیم تا بتن جدید با بتن قدیم درگیر شود به بتن هنگام بتن‌ریزی مواد افزودنی ضد سایش و منبسط شونده اضافه می‌کنیم تا کاملاً خلل و فرج‌های دیوار قدیم پر شود تا در مقابل بارهای وارده مقاومت بیشتری داشته باشد قبل از بتن‌ریزی در بعضی از نقاط بتن قدیم که درزهای اجرای قدیم قرار دارد یا ترک‌های در آنجا قرار دارد عملیات لوله‌گذاری جهت عملیات تزریق مواد دوغاب به همراه افزودنی کاشته می‌شود تا پس از عملیات بتن‌ریزی انجام گیرد.

برای مراحل بعدی باید سعی شود که قالب مرحله پائین تر در محل خود تا اجرای مرحله بالاتر قرار داشته باشد تا پله اجرایی به وجود نیاید.

برای آب دهی بتن زمانی که بتن جوان باشد زمان آن کمتر از 22 ساعت است که این زمان را به تشخیص کارشناس که عملیات را تحت کنترل دارد اعلام می‌کند.

و اما تخریب برای ارتفاع‌های کوچک حتی قبل از تخریب باید در فاصله‌های معین عملیات نصب پایه‌های اطمینان انجام گیرد تا آرماتورهای قدیم تحت خمش قرار نگیرند و همچنین بتن دیوار تحت فشار قرار نگیرد تا باعث به وجود آمدن عواقب جبران‌ناپذیر نگردد.

از دیگر مواردی که نیاز به مقاوم‌سازی دارد، وجود ترک‌ها در نقاط مختلف یک سازه است، ابتدا باید ترک‌ها را در مدت چند روز تحت بررسی قرار داد تا سطحی و عمقی بودن آن‌ها مشخص شده و در صورت عمقی بودن بهره‌برداری را متوقف نموده تا سازه موردنظر تخریب نگردد. سپس عملیات تقویت انجام گیرد.

در ادامه به ذکر یک مورد مثال اجرایی می‌پردازیم در پروژه‌ای سقف سیلو به مقدار 33 سانتی‌متر نشست کرده، اگر قرار باشد که سقف را تخریب و دوباره اجرا شود بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است لذا یک شاسی فلزی در فاصله 33 سانتی‌متری سقف اجرا شد و سپس یک شبکه آرماتوربندی با هماهنگی و محاسبات انجام گرفته توسط طراح در زیر آن اجرا و در بالای سقف در فاصله‌های مشخصی سوراخ‌های به قطر 23 سانتی‌متر ایجاد گردید و از داخل آن سوراخ‌ها ستون‌های فلزی با جک‌های 6 تنی وصل شد. سپس سقف را بالا کشیده شده و قالب‌بندی در زیر سقف اجرا گردید و از آن سوراخ‌هایی که در بالای سقف اجرا شده بود، عملیات بتن‌ریزی انجام شد.

#### مقاوم‌سازی سیلوها به وسیله FRP

از دیگر روش‌های بسیار سودمند و رایج مقاوم‌سازی این سازه‌ها استفاده از مصالح کامپوزیت پلیمری FRP می‌باشد. استفاده از سیستم‌های FRP راه‌حل مناسب‌ترین نسبت به سایر روش‌هاست، می‌توان سازه را با لایه‌های بسیار نازک در حدود 1.3 میلی‌متر) مصلح نمود که باعث توزیع تنش‌های موجود بر روی تمام سطح به صورت گسترده می‌شود که لازم به ذکر است این لایه‌ها قابلیت اجرا هم به صورت خارجی و هم داخلی را دارند. (برخلاف ورق‌های فولادی که با وسایل اتصال موضعی وصل می‌شوند).

از دیگر مزایای استفاده از کامپوزیت‌های FRP، حذف خوردگی آرماتورها به دلیل خواص فوق‌العاده این ورق‌ها و عدم افزایش ضخامت دیواره می‌باشد و به طور کلی افزایش مقاومت خمشی و برشی قابل توجهی در سازه پس از اجرای لیاف رخ خواهد داد. همچنین لایه‌های FRP را نیز می‌توان به صورت تعمیر چند نقطه در سیلو استفاده کرد.



### مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی

هدف از بهسازی، بهبود رفتار و عملکرد اجزای سازه در برابر نیروهای ناشی از زلزله است. از معیارهای اصلی در یک طرح بهسازی لرزه‌ای می‌توان به مواردی همچون مراحل انجام مقاوم‌سازی، بازرسی از ساختمان و ارزیابی اولیه و کیفی، بازرسی کامل و مطالعات کمی و ارائه طرح مقاوم‌سازی اشاره کرد.

شکست‌های برشی و خمشی دو حالت شکست در تیرهای بتن مسلح می‌باشند که شکست خمشی معمولاً رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. در ستون‌های بتن مسلح خرابی‌های ناشی از زلزله مربوط به شکست‌های ناشی از طول وصله ناکافی، شکست‌های ناشی از برش، خمش و اندرکنش خمش و برش، شکست ستون کوتاه و گسیختگی‌های ناشی از کمانش میلگردهای طولی می‌باشد. به دلیل شکست ترد و برشی ستون‌های بتنی همواره سعی بر آن است که مکانیزم کنترل‌کننده خرابی ستون به صورت خمشی باشد و ستون نباید به عنوان عضوی ضعیف در قاب سازه‌ای عمل کند. مقاوم‌سازی به منظور افزایش مقاومت خمشی، برشی و همچنین برای افزایش ظرفیت شکل‌پذیری ستون در نزدیکی محل اتصال به تیر و مقاوم کردن محل وصله‌های ضعیف صورت می‌گیرد. برای تقویت و مقاوم‌سازی تیرها و ستون‌های بتن مسلح از روش‌های روکش بتن مسلح، روکش فولادی، روکش پلیمر FRP و پیش تنیدگی خارجی استفاده می‌شود.

### روکش بتن مسلح

روکش بتن مسلح شامل یک لایه نازک بتن یا ملات ماسه سیمان مسلح شده با شبکه فولادی است. میزان بهبود رفتار سازه‌ای به درصد شبکه فولادی، قطر و فاصله میلگردها، مقاومت و ضخامت پوشش بتنی بستگی دارد. در تیرها می‌توان ناحیه کششی و فشاری تیر را با روکش‌های بتنی جدید تقویت کرد. برای تکمیل مکانیزم انتقال نیرو بین مصالح قدیم و جدید زیر کردن سطح بتن قدیمی و جوش دادن میلگردهای اتصال با آرماتورهای قدیم و جدید ضروری است. محصور کردن بتن، افزایش مقاومت برشی، افزایش مقاومت خمشی، افزایش سختی جانبی و اصلاح اتصالات در قاب‌ها از جمله کاربرد این روش در تیرهای بتنی است. در روش اجرای روکش بتنی در هر چهار وجه ضخامت بتنی که به وجه بالایی تیر اضافه می‌شود باید در ضخامت سقف ادغام شود. اجرای تنگ‌ها نیز از طریق سوراخ‌هایی که در فاصله‌های نزدیک به هم در دال سقف ایجاد می‌شود امکان‌پذیر خواهد بود.

مناسب بودن طرح روکش بتنی به پیوستگی آن با عضو بستگی دارد. اگر ضخامت روکش بتنی کم باشد افزایش سختی در ستون مقاوم‌سازی شده محسوس نمی‌باشد. اگر افزایش ظرفیت برشی بدون افزایش ظرفیت خمشی باشد پوشش به کار رفته به سقف و تیرها می‌تواند متصل نشود و اگر افزایش ظرفیت خمشی ستون مدنظر باشد روکش به کار رفته باید

از سقف عبور کند و آرماتورهای اضافه شده طولی باید در فونداسیون مهار شوند. روکش بتن مسلح در مواردی که میزان شدت آسیب‌های وارده به ستون زیاد باشد و یا ستون از ظرفیت کافی در برابر نیروهای جانبی برخوردار نباشد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

امکان اصلاح هم‌زمان کلیه مشکلات سختی و مقاومتی در قاب‌های بتنی، اصلاح اتصالات در قاب‌ها، امکان اصلاح باربری ثقیلی ستون‌ها، سهولت ایجاد پیوستگی بین اعضاء و عدم نیاز به پوشش ضد حریق از مزایای روش روکش بتن مسلح محسوب می‌شود.



شکل 1: اجرای روکش ستون بتن مسلح

### روکش فولادی

استفاده از روکش فولادی برای مقاوم‌سازی اعضای بتن آرمه مستطیلی و دایروی به کار می‌رود. ورق‌های فولادی روکش در تمامی طول خود به هم جوش می‌شوند و فضای اندک بین روکش توسط ملات منبسط شونده پر می‌شود. برای بهبود عملکرد مجموعه می‌توان از کاشت میلگرد برای انتقال برش بین ورق و بتن استفاده کرد. برای تقویت خمشی تیرها می‌توان ورق‌هایی به ضخامت کم را با رزین اپوکسی به وجه کششی تیر چسباند. چسباندن ورق به وجه قائم تیرها در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها موجب افزایش ظرفیت برشی و چسباندن ورق به بال تحتانی موجب افزایش ظرفیت خمشی تیر می‌گردد..

ستون‌های مستطیلی را می‌توان با استفاده از روکش‌های فولادی مدور تقویت کرد. روکش فولادی دایره‌ای از دو ورق فولادی نیم دایره تشکیل شده که به یکدیگر جوش شده‌اند. استفاده از روکش فولادی مدور به مراتب دشوارتر از سایر روش‌های روکش گذاری می‌باشد ولی تحقیقات نشان می‌دهد که این روش در افزایش مقاومت و تغییر مکان غیر الاستیک ستون‌ها بسیار مؤثر می‌باشند. روکش‌هایی که به شکل بیضی کشیده شده‌اند مقاومت برشی و دورگیری بهتر را برای رفتار حول محور قوی فراهم می‌کنند درحالی‌که در روکش‌های دایره‌ای مقاومت و دورگیری بهتری را حول محور ضعیف ستون ایجاد خواهند کرد. با آن که روکش‌های فولادی دایره‌ای مانند حلقه مسلح کننده پیوسته می‌باشند ولی بکارگیری آن برای ستون‌های با مقطع مستطیلی توصیه نمی‌شود چون انعطاف‌پذیری خمشی تنها در گوشه‌ها فراهم می‌شود.

استفاده از روکش‌های فولادی احتمال شکست وصله آرماتورهای طولی را کاهش داده و مقاومت خمشی وصله‌های پوششی در ستون را افزایش می‌دهد کاربرد روکش فولادی در ستون‌های با مقاومت فشاری پایین بیشترین تأثیر را دارد و همچنین با افزایش ضخامت روکش نیروی قابل تحمل ستون افزایش می‌یابد.

همچنین نیاز به پوشش‌های ضد حریق در سازه‌های مهم و افزایش هزینه، زمان زیاد اجرا و عملیات متعدد کاشت آرماتور و جوشکاری، افزایش هزینه، نیاز به حجم زیاد گروت و عملیات تزریق و عدم امکان اصلاح اتصالات در قاب‌ها از معایب این نوع روکش محسوب می‌شود.



شکل 2: اجرای روکش ستون فولادی

اجرای روکش بر روی اتصالات با استفاده از روکش‌های فولادی موجدار در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح تأثیرگذار است. در این روش اتصالات ضعیف توسط روکش‌های فولادی موجدار پوشانده می‌شوند و فاصله موجود بین سطح بتن و روکش فولادی با گروت ضد جمع شدگی پر می‌شود. این ورق‌ها ضعف‌های عمده‌ای مانند فقدان آرماتور برشی کافی و نیاز به آرماتورهای محصورکننده هسته بتنی را کاهش می‌دهند.

### روکش پلیمر FRP

FRP یا فیبرهای پلیمری تقویت شده نوعی ماده کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین از جنس پلیمر احاطه شده است. مصالح FRP خواص فیزیکی مناسبی دارند که می‌توان به مقاومت کششی بالا، ضخامت و وزن کم آن‌ها اشاره کرد. از FRP در تقویت ستون‌ها، تیرها، دال‌ها، اتصالات، دیوارهای برشی بتنی، دیوارهای آجری و عرشه پل‌ها می‌توان استفاده کرد. به طور کلی افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری دو پیامد مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح با استفاده از مصالح FRP می‌باشد.

در هنگام استفاده از مصالح FRP باید سطح بتن و سطح FRP را آماده کرد. جهت آماده کردن سطح بتن و برای جلوگیری از کنده شدن صفحه و چسب از روی سطح بتن این سطح تمام موارد ناصافی و ناهمواری باید صاف و هموار شود. اگر سطح صفحه به طور مناسب آماده نشود ممکن است جدایی اتصال در سطح نوار FRP با چسب رخ دهد. مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتنی نیز باید به موازات مقاوم‌سازی خمشی صورت گیرد تا شکست برشی مانع از ارائه حداکثر مقاومت خمشی تیر نگردد و تیر به حالت خمشی تحت اثر خمش به نقطه شکست برسد. در ارتباط با شکست در حالت کنده شدن انتهای نوار مقاومت‌کننده تیر مقاوم‌سازی شده در برابر خمش وقتی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد قبل از این‌که به حداکثر مقاومت خمشی مورد نظر برسد ممکن است دچار شکست زودرس ناشی از کنده شدن صفحه چسباننده شده از بتن گردد. در مورد جدا شدن و کنده شدن پوشش بتن که متداول‌ترین حالت شکست زودرس است و به دلیل این‌که شکست دور از سطح چسبندگی بتن و FRP رخ می‌دهد نمی‌توان آن را دقیقاً حالت شکست چسبندگی نامید. این حالت اغلب به علت تمرکز تنش‌ها در انتهای صفحه مقاوم‌کننده می‌باشد. عموماً کنده شدن پوشش بتن در این‌گونه شکست‌ها به دلیل بروز ترک خوردگی در انتهای صفحه چسباننده شده و یا نزدیکی آن به دلیل تمرکز تنش‌های برشی و نرمال ناشی از تمام شدن ناگهانی صفحه مقاوم‌کننده رخ می‌دهد. در شرایط از بین رفتن چسبندگی به دلیل بروز ترک‌های خمشی عامل محرک فاصله گرفتن افقی دو لبه ترک از یکدیگر می‌باشد زیرا اصولاً ترک‌های خمشی در راستای عمود بر محور طولی تیر رخ می‌دهد اما در شرایطی که ترک‌ها از ترکیب خمش و برش به وجود آمده‌اند وضعیت قرارگیری آن‌ها مایل می‌باشد و بنابراین دو لبه ترک نسبت به یکدیگر جابه‌جایی قائم هم دارند که این

امر عامل اصلی بوجود آمدن تنش‌های بزرگ که سبب کنده شدن FRP از بتن به صورت موضعی می‌شوند، می‌باشد. تقویت برشی بررسی استفاده از مصالح FRP به منظور افزایش مقاومت برشی مقاطع بتن آرمه می‌باشد. در این روش صفحات FRP به وجوه جانبی تیر چسبانده می‌شود به طوری که راستای الیاف عمود بر محور طولی تیر یا مایل می‌باشد. سیستم مهاربندی و پیش تنیدگی اصولاً به این جهت مورد استفاده قرار می‌گیرند که بتوان از ظرفیت باربری سیستم FRP نهایت استفاده را برد. مزیت استفاده از این روش افزایش سختی، کاهش عرض و توزیع ترک، بهبود خدمت پذیری و دوام، بهبود مقاومت برشی و خمشی عضو به دلیل ترک نخوردن مقطع، افزایش بار تسلیم مقطع، افزایش ظرفیت مقطع و اجتناب از مودهای شکست ناشی از پوسته‌شدن در ناحیه ترک‌ها و انتهای لایه FRP می‌باشد. سیستم مهاربندی و پیش تنیدگی به گونه‌ای عمل می‌کنند که انتهای لایه FRP را محکم نگه داشته و بعد از ایجاد جدادگی از لغزش و جدادگی کامل لایه FRP جلوگیری می‌کند. در ستون‌های بتنی استفاده از FRP ضمن افزایش ظرفیت برشی بتن مد گسیختگی آن را از حالت برشی به خمشی تغییر داده و شکل پذیری را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. روکش FRP بیشتر برای ستون‌های دایره‌ای قابل اجرا است زیرا با دورپیچی FRP تنش موضعی در گوشه‌های مقاطع مربعی یا مستطیلی توسعه می‌یابد.

کاربرد استفاده از روکش FRP شامل مواردی همچون محصور کردن بتن، افزایش مقاومت برشی، افزایش مقاومت خمشی محدود و غیر لرزه‌ای است. همچنین نیاز به عملیات زیرسازی با ملات مخصوص، عدم امکان اصلاح مقاومت خمشی اعضای قاب‌ها برای مقاصد لرزه‌ای، عدم امکان اصلاح اتصالات و نیاز ضروری به پوشش‌های ضد حریق از معایب این نوع روش به شمار می‌رود.



شکل 3: اجرای روکش تیر و ستون بتنی با مصالح FRP

### مقایسه روش‌های بهسازی روکش بتن مسلح، روکش فولادی و روکش FRP

کلیه روش‌های مقاوم‌سازی ذکر شده باعث افزایش مقاومت و محصورشدگی می‌شوند. در ادامه به مقایسه و ارزیابی سه روش ذکر شده از نظر کاربرد، هزینه، نوع شکست، چسبندگی مواد، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و خوردگی می‌پردازیم.

#### کاربرد

پارامترهای کاربرد جهت تعیین نوع روش بهسازی مورد نظر به عواملی همچون زمان اجرا، مشکلات اجرا و عمل‌آوری تقسیم می‌شوند.

زمان موردنیاز برای روکش بتن مسلح بستگی به نوع تقویت دارد. تنظیم قالب، آرماتوربندی و نصب آن، بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن عواملی هستند که در زمان موردنیاز برای بهسازی تأثیرگذار خواهند بود.

روکش فولادی به زمان نصب کوتاهی نیاز دارد و به قالب نیازی ندارد چون روکش فولادی خود به‌عنوان قالب عمل می‌کند و مسائل مربوط به پاکسازی در آن وجود ندارد زیرا که بتن در داخل پوشش فلزی قرار می‌گیرد.

روکش FRP به آماده‌سازی سطح نیاز دارد. سطح عضو می‌بایست کاملاً تمیز شود و در برخی موارد نیاز است تا با دیسک چرخ سطح را زبر کنیم. برای قالب‌بندی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری به زمان قابل‌توجهی نیاز است. قالب یا بتن اضافی برای بهسازی FRP به‌طور معمول نیاز نیست.

#### هزینه

- هزینه‌های ساخت‌وساز در ارتباط با روکش بتن مسلح متفاوت است و بستگی به نوع آرماتوربندی دارد. آرماتوربندی میلگردها و نصب آن‌ها در محل به زمان قابل‌توجهی نیاز دارد که باعث بالا رفتن هزینه‌ها می‌شود.
- برای روکش فولادی به قالب نیاز نیست و مقدار کمی بتن لازم است تا فاصله بین فولاد و سطح عضو بهسازی را بپوشاند.
- مواردی که برای بهسازی به روش FRP به آن‌ها نیاز است نسبتاً گران هستند.

#### نوع شکست

- معمولاً شکست در روکش بتن مسلح به علت استفاده از فولاد و از نوع خمشی است.
- شکست در روکش فولادی در حالت خمشی است و قبل از شکست تسلیم و کمانش رخ می‌دهد.
- اعضای پوشش داده شده با FRP به‌طور معمول با شکست ناگهانی و بدون هشدار قبلی رخ می‌دهند.

#### چسبندگی مواد

روکش بتن مسلح چسبندگی زیادی را برای مصالح بهسازی مثل بتن و فولاد ایجاد می‌کند تا به صورت مرکب عمل کند. اما روکش فولادی ضعیف‌ترین چسبندگی را در میان روش‌های ارائه شده دارد. مصالح FRP نیز به وسیله اپوکسی به سطح عضو بهسازی پیوند داده می‌شود.

#### مقاومت در برابر آتش‌سوزی و خوردگی

- روکش بتن مسلح محافظ مناسبی برای آرماتورهای فولادی در برابر آتش‌سوزی و خوردگی است.
- روکش فولادی در سطح خارجی خود مقاومتی را در برابر آتش‌سوزی و خوردگی ایجاد نمی‌کند.
- روکش FRP حفاظت کافی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد اما در معرض خطر آتش‌سوزی آسیب‌پذیر است.

#### نتیجه‌گیری

در این مقاله روش‌های بهسازی شامل روکش بتنی، روکش فولادی و روکش FRP موردبررسی و ارزیابی قرار گرفته شد.

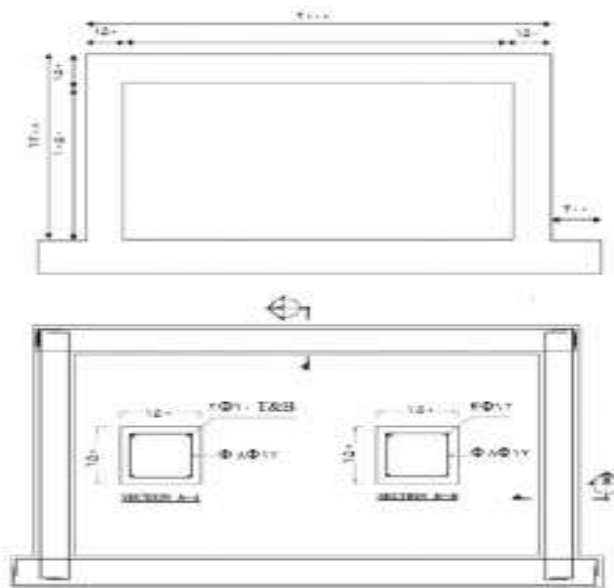
محصور کردن بتن، افزایش مقاومت برشی، خمشی و سختی جانبی و اصلاح اتصالات در قاب‌ها از جمله کاربرد و امکان اصلاح همزمان کلیه مشکلات سختی و مقاومتی در قاب‌های بتنی، اصلاح اتصالات در قاب‌ها، امکان اصلاح باربری ثقلی ستون‌ها، سهولت ایجاد پیوستگی بین اعضاء و عدم نیاز به پوشش ضد حریق از مزایای روش روکش بتن مسلح محسوب می‌شود.

روکش فولادی می‌تواند به عنوان روشی موقت برای بهسازی ستون‌هایی که پس از زلزله دچار آسیب شده‌اند به کار گرفته شوند. کاربرد روکش فولادی در ستون‌های با مقاومت فشاری پایین بیشترین تأثیر را دارد و همچنین با افزایش ضخامت روکش نیروی قابل‌تحمل ستون افزایش می‌یابد. امکان اصلاح اغلب مشکلات سازه‌ای در قالب‌های بتنی، عدم نیاز به قالب‌بندی، سرعت اجرای بیشتر نسبت به روکش بتنی و گزینه مناسب برای محصور کردن بتن جزء مزایای این نوع روکش است.

کاربرد استفاده از روکش FRP شامل مواردی همچون محصور کردن بتن، افزایش مقاومت برشی، افزایش مقاومت خمشی محدود و غیر لرزه‌ای است. مقاومت کششی زیاد، مقاومت در برابر خوردگی، نفوذناپذیری مغناطیسی، امکان تقویت به صورت خارجی، حمل و نقل آسان، سرعت اجرای بالا به دلیل وزن کم، گزینه مناسب برای محصور کردن بتن می‌باشد.

با توجه به دو پارامتر مهم شکست و مقاومت در برابر آتش‌سوزی و خوردگی نتایج به دست آمده از مقایسه سه روش ذکر شده به شرح زیر می‌باشد: شکست در روکش بتن مسلح به علت استفاده از فولاد و از نوع خمشی است. در روکش فولادی قبل از شکست تسلیم و کمانش رخ می‌دهد. اعضای پوشش داده شده با FRP به طور معمول با شکست ناگهانی و بدون هشدار قبلی رخ می‌دهند. روکش بتن مسلح محافظ مناسبی برای آرماتورهای فولادی در برابر آتش‌سوزی و خوردگی است. روکش فولادی در سطح خارجی خود مقاومتی را در برابر آتش‌سوزی و خوردگی ایجاد نمی‌کند. روکش FRP حفاظت کافی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد اما در معرض خطر آتش‌سوزی آسیب‌پذیر است. قبل از دهه 70 میلادی سازه‌های بتنی تحت بارهای ثقلی و بدون توجه به بارگذاری لرزه‌ای طراحی شده است. با وقوع زلزله‌های مخرب دهه 70 میلادی مانند زلزله 1971 سنفراندوی کالیفرنیا، بحث طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و ایجاد شکل‌پذیری کافی در آن‌ها مطرح شد و آیین‌نامه‌های جدیدی برای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها تدوین شدند. با وقوع زلزله‌های مخرب دهه 90 میلادی مانند زلزله 1994 نورتریج آمریکا و 1995 کوبه، آسیب زیادی به سازه‌ها از جمله سازه‌هایی که طبق آیین‌نامه‌های قدیمی تر ساخته شده بودند، وارد آمد. اتصالات تیر-ستون سازه‌ها، یکی از اعضای بحرانی سازه‌ها است، که طراحی آنها طبق آیین‌نامه‌های قدیمی و در نتیجه کمبود آرماتورگذاری در این نواحی هنگام زلزله شدید موجب خرابی کلی سازه می‌شود. هزینه بالای نوسازی سازه‌هایی که در معرض زلزله‌های متوسط و شدید قرار می‌گیرند و همچنین مراحل قانونی و پروسه اداری آن، سازندگان را بر آن می‌دارد که توجه ویژه‌ای به مقاوم سازی سازه‌ها با توجه به آیین‌نامه‌های لرزه‌ای جدید داشته باشند. یکی از روش‌های تقویت و بهسازی که به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از کامپوزیت‌های الیافی FRP است. استفاده از پوشش‌های FRP برای تقویت هم‌زمان ظرفیت برشی و خمشی اعضای بتنی در دو دهه‌ی اخیر مطرح شده است، که با توجه به سختی‌های روش‌های پیشین مانند افزایش سطح مقطع اتصال با بتن ریزی مجدد، محصور کردن ناحیه اتصال با ورق‌های فولادی و غیره و به ویژه با توجه به ملاحظات معماری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از مزایای پوشش‌های FRP می‌توان به: مقاومت در برابر خوردگی و فرسودگی، وزن بسیار کم، مقاومت در برابر بارهای متناوب، دینامیکی و تکراری، افزایش رفتار شکل‌پذیر سازه، رفتار تقریباً یکسان از لحاظ انبساط و انقباض با بتن و صرفه اقتصادی اشاره کرد. تاکنون آزمایش‌های زیادی در زمینه بررسی رفتار اعضای بتنی به صورت جداگانه مانند تیر، ستون، اتصال با استفاده از پوشش‌های FRP انجام شده است. مجموعه‌ی پژوهش‌های این پژوهشگران چشم‌انداز مناسبی از تقویت اعضای بتنی با استفاده از FRP در پیش‌رو قرار می‌دهد. با این وجود، پژوهش‌های کمی در زمینه بررسی رفتار قاب بتنی وجود دارد. بالسامو و همکاران در زمینه تقویت یک قاب بتنی که اتصالات تیر به ستون آن به وسیله‌ی الیاف CFRP دورپیچ شده بود و تحت بار شبه دینامیکی قرار داشته، مطالعاتی انجام داده‌اند. از مهم‌ترین نتایج مطالعات آنان افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی بدون هیچ‌گونه خسارت بحرانی در ناحیه تقویت شده با FRP را می‌توان اشاره کرد. از دیگر پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به مطالعات زو و همکاران اشاره کرد. در این پژوهش دو نمونه قاب درگاهی با مقیاس 1:3 تحت بار سیکلی قرار داده شد. نتایج آزمایش‌های آن‌ها بیانگر افزایش قابل توجه شکل‌پذیری و مقاومت نمونه تقویت شده نسبت به نمونه کنترل بود. پس با توجه به پیچیدگی و تنوع مکانیزم خرابی قاب‌های بتنی تقویت شده به وسیله‌ی الیاف FRP آنالیزهای عددی انجام شده در این زمینه محدود است. جزئیات مدل آزمایش مطابق آنچه در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود می‌باشد. سه نمونه یکی بعنوان نمونه کنترل و دومی با همان مشخصات ولی تقویت شده با الیاف CFRP به صورت الیاف L شکل و حالت دورپیچ (Wrap) در اطراف

تیر و ستون و سومی با تقویت U شکل و دورپیچ در اطراف ناحیه اتصال در آزمایشگاه ساخته شده و بعد از اعمال بار سیکیلی جانبی بر محور تیر، نتایج به وسیله ی برنامه المان محدود LS-DYNA ارزیابی می شود.



هندسه-مشخصات-مدل-آرماتوربندی-مقاوم-

جدول ۱. مشخصات آرماتور مصرفی.

فولاد مصرفی	قطر (mm)	نوع فولاد	تنش تسلیم (MPa)
آرماتور طولی تیر	۱۰	S300	۳۳۰
آرماتور طولی ستون	۱۲	S445	۴۰۰
آرماتور عرضی	۸	S300	۳۳۰

مشخصات-آرماتور-مصرفی-مقاوم-

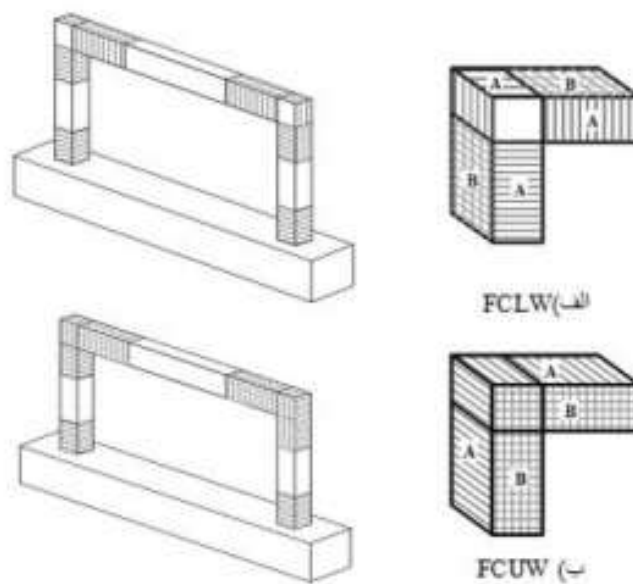
سازی

سازی

### تقویت قاب ها

تقویت قاب ها با دو رویکرد کلی تقویت خمشی و تقویت برشی قاب انجام شد. به منظور تقویت خمشی قاب، با توجه به ثابت بودن تراز بار ثقلی، الیاف کربن به صورت L شکل در بالا و پایین اتصال مطابق شکل زیر نصب شدند. میزان امتداد این الیاف از بر اتصال به اندازه 2 برابر بعد اتصال در نظر گرفته شد (30 سانتی متر). در این نمونه ها وجود ناحیه اتصال فاقد تقویت بود. همان گونه که در شکل نشان داده شده است در نواحی با آرایش شبکه ای از دو لایه FRP استفاده شده است. همچنین به منظور تقویت برشی ناحیه اتصال در قاب الیاف کربن به صورت U شکل مطابق شکل مورد استفاده قرار گرفتند. در نواحی ابتدایی و انتهایی تیر و ستون ها دورپیچی به عرض 30 سانتی متر اجرا شد و همچنین در دو مدل در نواحی اتصال ستون به فنداسیون از دورپیچی به طول 30 سانتی متر استفاده شده است. مشخصات الیاف مصرفی در جدول ارائه شده است. ضخامت الیاف مصرفی 0.167 میلی متر است.





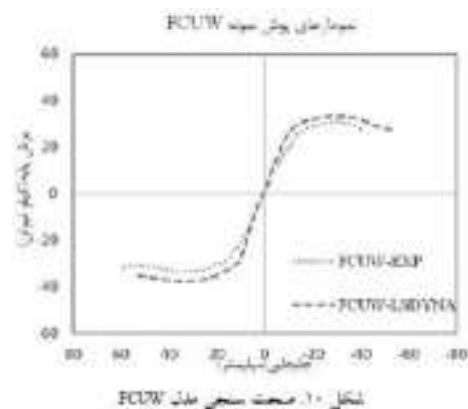
شکل 5. مدل‌های تقویت (تک لایه A= و دو لایه B=)

مدل‌های تقویت‌شده-مقاوم-سازی

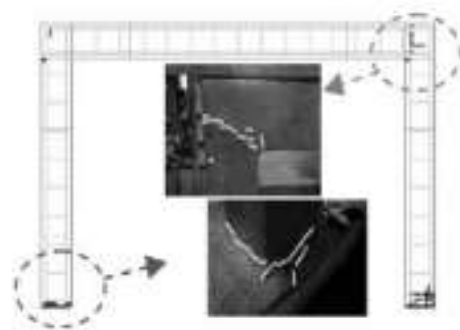
#### نمونه های تقویت شده با FRP

این قاب با یک لایه کامپوزیت الیافی کربنی به ضخامت 0/167 و به طول 300 میلی متر از بر اتصال تیر و ستون قاب در جان آن‌ها تقویت شده است. این اتصال نیز مانند نمونه قبل تحت بارگذاری سیکلی مشابه قرار می‌گیرد. این تقویت L شکل برای مقاوم سازی خمشی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل زیر نمودارهای پوش مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی آمده است که نشان دهنده ی تطابق خوبی است. در شکل بعدی مشاهده می‌شود که علاوه بر منحنی بار تغییر مکان که یک شاخصه کمی است از لحاظ کیفی یعنی آرایش ترک‌ها نیز هم خوانی مناسبی بین نتایج تحلیل المان محدود و آزمایشگاهی وجود دارد.

مقایسه نتایج کمی و کیفی در شکل‌های زیر انجام شده است. در این مدل با توجه به الگوی ترک‌ها راستای ترک‌ها در محل اتصال تیر به ستون و پای ستون از حالت مایل و برشی به حالت افقی درآمده است و تمرکز ترک‌ها از قسمت ناحیه اتصال به پای ستون منتقل شده است.



شکل ۱۰. منحنی بار-انحراف FCUW



شکل ۱۱. مقایسه مکانیسم خرابی FCUW

#### مقایسه-خرابی-مقاوم-سازی

بررسی نتایج از چند منظر تغییر در مکانیسم خرابی نمونه های تقویت شده و تقویت نشده، اختلاف در مقاومت نمونه ها با تغییر جنس الیاف و نوع تقویت و همچنین آثار آنها روی شکل پذیری اتصال و در پایان اثر تعداد لایه های تقویتی بر رفتار اتصال مورد بررسی قرار می گیرد.

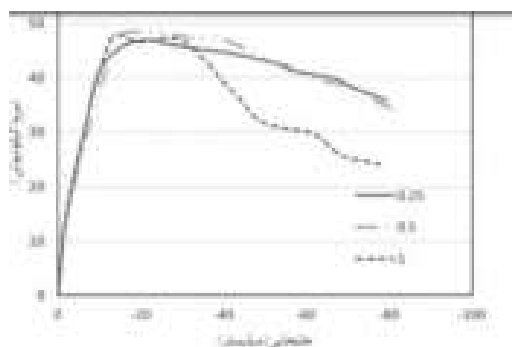
#### بررسی جنس الیاف و تعداد آنها بر رفتار قاب

الیاف FRP موجود به منظور بهسازی سازه های بتن مسلح مورد استفاده قرار می گیرند دارای ضخامت های مختلف است. الیاف CFRP نسبت به الیاف GFRP دارای مدول بالاتر و ضخامت کمتری است. همچنین این الیاف در تعداد لایه هایی بیش از یک لایه مورد استفاده قرار می گیرند. در این بخش اثر جنس و تعداد لایه ها بر رفتار قاب تقویت شده مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه لایه های مورد بررسی در این بخش با زاویه الیاف صفر درجه در نظر گرفته شده اند. در جدول پایین نتایج حاصل از مقدار بار و شکل پذیری برای 6 مدل برای بررسی جنس و نوع تقویت آمده است. با در نظر گرفتن تفاوت ضخامت موجود بین الیاف کربن و شیشه مصرفی، که لایه های FRP قوی تری برای الیاف شیشه نسبت به الیاف کربن را در پی داشته است، نتایج تحلیل ها نشان می دهند الیاف شیشه در زمینه استهلاک انرژی از الیاف کربن مؤثرترند، اما از منظر مقاومت الیاف کربن تا حدودی مؤثرتر از الیاف شیشه است. همان گونه که در شکل مشخص است افزایش تعداد لایه های تقویت بدون تغییر در آرایش آن ها باعث افزایش سختی قاب و افزایش در ظرفیت باربری قاب می شود. افزایش ظرفیت باربری برای تمام نمونه ها مشاهده شد. همچنین شکل پذیری نمونه های تقویت شده کمتر از حالت بدون تقویت است، ولی مقدار شکل پذیری وابسته به ضخامت لایه بوده و در صورت استفاده از ورق های FRP از (جنس شیشه یا کربن) تعداد لایه ها به گونه ای انتخاب می شوند که حاصل ضرب تعداد لایه با احتساب ضخامت لایه در مدول الاستیسیته دو نمونه FGUV و FCUV یکسان شود، باعث افزایش میزان جذب انرژی می شود. با توجه به تغییر ضخامت لایه ها می توان نتیجه گرفت افزایش ضخامت لایه تا حد مشخصی دارای تأثیر مثبت است و با افزایش ضخامت از این حد شکست ترد را در نمونه می تواند موجب شود.

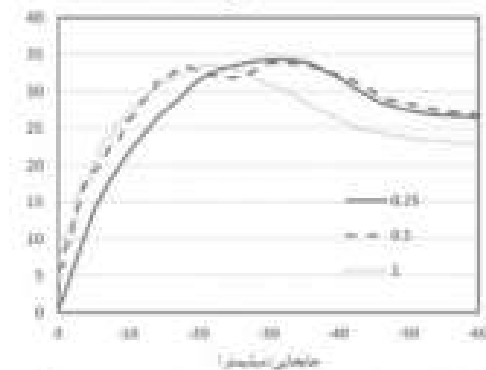
جدول ۷. نتایج بررسی جنس لایه‌ها.

نمونه	مقادیر نیروی ماکزیمم		درصد اختلاف با نمونه کنترل		درصد شکل پذیری	
	pull	push	pull	push	pull	push
F	۲۶.۳۴	۲۴.۸۶	۰	۰	۲.۹۲	۲.۸۷
FCLW	۴۷.۸۴	۴۴.۳۶	۸۱.۶۲	۷۸.۴	۲.۷۵	۲.۲۵
FCUW	۳۵.۹۸	۳۱.۶۴	۳۶.۶	۲۷.۳	۲.۸۸	۲.۰۱
FGLW	۴۱.۲۳	۳۹.۳۶	۵۶.۵	۶۰.۳	۲.۸۰	۲.۲۴
FGUW	۳۱.۷۴	۲۸.۸۰	۲۰.۵	۱۵.۸	۲.۸۳	۲.۲۸

نتایج بررسی جنس لایه مقاوم-



شکل ۱۳. منحنی بار-تغییر مکان برای صفحات‌های مختلف لایه تقویت



شکل ۱۴. منحنی بار-تغییر مکان برای صفحات‌های مختلف لایه

سازی

تایج-منحنی بار-تغییر مکان-مقاوم-سازي

### نتیجه گیری

نزدیک بودن نتایج عددی و مشاهده ی آزمایشگاهی از مکانیزم های شکست و منحنی های هیستریزس برای نمونه ها قبل و بعد از تقویت با FRP گویای این واقعیت است که مدلسازی عددی می تواند به عنوان یک ابزار عملی برای تحلیل و بررسی رفتار سیکلی قاب های بتن آرمه و تقویت شده با FRP به کار گرفته شود. از آنجا که بررسی عملکرد قاب تحت اثر بارهای سیکلی به روش های آزمایشگاهی پرهزینه و وقت گیر است پس مهندسین طراح و پژوهشگران می توانند از روش اجزای محدود به منظور ارزیابی رفتار سیکلی و استخراج منحن های

هیستریزیس استفاده کنند که با توجه به هزینه ی اندک تحلیل عددی در مقایسه با روش های تجربی در مراحل اولیه طراحی اهمیت خواهد داشت. رفتار قاب بتن آرمه در ناحیه اتصال تیر به ستون بسیار پیچیده بوده و متغیرهای زیادی در تعیین عملکرد و مکانیسم خرابی در نوع تقویت نقش دارند. از جمله این پارامترها می توان به تعداد لایه های الیاف، جنس الیاف، زاویه قرارگیری آن ها اشاره کرد. هرچند که افزایش تعداد لایه های کامپوزیت باعث افزایش ظرفیت باربری اتصال می شود اما به دلیل پدیده جداشدگی ورق های تقویتی (با توجه به در نظر گرفتن المان TIEBERAK) افزایش بیشتر تعداد لایه های ورق تقویتی کارایی لازم را ندارد. در صورت استفاده از ورق های FRP از جنس شیشه یا کربن تعداد لایه ها به گونه ای انتخاب می شوند که حاصل ضرب تعداد لایه، ضخامت لایه . مدول الاستیسیته دو نمونه FCUW,FGUW یکسان شود، باعث افزایش میزان جذب انرژی می شود. این امر می تواند به دلیل مدول الاستیسیته کمتر ورق های شیشه ای باشد.

### مقاوم سازی و بهسازی لرزه ای اتصالات خورجینی

اتصال خورجینی یکی از انواع اتصالاتی است که بیشتر در کشور ما استفاده می شود و کاربرد آن در دیگر کشورهای دنیا چندان معمول نیست. علاوه بر این، رفتار نامناسب این اتصال در زلزله های اخیر ایران نیز سبب شده است تا شناخت دقیق تر رفتار این نوع اتصال در بارگذاری های لرزه ای و بهسازی و تقویت آن امری ضروری و اجتناب ناپذیر باشد. همچنین با توجه به گسترش روش های عددی و پیشرفته تر شدن کامپیوترها، این تحقیق سبب خواهد شد تا استفاده از این روش ها جهت طراحی این اتصالات گسترش و توسعه یابد و نیز محدودیت هایی که در انجام کارهای آزمایشگاهی چه به لحاظ فنی و چه به لحاظ هزینه ای وجود دارد تا حد زیادی برطرف گردد. بدین منظور مدل های متعددی شامل اتصال خمشی گیردار، اتصال خورجینی ساده، نیمه صلب و صلب در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل شده است. در ادامه روش های بهبود عملکرد این اتصال با استفاده از قطعات الحاقی بررسی می شود و در نهایت دو مدل مناسب برای اتصال نیمه صلب برای مناطق با لرزه خیزی کم و متوسط و اتصال خورجینی گیردار برای مناطق با خطر لرزه خیزی زیاد پیشنهاد می شود. قابلیت استهلاک انرژی یکی دیگر از معیارهایی است که برای بهبود عملکرد اتصال های مورد بحث در این مقاله بررسی شده است. امروزه سازه های فولادی یکی از پرکاربردترین سازه هایی است که در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از اتصالاتی که سالیان متمادی در ایران سابقه ی استفاده دارد اتصال خورجینی است. اتصال خورجینی عبارت است از اتصالی که تیری را به صورت پیوسته از کنار ستون عبور می دهد و به ستون متصل می سازد. در ایران به دلیل کمبود نیمرخ های بزرگ، برای تیرریزی ساختمان های متوسط و کوتاه از دو مقطع تیر با فاصله از یکدیگر استفاده شده است. کاربرد گسترده ی این اتصال در ایران به علت سادگی کار، هزینه ی کم، سرعت بالای اجرا، کم کردن نیمرخ بال پهن، قابلیت استفاده از شماره های بالای نیمرخ IPE، عدم نیاز به بریدن تیرها در محل اتصال به ستون، برش و جوش کمتر و در مجموع اقتصادی بودن آن ها است. این اتصال در گذشته متداول ترین شکل اتصال در ساختمان های فلزی ایران بوده است. در اتصال خورجینی تیرهای باربر از طرفین ستون به صورت یکسره عبور داده می شوند و روی نبشی هایی که در طرفین ستون نصب شده اند قرار می گیرند، لذا اتصال خورجینی تأمین کننده ی نشیمن برای عبور یک جفت تیر سراسری از طرفین ستون است. اتصالات خورجینی بکار رفته در سازه های فولادی ایران عموماً هم شکل اند و تنها تفاوتی که دارند در طول و بزرگی مقاطع نبشی آن ها است که بسته به میزان بار طراحی می تواند متفاوت باشد.



نمونه-اتصالات-خورجینی

براساس تجربه هایی که از زلزله های گذشته بدست آمده است، دریافته ایم که سازه هایی در برابر زلزله دارای عملکرد بهتری هستند که بتوانند ضمن حفظ پایداری و انسجام کلی خود، انرژی بیشتری از زلزله را جذب و مستهلک کنند. اتصالات خورجینی عموماً در دسته ی اتصالات غیرلرزه ای نیمه صلب جای می گیرند و ظرفیت لنگر آن ها بسیار کمتر از المان های متصل شده در قاب است. نقطه ی ضعف اصلی این نوع اتصال شکست زود هنگام جوش های آن است. در نتیجه قاب های با اتصال خورجینی انعطاف پذیری بسیار پایینی دارند و معمولاً طی یک زمین لرزه رفتار نامطلوب تدری را از خود نشان می دهند. برای بهبود عملکرد لرزه ای چنین قاب هایی باید مقاومت اتصالات را چنان بالا برد تا علاوه بر تأمین ملزومات صلبیت بتوانند امکان داشتن تغییر شکل پلاستیک در تیر متصل شده را با تغییر شکل های ارتجاعی پایدار خود فراهم کنند. علاوه بر این باید جزئیات رفتار اتصال چنان تنظیم شود که یک مسیر بار ایمن برای بار منتقل شده از تیر به ستون فراهم شود. نکته ی مهم درباره ی ایمنی مسیر بار این است که همه ی اجزای اتصالات باید به تمامی و بدون مزاحمت در انتقال بار همکاری کنند و این در حالی است که در اتصال خورجینی تنها دو مقطع نبشی جوش شده به تیر و ستون (که در بیشتر موارد کیفیت جوش پایینی دارند) نقش انتقال بار را بر عهده دارند. رفتار ضعیف اجزای اتصال که نمی توانند مسیر امنی را برای بار فراهم کنند باعث می شود که اتصال در همان چند چرخه ی نخست بارگذاری دچار شکست شود. برای پرهیز از چنین مسئله ای، اتصال باید چنان بهبود یابد که هم یک مسیر بار امن فراهم کند و هم مقاومت و سختی مطلوب را بدست آورد.

### مدل سازی

هر مسئله ی مدل سازی معمولاً از مراحل، پیش پردازش، پردازش، پس از پردازش، نتایج قابل قبول و راه حل پایدار و ترسیم نتایج خروجی تشکیل یافته است.



### شکل ۳- مراحل یک مدل سازی

#### مراحل-مدل-سازی

در مرحله ی پیش پردازش مدل سازی عددی با آباکوس به رویه ی زیر دنبال شده است:

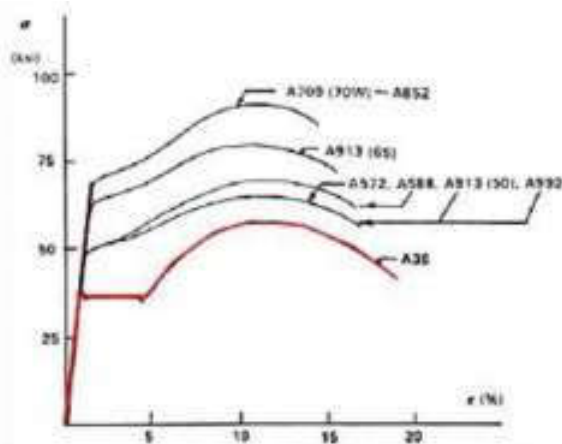
1. با تشریح مشخصات هندسی اعضای پایه ای ایجاد شد (تعریف تیر، ستون، اتصالات نبشی و ورق های اتصالات).
2. ایجاد مشخصات مواد برای لایه های مختلف (مشخصات الاستیک و پلاستیک).

جدول ۱) مشخصات مکانیکی فولاد A36

Elastic modulus E.(MPa)	Fy(MPa)	Fu(Mpa)	Final elongation(%)
203806	258	480	25.9

جدول-مشخصات-مکانیکی

نمودار تنش - کرنش مربوط به فولادهای سازه‌ای را در شکل (4) مشاهده می کنید. از میان انواع مختلف فولاد، فولاد نرمه‌ی ساختمانی انتخاب شده است. برای استفاده از پارامترهای این نوع فولاد در محیط آباکوس لازم است تا تغییراتی بر روی این پارامترها داده شود.



شکل ۴: نمودار تنش - کرنش فولاد نرمه ساختمانی (A36) - [۱۰]

نمودار-تنش-کرنش-فولاد-مقاوم-سازی

باید به این نکته اشاره شود که نمودار تنش-کرنش مربوط به شکل (4) مربوط به تنش و کرنش‌های مهندسی می باشد که در روابط آیین نامه ای از آنها استفاده می شود، در صورتیکه در موارد مدل سازی اجزاء محدود برای حصول جواب‌های دقیق تر باید از پارامترهای واقعی که با استفاده از روابط (1) و (2) بدست می آیند استفاده کرد.

$$\sigma_{max} = \sigma_{yield}(1 + \epsilon_{max}) \quad (1)$$

$$\epsilon'_{max} = \ln(1 + \epsilon_{max}) - \left(\frac{\sigma_{max}}{E}\right) \quad (2)$$

مقادیر-واقعی-تنش-کرنش

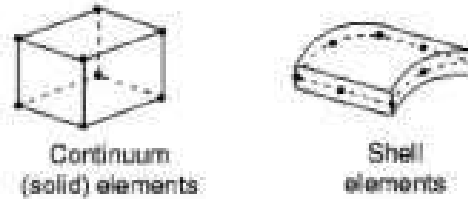
مقادیر بدست آمده از روابط بالا را در جدول (2) مشاهده می کنید که از مقادیر واقعی تنش-کرنش در مدل سازی استفاده خواهیم کرد.

جدول ۲: تنش - کرنش اسمی و واقعی فولاد نرمه ساختمانی - [۱۰]

Nominal Curve		True(Eng.) Curve	
Strain (%)	Stress(Mpa)	Strain (%)	Stress(Mpa)
0.00	0	0.00	0
0.01	252	0.01	254
0.05	252	0.04	264
0.06	319	0.06	338
0.09	377	0.08	409
0.11	398	0.10	440
0.14	391	0.13	444
0.16	350	0.15	407
0.19	286	0.17	341

جدول-تنش-کرنش

1. مونتاژ کردن اجزاء و اختصاص مواد به آنها.
  2. در مدل‌هایی که تماس بین اجزاء باید تعریف شود، تعریف زوج سطوح و مشخصات مکانیکی برای آنها.
  3. مش بندی مناسب مدل و اختصاص المان‌های سازه‌ای مناسب به اجزاء.
- برای مقاطع تیر و ستون از المان صفحه‌ای S8R (المان صفحه‌ای با 8 نقطه‌ی انتگرال‌گیری) و برای صفحات و نبشی‌های اتصال از نوع المان C3D8R (المان 3 بعدی پیوسته با 8 نقطه‌ی انتگرال‌گیری) استفاده شده است.



شکل 5: المان‌های سازه‌ای استفاده شده در آباکوس- [11]

لمان‌های-مورد-استفاده

4. تعریف مراحل آنالیز

5. ایجاد شرایط مرزی

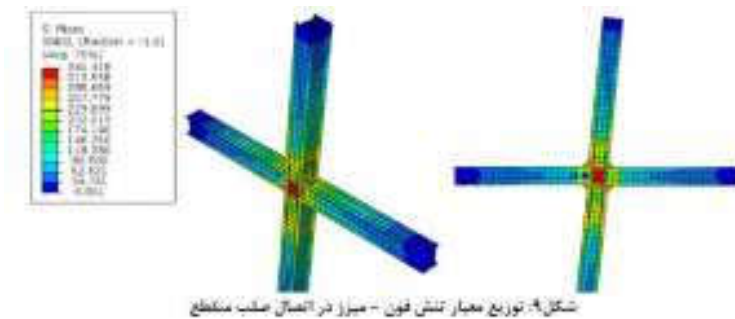
ساخت مدل

در این پژوهش عملکرد دو نوع اتصال صلب منقطع و اتصال خورجینی ارزیابی می‌شود. معیار مقایسه‌ی دو اتصال عدم تمرکز تنش در اتصال که از معیار تنش فون - میز بدست می‌آید، لحظه‌ی گسیختگی و قابلیت استهلاک انرژی که برابر است با مساحت زیر نمودار بار - جابجایی را شامل می‌شود.

ابتدا به نبشی‌های اتصال، لچکی سخت کننده اضافه می‌شود تا بهبود عملکرد اتصال بررسی شود. همانگونه که خواهیم دید این لچکی‌ها نمی‌توانند ظرفیت اتصال را افزایش دهند. در انتها با افزودن ورق‌های زیرسری و بالاسری، خواهیم دید که ظرفیت اتصال به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این مدل‌ها از IPE1802 برای ستون‌ها و IPE1602 برای تیرها استفاده شده است. از نبشی با ابعاد L150x80x80 برای اتصال استفاده شده است.

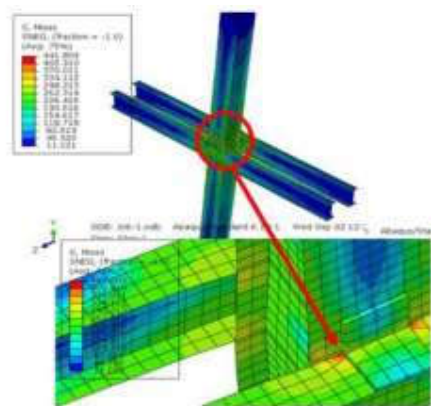
تشریح نتایج

در این بخش به این سوال پاسخ خواهیم گفت، که چرا اتصال خورجینی برای مناطق لرزه خیر کارایی لازم را ندارد. در بخش بعدی روش‌های بهبود عملکرد اتصال خورجینی با استفاده از سخت کننده‌ها و برش گیرها و ورق‌های بالاسری و زیرسری ارزیابی می‌شود. ابتدا به نبشی‌های اتصال لچکی سخت کننده اضافه می‌شود تا بهبود عملکرد اتصال بررسی شود. همانگونه که خواهیم دید این لچکی‌ها نمی‌توانند ظرفیت اتصال را افزایش دهند. در گام بعدی برش گیرهایی درون جان تیر خورجینی اضافه می‌شود. همانند اتصال قبل، این نوع اتصال نیز قابلیت اینک ظرفیت استهلاک انرژی اتصال خورجینی را بالا ببرد را ندارد. در انتها با افزودن ورق‌های زیرسری و بالاسری، خواهیم دید که ظرفیت اتصال به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این مدل‌ها از IPE1802 برای ستون‌ها و IPE1602 برای تیرها استفاده شده است. از نبشی با ابعاد L150x80x80 برای اتصال استفاده شده است. در جدول (4) مشخصات اجزای تقویتی اتصال خورجینی آورده شده است.



توزیع تنش-فون-میز

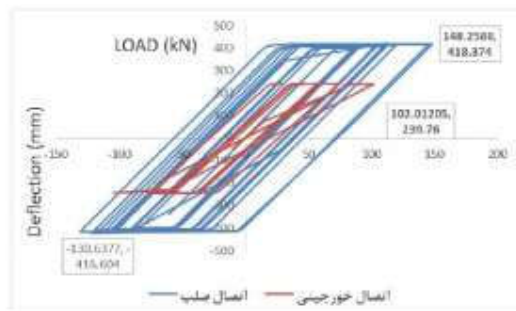
در شکل (9) توزیع یکنواخت معیار تنش فون - میز را در اتصال صلب مشاهده می‌کنید. در نواحی مجاور اتصال تنش در محدوده‌ی  $MPa257$  تا  $MPa340$  می‌باشد. که نشان دهنده‌ی جاری شدن کل محدوده‌ی اتصال می‌باشد. در این اتصال محدوده‌ی هسته‌ی اتصال بیشترین مقدار تنش فون - میز یعنی  $MPa340$  را تجربه می‌کند. در شکل (10) تمرکز تنش بالا را در ناحیه‌ی اتصال نبشی به تیر مشخص است. در حالیکه محدوده‌ی اتصال تنش در شکل (10) تا  $MPa334$  را تجربه می‌کنند اما در محل اتصال نبشی تیر تمرکز تنش تا  $MPa441$  نیز وجود دارد. تمرکز تنش عامل گسیختگی موضعی می‌باشد و برخلاف اتصال صلب که محدوده‌ی قابل توجهی از اتصال به ناحیه تسلیم رسیده بودند، در این اتصال برخی از نقاطی که دارای تنش بالا هستند تسلیم شده اند و این دلیل بر عدم شکل پذیری اتصال خورجینی می‌باشد.



شکل ۱۰: توزیع معیار تنش فون - میز در اتصال خورجینی

توزیع معیار-تنش-اتصال-خورجینی

در شکل (12) پاسخ بار-جابجایی دو نوع اتصال تحت اثر بار چرخه‌ای آورده شده است. لازم به ذکر است که بارگذاری در زمان رسیدن به کرنش پلاستیک بحرانی ( $PEEQ=0.17-0.18$ ) متوقف می‌شود.

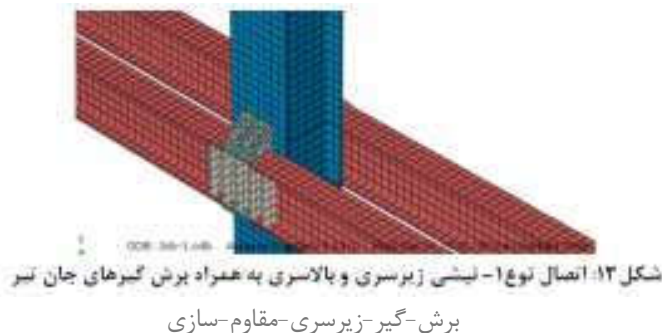


شکل ۱۲: منحنی رفتار اتصالات خورجینی و صلب



### منحنی-رفتار-اتصالات-خورجینی

مقدار ظرفیت نهایی اتصالات صلب و خورجینی منقطع بترتیب برابر  $E+05N4.18$  و  $E+05N2.39$  است. اما نکته قابل توجه در این دو نمودار قابلیت استهلاک انرژی توسط دو اتصال است که برای این دو اتصال برابر  $E+08N.mm6.58$  و  $E+07N.mm7.81$  است که مقایسه‌ی این دو عدد تفاضل قابل ملاحظه‌ی قابلیت استهلاک این دو نوع اتصال را نشان می‌دهد.



### نتیجه‌گیری

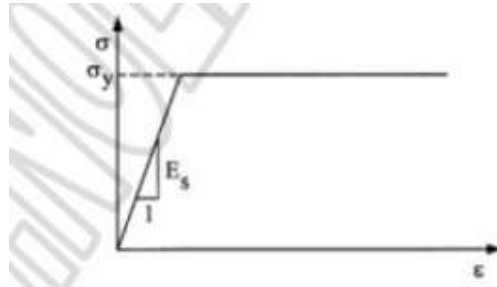
اتصالات خورجینی عموماً در دسته‌ی اتصالات غیرلرزه‌ای نیمه صلب جای می‌گیرند و ظرفیت لنگر آن‌ها بسیار کمتر از المان‌های متصل شده در قاب است. نقطه‌ی ضعف اصلی این نوع اتصال شکست زود هنگام جوش‌های آن است. در نتیجه قاب‌های با اتصال خورجینی انعطاف‌پذیری بسیار پایینی دارند و معمولاً طی یک زمین لرزه رفتار نامطلوب‌تری را از خود نشان می‌دهند.

مقدار ظرفیت نهایی اتصالات صلب و خورجینی منقطع بترتیب برابر  $E+05N4.18$  و  $E+05N2.39$  است که افزایش 75 درصدی داشته است. اما نکته‌ی قابل توجه در این دو نمودار قابلیت استهلاک انرژی توسط دو اتصال است که برای این دو اتصال برابر  $E+08N.mm6.58$  و  $E+07N.mm7.81$  است که مقایسه‌ی این دو عدد تفاضل قابل ملاحظه‌ی قابلیت استهلاک این دو نوع اتصال را نشان می‌دهد. برای بهبود عملکرد لرزه‌ای چنین قاب‌هایی باید مقاومت اتصالات را چنان بالا برد تا علاوه بر تأمین ملزومات صلبیت بتوانند امکان داشتن تغییرشکل پلاستیک در تیر متصل شده را با تغییرشکل‌های ارتجاعی پایدار خود فراهم کنند. در این پژوهش از اتصال‌های لچکی زیرسری و بالاسری (اتصال گیردار) برای زیرسری و بالاسری نبشی به همراه برشگیرهای جان تیر و لچکی و صفحات زیرسری و بالاسری (اتصال گیردار) برای بهبود عملکرد اتصال خورجینی استفاده شد. در اتصال خورجینی گیردار نوع دوم، همه‌ی نیروهای قائم و افقی و لنگر خمشی تیرها از راه ورق‌هایی که در دو طرف ستون و عمود بر محور تیر جوش شده‌اند و با جوش نفوذی به بال‌های بالایی و زیرین تیرهای دو طرف ستون متصل شده‌اند، منتقل می‌گردد. این نوع اتصال در تغییرشکل‌های نسبتاً زیاد رفتار پسماند ثابتی دارد. مقایسه‌ی ظرفیت نهایی اتصال برابر  $E+05N3.8$  با ظرفیت اتصال خورجینی ساده و اتصال صلب منقطع بترتیب برابر با  $E+05N2.23$  و  $E+05N4.1$  نشان دهنده‌ی کارایی مناسب این اتصال است که افزایش حدود 70 درصدی را نسبت به اتصال خورجینی ساده داشته است. ظرفیت این اتصال قابل مقایسه با اتصال صلب منقطع که افزایش 75 درصدی را داشته است، می‌باشد. برای مطالعه رفتار سازه‌های بتن‌آرمه تقویت‌شده با FRP مرحله اساسی فهم و درک دقیق رفتار غیرخطی مصالح سازنده آن یعنی بتن مسلح و کامپوزیت FRP به‌طور مجزا می‌باشد. رفتار غیرخطی بتن مسلح نظیر ترک‌خوردگی بتن، سخت‌شدگی کششی، پلاستیسیته بتن و تسلیم آرماتورها به‌طور گسترده توسط محققان متعددی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و قوانین ساختاری مناسب متعددی پیشنهاد شده است. علیرغم اینکه در بیشتر مطالعات رفتار FRP در سازه‌های بتن‌آرمه تقویت‌شده با FRP خطی فرض شده است، با این حال نشان داده شده است که رابطه تنش-کرنش برشی درون صفحه‌ای الیاف‌ها در کامپوزیت‌های الیافی یک جهته، به‌طور قابل توجهی غیرخطی می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی مناسب رفتار غیرخطی کامپوزیت‌های FRP بسیار مهم و حائز

اهمیت می‌باشد. در این مقاله مدل‌های ساختاری مناسب معرفی شده است که رفتار غیرخطی بتن مسلح و FRP را مدل‌سازی می‌کند سپس برای تحلیل غیرخطی تیر بتن آرمه مستطیلی شکل تقویت‌شده با FRP از برنامه المان محدود ABAQUS استفاده شده است. در تحلیل عددی، دو نوع تیر با دو نسبت آرماتور متفاوت، در نظر گرفته شده است. هدف از این تحقیق مطالعه و بررسی تأثیر کامپوزیت‌های FRP بر روی رفتار کلی تیر بتن آرمه با مقطع مستطیلی تحت بار متمرکز در وسط دهانه می‌باشد و همچنین تأثیر نسبت فولاد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح استفاده شده در مدل‌سازی آرماتور، بتن و FRP می‌باشد. مدل‌های ساختاری مناسبی در برنامه المان محدود ABAQUS جود دارند که برای میلگردهای فولادی، بتن و FRP می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین در اینجا به‌طور مختصر مدل‌های ساختاری و مشخصات مصالح مورد بحث قرار می‌گیرند.

#### آرماتور:

مدل‌های ساختاری زیادی در برنامه المان محدود ABAQUS وجود دارد که در این مقاله برای مدل‌سازی آرماتور از مدل دوخطی الاستوپلاستیک کامل ایزوتروپیک استفاده می‌شود. برای معرفی پلاستیسیته فولاد از سخت‌شدگی کینماتیکی استفاده شده است. منحنی تنش کرنش الاستیک پلاستیک کامل را در شکل زیر مشاهده نمایید.



مدل -الاستیک-پلاستیک-کامل-فولاد-مقاوم-سازی

در برنامه ABAQUS آرماتورهای طولی و عرضی با المان خرابایی (T3D2N) مدل‌سازی می‌گردند که المان دو گرهی می‌باشد و فقط قابلیت تحمل نیروی محوری را دارد و به‌صورت مجزا از بتن عمل می‌کند و از اثرات لغزش-پیوستگی بین بتن و آرماتور صرف‌نظر می‌شود. برای مدل‌سازی مناسب رفتار آرماتور، سطح مقطع، موقعیت و جهت هر لایه آرماتور برای هر المان باید مشخص باشد. در مدل الاستوپلاستیک فولاد مشخصات مدول الاستیسیته فولاد و تنش جاری شدن مورد نیاز می‌باشد.

#### بتن:

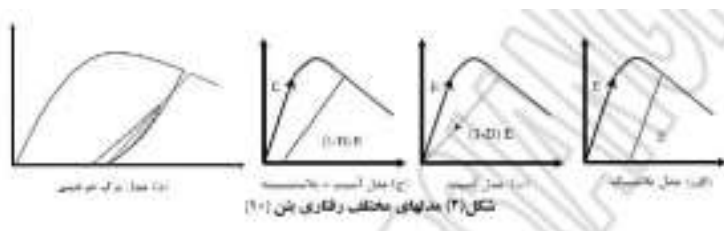
مدل‌های رفتاری مختلفی برای بتن وجود دارد که دارای کاربرد فراوان در مدل‌سازی‌های عددی می‌باشند که عبارت‌اند از:

- مدل الاستیک بتن،
- مدل پلاستیک بتن،
- مدل آسیب،
- مدل آسیب پلاستیسیته (شکل زیر).

مدل‌های ترک بتن که در مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود عبارت‌اند از:

- مدل ترک اندود
- مدل آسیب پلاستیسیته
- مدل ترک چرخشی.

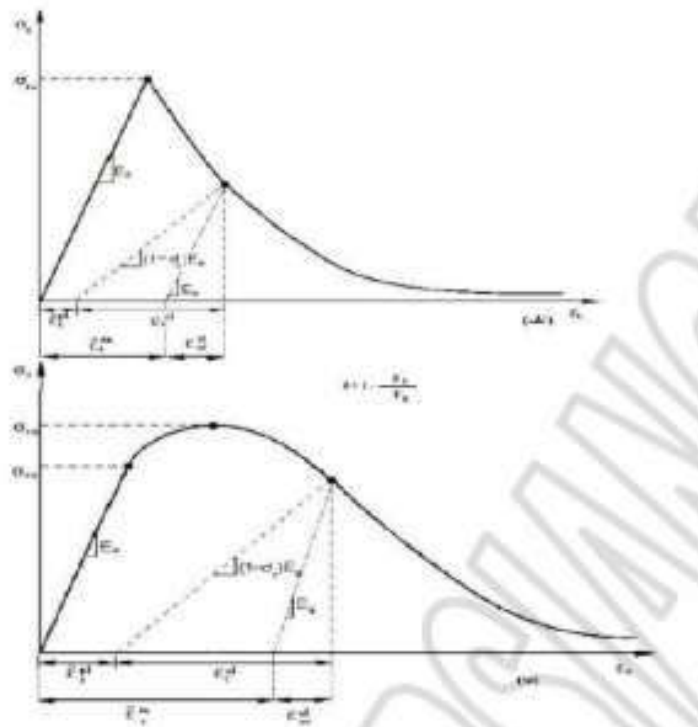
در برنامه ABAQUS مدل‌های ترک اندود و آسیب پلاستیسیته برای بتن موجود می‌باشد که در این بررسی از مدل آسیب-پلاستیسیته بتن استفاده شده است.



مدل‌های مختلف رفتاری بتن

#### مدل پلاستیسیته بتن

مدل آسیب-پلاستیسیته برای اولین بار به صورت کاربردی توسط لوبلینر در سال 1989 ارائه گردید. مدل لوبلینر که به مدل بارسلونا معروف است توانست تمام حالت‌های آسیب را توسط یک متغیر اسکالر بنام آسیب بر اساس انرژی شکست بیان کند. اما این مدل قادر به نشان دادن رفتار بتن در حالت سایکلینگ نبود. زیرا که در بارگذاری تناوبی نمی‌توان آسیب کششی و آسیب فشاری را بایک کمیت اسکالر بیان نمود. فنوز و لی در سال 1998 با توسعه مدل بارسلونا برای حالت سایکلینگ به کمک دو پارامتر آسیب فشاری و کششی مدل کامل‌تری ارائه دادند. همه مدل‌های پلاستیسیته آسیبی که بعد از این تاریخ پیشنهاد شده است بر پایه مدل لوبلینر در حالت استاتیکی و مدل فنوز-لی در حالت تناوبی می‌باشد. مدل آسیب - پلاستیسیته بتن که در نرم‌افزار ABAQUS به کار برده شده است بر پایه مدل فنوز لی می‌باشد. در این مدل دو مکانیسم گسیختگی برای بتن فرض می‌شود که عبارت‌اند از ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری. رفتار تنش کرنش بتن تحت فشار تک‌محوری بعد از ناحیه الاستیک باید به صورت تنش بر حسب کرنش غیر ارتجاعی تعریف شود (کرنش خردشدگی). فرض می‌شود که رفتار بتن تحت کشش تک‌محوری تا تشکیل ریزترک‌های اولیه در تنش حداکثر به صورت خطی است (تنش گسیختگی). رفتار بتن بعد از شکست باید به صورت تنش بر حسب کرنش ترک خوردگی تعریف گردد. این رفتار اجازه می‌دهد تا ما بتوانیم اثرات اندرکنش بتن و آرماتور را با معرفی مقداری سخت شدگی کششی در شاخه نرم شدگی در نظر بگیریم (شکل زیر). در این مقاله المان 8 SOLID گرهی با سه درجه آزادی در هر گره که C3D8R نامیده می‌شود برای مدل سازی المان‌های بتنی استفاده شده است.



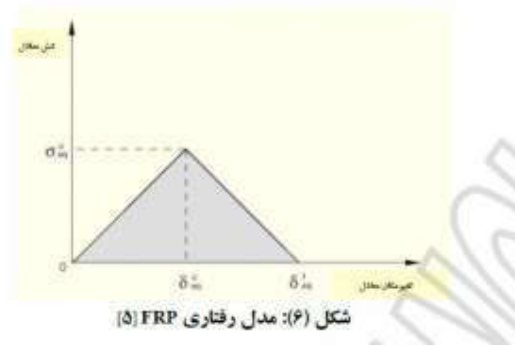
منحنی-تنش-کرنش-بتن

تحت فشار تک‌محوری، کرنش بتن مربوط به تنش حداکثر معمولاً در حدود 0.002 الی 0.003 فرض می‌شود. مقدار نمونه‌ای که توسط کمیته ACI 318 پیشنهاد شده و در تحلیل استفاده شده است، 0.002 می‌باشد. مدول پواسون بتن تحت تنش فشاری تک‌محوری از 0.15 تا 0.22 می‌باشد. در این مطالعه مدول پواسون برای بتن 0.167 فرض شده است. و مدول الاستیسیته اولیه بتن EC به شدت به مقاومت فشاری آن وابسته است.

#### کامپوزیت های FRP

در کامپوزیت‌های FRP هر لایه در شرایط تنش صفحه‌ای می‌تواند به صورت یک لایه ارتوتروپیک در نظر گرفته شود. شایان ذکر است که کامپوزیت‌های الیافی تک‌محوری رفتار غیرخطی شدیدی در رابطه تنش کرنش برشی درون صفحه از خود نشان می‌دهند. همچنین، با بارگذاری‌های عرضی درون صفحه‌ای انحراف از رفتار خطی مشاهده شده است اما میزان غیرخطی شدن قابل مقایسه با برش درون صفحه‌ای نیست. معمولاً این رفتار غیرخطی را که توأم با بارگذاری‌های عرضی است می‌توان نادیده گرفت.

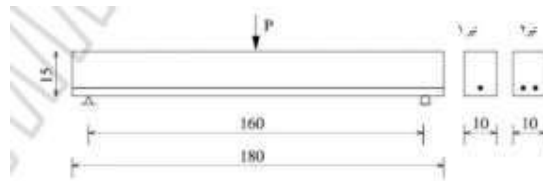
رفتار غیرخطی صفحه‌های FRP به وسیله مدل Hashin Damage در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده است. در این روش رفتار FRP تا هنگامی که به کرنش گسیختگی برسد خطی فرض می‌شود. (شکل زیر) در این نقطه ترک گسترش می‌یابد و ماده تمام ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهد.



مدل رفتاری-FRP (5)

### صحت سنجی

جهت صحت سنجی مدل سازی، دو تیر بتن آرمه که توسط Karihaloo و همکارانش مطالعه شده است، انتخاب گردیده و توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده است. این دو تیر با دو مشخصه متفاوت یکی با یک عدد میلگرد و دیگری با دو عدد میلگرد می باشد که تحت بارگذاری با کنترل تغییر مکان تا ظرفیت نهایی مورد آزمایش قرار گرفته است. مشخصات هندسی این تیر در شکل (8) نشان داده شده است.

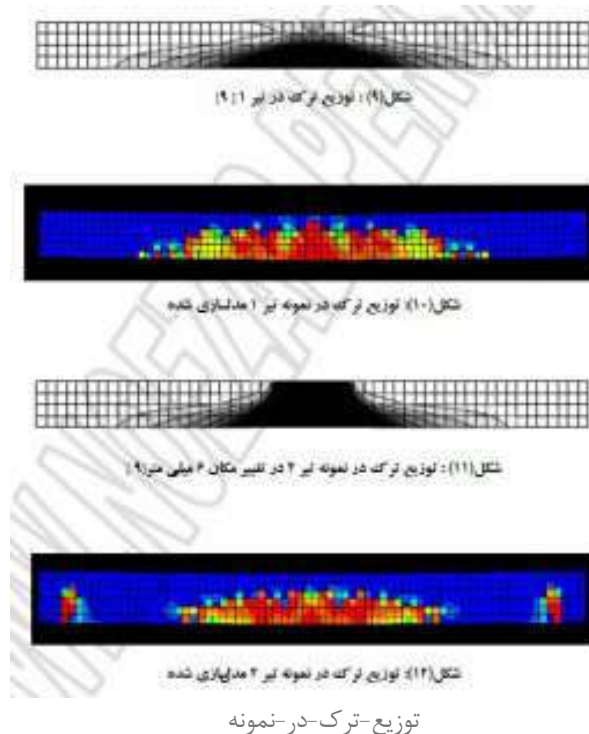


مشخصات تیر بتن آرمه (8)

### مشخصات تیر-بتن-آرمه

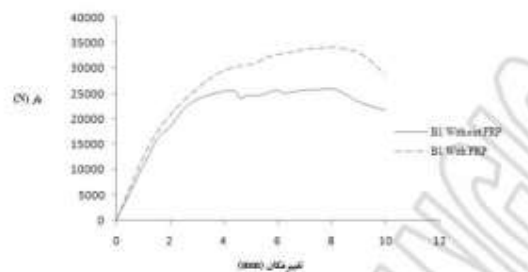
بعد از مدل سازی تیر بتن آرمه در برنامه المان محدود ABAQUS و انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی ابتدا برای صحت سنجی مدل سازی مقایسه ای بین نتایج به دست آمده از مدل سازی و نتایج مطالعات انجام گرفته توسط Karihaloo و همکارانش صورت گرفته است.

توزیع ترک در تیر 1، تیر 2، مدل سازی شده تطابق خوبی با نتایج مطالعات Karihaloo و همکارانش دارد. ولی در تیر 2 مدل سازی شده در ناحیه تکیه گاه به دلیل تمرکز تنش مقداری ترک ملاحظه می گردد و این به دلیل تفاوت شرایط مرزی در شرایط آزمایشگاهی و مدل سازی می باشد.



### تأثیر کامپوزیت های FRP

بعد از صحت سنجی مدل سازی و مقایسه نتایج به دست آمده در بالا دو تیر مدل سازی شده با کامپوزیت های FRP مقاوم سازی شده اند. جهت الیافها در جهت تیر و به صورت طولی در نظر گرفته شده اند. همانطوریکه در شکل 15 نشان داده شده است نتایج به دست آمده حاکی از آن است که کامپوزیت های FRP میزان باربری نهایی تیر 1 را از 25000 نیوتن به 35000 نیوتن افزایش داده است و تأثیر قابل ملاحظه ای در ظرفیت باربری نهایی این تیر دارد. همچنین میزان سطح زیر منحنی بار تغییر مکان نیز افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. برای تیر نمونه 2 نیز نتیجه مشابهی به دست آمده است.



منحنی بار-تغییر مکان

### نتیجه گیری

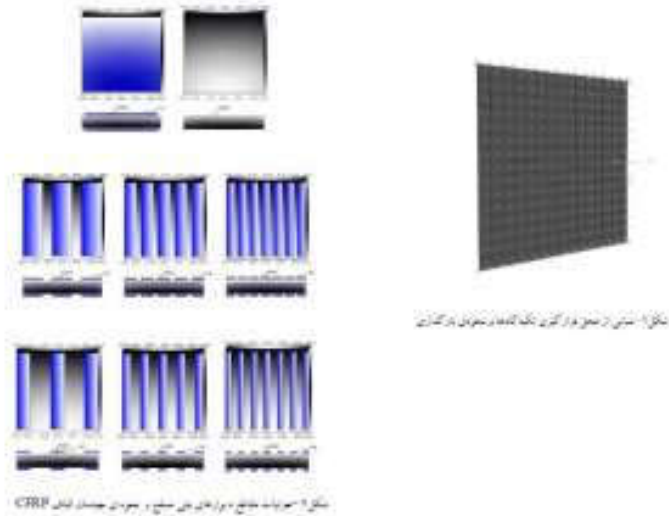
- استفاده از کامپوزیت های FRP می تواند سختی و مقاومت نهایی عضو را تا چندین برابر افزایش دهد. لذا استفاده از این کامپوزیت ها می تواند سبب به کاهش آرماتورهای مصرفی و نیز ابعاد المان گردد.
- ورق های FRP به طور معمول بین دو تا ده برابر مقاومت ورق های فولادی را دارند و این در حالی است که وزن آن ها تنها 20٪ وزن ورق های فولادی می باشد؛ از این رو با تقویت عضوهای بتنی با استفاده از این کامپوزیت ها می توان با کمترین افزایش وزن المان، بیشترین مقاومت را انتظار داشت.

- همان‌طور که مشاهده شد نتایج مدل‌سازی انجام‌شده در این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعات Karihaloo و همکارانش تطابق خوبی دارد.

پیشرفت و تکنولوژی و ظهور پدیده‌ی انفجار و دانش مربوط به بارهای انفجاری مسائل متعددی را پیرامون این موضوع مطرح کرده‌اند. در این مدت پژوهش‌های نظری و آزمایشگاهی بسیاری توسط مهندسان و دانشمندان بر روی مصالح و بارهای انفجاری انجام‌شده است. امروزه با ظهور پدیده‌ی حملات تروریستی، تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه‌یافته است و آئین‌نامه‌های متعددی توسط مراجع مختلف برای تحلیل و طراحی انفجاری ارائه‌شده است. از طرفی با پیدایش مصالح نوین، گسترش کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران و کاربری مناسب آن‌ها در بهسازی سازه‌های موجود، چشم‌انداز جدیدی در جهت مقابله با این وقایع فراهم‌شده است. این پژوهش به بررسی کارایی استفاده از مصالح مرکب بر عملکرد دیوارهای بتنی در برابر انفجار پرداخته است. بدین‌صورت که دیوار بتنی مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای مسلح با الیاف کربنی CFRP تحت اثر بار انفجاری قرار گرفته است. CFRP های بکار گرفته‌شده شامل رزین از جنس اپوکسی و الیاف از جنس کربن می‌باشند. در این پژوهش بار انفجاری، ابعاد دیوار و شرایط تکیه‌گاهی ثابت فرض شده و تأثیر چیدمان الیاف کربنی و ضخامت ورق CFRP در حالت‌های مختلف بررسی شده است. برای مدل‌سازی، تحلیل و پردازش نتایج از نرم‌افزار Abaqus استفاده‌شده است. پس از انجام تحلیل، نحوه و مقدار توزیع پارامترهایی نظیر تغییر مکان و تخریب در مدل‌ها محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته و نواحی بحرانی شناسایی و معرفی شده است. به‌کارگیری روش چیدمان‌های نواری در مقابل پوشش کامل دیوار بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجار موثر بوده موجب کاهش در میزان تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت می‌شود.

#### مدل‌سازی

این دیوارها بر روی دو تکیه‌گاه ساده مقید شده و تشکیل یک دال یک‌طرفه را می‌دهند. سازه‌ها تحت اثر فشار یکنواخت و تابع زمان ضرب‌های ناشی از یک انفجار بارگذاری شده، تغییر شکل و میزان خسارت در آن‌ها با توجه به نحوه‌ی چیدمان الیاف و ضخامت الیاف مقایسه می‌شوند. سازه‌های موردبررسی دیوارهای بتنی به ابعاد  $3 \times 3$  مترمربع و با ضخامت 200 میلی‌متر می‌باشند. این دیوارها در دو لایه به‌وسیله‌ی شبکه میلگردهای فولادی به قطر 10 میلی‌متر در فاصله‌های 150 میلی‌متری مسلح شده‌اند. دیوارهای فوق در دو سمت پشت‌ورو با ورق‌های CFRP با ضخامت‌های متفاوت تقویت‌شده‌اند. با توجه به نسبت کوچک ضخامت به ابعاد سازه برای مدل‌سازی از المان پوسته S4R استفاده گردیده است. عملکرد دیوارها به‌صورت یک‌طرفه فرض شده است. تقویت دیوارها با توجه به درصد پوشش الیاف به سه صورت 75٪، 100٪ و 50٪ تقسیم‌بندی شده که در هر حالت این درصد پوشش توسط سه دسته، پنج دسته و هفت دسته نوار مشخص شده‌اند. شکل (1) تصویر محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها نحوه‌ی بارگذاری دیوارها را نمایش می‌دهد. جهت ایجاد شرایط تکیه‌گاهی مناسب، ورق‌های CFRP در فاصله 200 میلی‌متری از تکیه‌گاه‌ها متوقف شده‌اند. ابعاد هر المان مورد استفاده در مش بندی  $200 \times 200$  میلی‌مترمربع می‌باشد. ورق‌های CFRP در دو سطح رو به انفجار و پشت به انفجار بر روی دیوارها قرار گرفته و به‌صورت کامل (بدون لغزش) در تحمل تنش‌ها شرکت می‌کنند. شکل (2) تصویر انواع چیدمان قرارگیری ورق‌های CFRP بر روی دیوار بتنی مسلح مرجع را که در این پژوهش موردبررسی قرار گرفته، نمایش می‌دهد.



مقاوم-سازی-بار-انفجار-دیوار-بتنی

### مشخصات مصالح

CFRP: ماده مرکب بکار گرفته شده در این پژوهش CFRP است. رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی و الیاف از جنس های کربن T300 می باشد. به منظور بررسی اثر تغییر ضخامت بر پارامترها، ضخامت ورق های CFRP در نظر گرفته شده 1.5، 0.5، و 6 میلی متر است. CFRP های مورد استفاده دارای رفتار کشسان خطی بوده و ویژگی های مکانیکی آن ها در جدول های 1 تا 3 ارائه شده است.

بتن: مقاومت فشاری بتن در پژوهش 35 مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب در آن از مدل خسارت مومسانی بتن (Concrete Damage Plasticity) استفاده شده است. مقادیر تنش و کرنش پلاستیک مورد نیاز در این مدل از گزارش نتایج پژوهش های آزمایشگاهی پیشین گرفته شده است.

مشخصات مورد استفاده برای مدل سازی بتن در جدول های 4 و 5 ارائه شده است

فولاد: با در نظر گرفتن این مسئله که میلگردهای بکار رفته در دیوارهای بتنی تحت بار انفجار وارد ناحیه مومسانی خود می شوند، در مورد شبیه سازی رفتار فولاد بایستی هر دو ناحیه کشسان و مومسان را در نظر گرفته و اطلاعات مورد نظر در هر دو ناحیه در اختیار نرم افزار قرار گیرد. در ناحیه کشسان، ضریب کشسانی 210 گیگاپاسکال، ضریب پواسن 3/0 و چگالی نسبی 8/7 فرض می شود. ویژگی های فولاد در ناحیه مومسان در جدول (6) آورده شده است.

جدول 1- مقادیر تنش فیزیکی ورق های CFRP

	Tension $\sigma_c$ (MPa)	Compression $\sigma_c$ (MPa)	Tension $\sigma_t$ (MPa)	Compression $\sigma_c$ (MPa)	Shear $\tau_c$ (MPa)
CFRP	1500	1500	150	510	90

جدول 2- مقادیر کرنش فیزیکی ورق های CFRP

	Tension $\epsilon_c$	Compression $\epsilon_c$	Tension $\epsilon_t$	Compression $\epsilon_c$	Shear $\gamma_c$
CFRP	0.0015	0.0015	0.0015	0.0051	0.009

جدول-مشخصات-مصالح-مقاوم-سازی



## ترکیب بارها

بارگذاری انفجاری به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. در این پژوهش برای ساده‌سازی و کاهش زمان عملیات شبیه‌سازی رایانه‌ای مدل‌ها از وابستگی مکانی بارگذاری صرف‌نظر شده و تنها به توزیع زمانی بار پرداخته شده است. به سخن دیگر، توزیع فشار ناشی از انفجار به صورت یک فشار یکنواخت ولی تابع زمان بر روی سطح دیوار اعمال شد. این امر را می‌توان با استناد به آیین‌نامه انفجار انجمن ساخت سازه‌های فولادی آمریکا (AISC) مورد قبول دانست. بر طبق این آیین‌نامه، اگر فاصله محل انفجار تا سازه از نصف کوچک‌ترین بعد سازه بیشتر شود می‌توان با فرضی مناسب فشار وارده بر دیوار را به صورت یکنواخت در نظر گرفت. در این مطالعه، فشار اعمالی هم‌ارز با فشار ناشی از انفجار 5/9 کیلوگرم TNT در فاصله 5/2 متر از سازه در نظر گرفته شده است. فشار وارده در طول زمان کل 02/0 ثانیه به شکل دوزنقه اعمال شده که در جدول (7) نمایش داده شده است.

جدول ۷- دامنه زمانی بارگذاری مدل و فشار وارده

Duration (Sec)	Pressure (kPa)
۰.۰۰۰	۰
۰.۰۰۱	۷۰۰
۰.۰۱۰	۷۰۰
۰.۰۲۰	۰

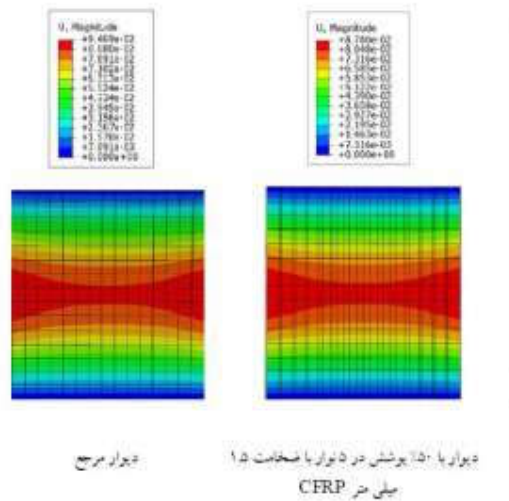
دامنه زمانی-بارگذاری

## تحلیل و بررسی یافته‌ها

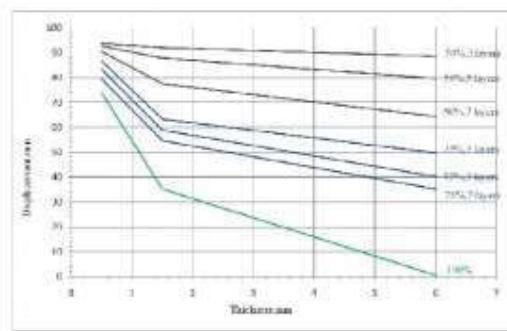
برای تحلیل مدل‌ها از تحلیلگر صریح Explicit نرم‌افزار Abaqus استفاده شده است. از این تحلیلگر در مواردی که هدف، تحلیل دینامیکی مدل در زمان بسیار اندک مورد نظر باشد، استفاده می‌گردد. در طی تحلیل رفتار دیوار برای مدت 05/0 ثانیه ثبت گردیده است. بیشینه پارامترهای مورد نظر در هر مدل محاسبه و نتایج مربوطه در مدل‌های تقویت‌شده با چیدمان‌های مختلف CFRP در ضخامت‌های ورق متفاوت با یکدیگر مقایسه شده است. پارامترهای تغییر مکان، تخریب بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ابتدا دیوار بتنی مسلح مرجع مدل‌سازی شد، پس از تحلیل میزان تغییر مکان بیشینه به همراه حداکثر خسارت در بتن تعیین گشت. سپس دیوارهای تقویت‌شده با ورق‌های CFRP در چیدمان‌ها و درصد پوشش‌های متفاوت در ضخامت‌های مختلف مدل‌سازی و تحلیل شد. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده پس از تحلیل دیوارهای تقویت‌شده با دیوار مرجع، کارایی روش مقاوم‌سازی و پارامترهای بهینه حاصل می‌شود. پارامترهایی که برای مقایسه بین رفتار دیوارهای مقاوم‌سازی شده انتخاب شدند عبارت است از: تغییر مکان بیشینه و نشانه تخریب. بدیهی است که یک سامانه مقاوم‌سازی مطلوب می‌بایست تغییر شکل سازه را محدود نموده اثرات تخریب در بتن را کاهش دهد تغییر مکان بیشینه: با بررسی مقادیر ارائه شده در جدول‌های سه گانه ۸، اثر به کارگیری ورق‌های CFRP با ضخامت‌های مختلف و درصد پوشش متفاوت با توجه به تعداد لایه‌ها، در مقاوم‌سازی دیوار بتنی واضح است. تأثیر روش مقاوم‌سازی به گونه‌ای است که تغییر مکان بیشینه دیوار- که مربوط به منطقه میانی آن می‌باشد- در حالت مقاوم‌سازی نشده از حدود 95 میلی‌متر به 5/0 میلی‌متر در بهترین حالت مقاوم‌سازی کاهش می‌یابد. با مقایسه مقادیر تغییر مکان و ضخامت ورق CFRP استفاده شده رابطه وارونه میزان ضخامت با مقادیر بیشینه تغییر مکان مشخص می‌شود که با افزایش ضخامت ورق CFRP بیشینه تغییر مکان حاصل کاهش می‌یابد. تغییرات بیشینه تغییر مکان به صورت مشهودی با درصد پوشش الیاف متغیر است این اثر با افزایش ضخامت نمایان‌تر است به طوری که بیشینه تغییر مکان در ضخامت

1.5 میلی‌متر در پوشش 100٪ از حدود 35.1 میلی‌متر به 77.4 میلی‌متر در پوشش 50٪ افزایش می‌یابد. تغییرات بیشینه‌ی تغییر مکان در در صدهای پوشش متفاوت می‌تواند با تغییر در ضخامت جبران شود. بدون‌های که بیشینه‌ی تغییر مکان در در صد پوشش 100٪ در ضخامت 0.5 میلی‌متر در حدود 74 میلی‌متر بوده که این تغییر مکان در پوشش 50٪ با افزایش ضخامت 1.5 میلی‌متر به 77.4 میلی‌متر، و در همان درصد پوشش با ضخامت 6 میلی‌متر به حداقل مقدار 64.3 میلی‌متر کاهش می‌یابد. در بررسی رفتار چیدمان نواری بکار گرفته‌شده مشاهده می‌شود که افزایش تعداد نوارها در بهبود عملکرد دیوار مؤثر است. تأثیر به‌کارگیری این روش مقاوم‌سازی بدون‌های است که در تمام درصدهای پوشش ارائه‌شده با افزایش تعداد نوارها و بطبع آن کاهش عرض نوار تغییر مکان بیشینه دیوار کاهش می‌یابد.



نوار-های-تقویت-بیشینه-تغییر-مکان

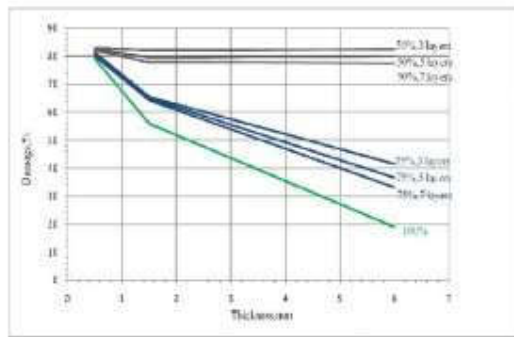


شکل ۴- تغییرات تغییر مکان نسبت به ضخامت در دیوارهای مقاوم سازی شده

#### تغییر-مکان-دیوار-مقاوم-سازی

نشانه تخریب: مقادیر تخریب دیوارهای مدل‌سازی شده در جدول‌های سه گانه 9 آمده است. نشانه تخریب را می‌توان به‌عنوان نسبت مساحت آسیب‌دیده به مساحت سالم دیوار تعریف نمود که با این توصیف این نشانه می‌تواند مقداری بین صفر و یک را دارا باشد. صفر مربوط به محیط کاملاً سالم و یک متعلق به محیط کاملاً تخریب دیده می‌باشد. معمولاً به جهت جلوگیری از ناپایداری‌های عددی نرم‌افزار مقدار تخریب را بیش از 99/0 گزارش نمی‌نماید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر تخریب ارائه‌شده با ضخامت ورق‌های CFRP نسبت وارونه دارد و با افزایش آن میزان تخریب به‌صورت مشهودی کاهش می‌یابد. تخریب گزارش‌شده برای دیوار بتنی مرجع برابر 83 درصد می‌باشد که می‌توان آن را یک تخریب نسبتاً زیاد در نظر گرفت درحالی‌که با استفاده از ورق‌های CFRP این میزان تخریب را

می توان تا مقدار نسبتاً اندک 19 درصد کاهش داد. به کارگیری روش مقاوم سازی به صورت نواری منجر به بهبود عملکرد رفتار دیوار می شود به گونه ای که با افزایش تعداد نوارها در هر درصد پوشش میزان خسارت کاهش می یابد.



شکل ۹- تغییرات خسارت بیشینه نسبت به ضخامت

تغییرات-خسارت-بیشینه-نسبت-به-ضخامت-مقاوم-سازی

### نتیجه گیری

از بررسی رفتار دیوارهای بتنی مسلح تقویت شده با ورق های CFRP در برابر انفجار به وسیله نرم افزار المان محدود، نتایج زیر قابل بیان می باشد:

- مقاوم سازی با استفاده از ورق های CFRP تأثیر قابل توجه ای بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجاری داشته و تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت را کاهش می دهد.
  - به کارگیری چیدمان های نواری در مقابل پوشش کامل دیوار بر عملکرد رفتار سازه در برابر بار انفجار موثر بوده و در کاهش تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت مؤثر است.
  - کاهش سطح پوشش الیاف همراه با افزایش ضخامت می تواند عملکرد مشابهی از جهت تغییر مکان بیشینه و نشانه خسارت در مقایسه با پوشش کامل سطح با ضخامت نازک تر داشته باشد.
  - استفاده از آزمایش ها تجربی می تواند ضمن تأیید صحت این مدل سازی، در شناسایی خطاها و کم دقتی های احتمالی مفید واقع شود.
  - در نظر گرفتن توزیع مکانی بار انفجار در کنار توزیع زمانی موجب بالا رفتن دقت محاسبات خواهد شد
- بررسی و مطالعه ی آسیب های ناشی از زلزله های گذشته نشان می دهد که درصد بالایی از ساختمان های بتن مسلح که تاکنون ساخته شده اند در برابر زلزله مقاوم نیستند و یا مقاومت کافی و قابل قبولی ندارند، زیرا سازه های بتن مسلح موجود بر اساس آیین نامه های قدیمی طراحی شده و اکثر آنها الزامات آیین نامه های جدید زلزله را ارضا نمی کنند. همچنین ضعف های اجرایی مزید بر علت شده و ساختمان ها را آسیب پذیر ساخته است. از این رو ضرورت تقویت این ساختمان ها به خصوص برای مقابله با نیروهای جانبی و با روش های مقاوم سازی قابل اعتماد، آسان، سریع و اقتصادی احساس می شود. از آنجا که تعداد قابل توجهی از ساختمان های آسیب پذیر قبلاً ساخته شده اند، افزایش مقاوم سازی لرزه ای آنها به شیوه های گوناگون، کم و بیش مشکلات اجرایی و تغییر در معماری سازه را در بر خواهد داشت. به همین دلیل استفاده از ورق های FRP به منظور بهسازی لرزه ای در سال های اخیر بسیار گسترش یافته است. از دلایل مهم انتخاب این مصالح به عنوان تقویت کننده می توان به مقاومت کششی و گسیختگی بالای این مواد و وزن کم آن و همچنین انعطاف پذیری این سیستم و مقاومت و دوام بسیار خوب در برابر خوردگی و سادگی و سرعت بالای اجرای آن اشاره کرد. تیر همبند که یک عضو مهم در عملکرد و شکل گیری دیوارهای برشی کوپله می باشد ممکن است به دلایل مختلف از جمله خطاهای طراحی، آسیب دیدگی ناشی از بلایای طبیعی، خطاهای اجرایی، تغییر در کاربری سازه، اعمال بارهایی بیش از بارهای پیش بینی شده در هنگام طراحی و .. نیاز به ترمیم و تقویت داشته باشند.

## ویژگی های بارز CFRP

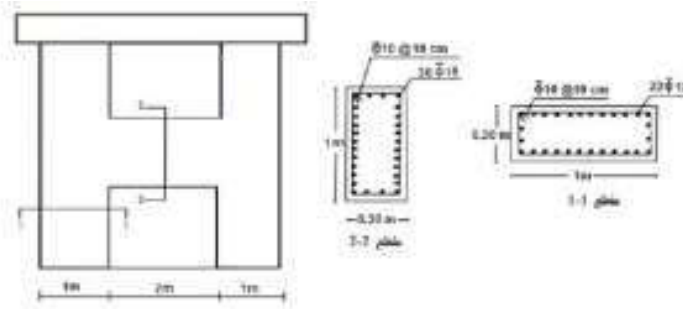
این الیاف ها بهترین نوع الیاف از لحاظ مقاومت، تاب خستگی و خزش هستند و در شرایط دمایی بسیار بالا مقاومت خود را به سختی از دست می دهند. عیب این الیاف ها گرانی آن و همچنین کرنش بسیار کم گسیختگی می باشد که آن را به یک مصالح ترد تبدیل می کند. ورق های CFRP از دو بخش اصلی تشکیل شده اند که به ترتیب عبارتند از:

1. الیاف غیرفلزی، جهت دار، پیوسته و کوچک با خصوصیات و ویژگی های خاص.
2. ملات های مایع سخت شونده: در این حالت الیاف ها و رزین ها جسم یکپارچه ای را به وجود می آورند. این قسمت خصوصیات خود را حفظ کرده تا یک ترکیب مقاوم را به وجود آورد.

## مدل سازی عددی

در مطالعه حاضر، یک دیوار برشی کوپله بتن مسلح در سه حالت مختلف معرفی شده در جدول (1) به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار Abaqus شبیه سازی شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، در حالت اول یک دیوار برشی در حالت بدون مقاوم سازی، در حالت دوم یک دیوار برشی که تیر پیوند آن توسط ورق های CFRP موازی تیر همبند با ضخامت ورق 0.2 میلیمتر، در حالت سوم یک دیوار برشی که تیر پیوند آن توسط ورق های CFRP موازی تیر همبند با ضخامت ورق 0.4 میلیمتر شبیه سازی می گردد. بررسی رفتار و تأثیری که پوشش CFRP بر رفتار دیواربرشی کوپله بتن مسلح می گذارد به عنوان مهم ترین هدف تحقیق می باشد.

## مدل سازی المان محدود



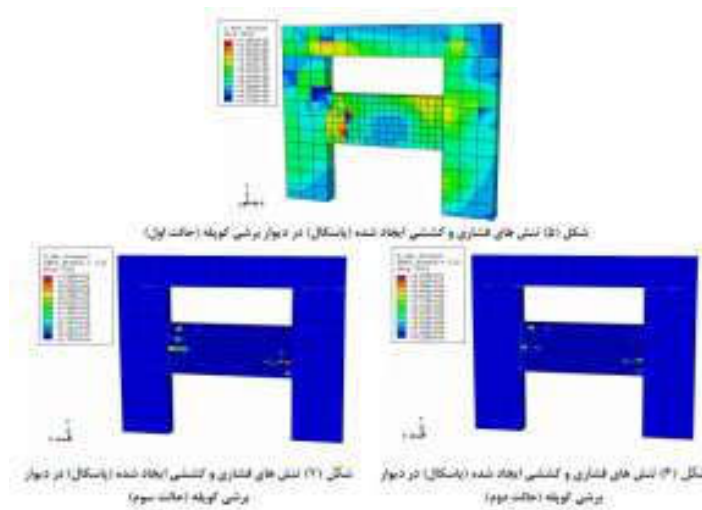
شکل (1) جزئیات آرماتور گذاری دیواربرشی کوپله مورد مطالعه

## مقاوم-سازی-تیر-همبند-دیوار-برشی

مطالعه اجزای محدود به کمک نرم افزار اجزای محدود Abaqus انجام گردید. Abaqus توانایی بررسی مدل های عددی ویژه ای را برای پاسخ غیرخطی بتن تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارد. در مدل سازی تیر از المان های Beam استفاده گردید. این المان ها، از المان های سازه ای معمول قابل استفاده در نرم افزار Abaqus می باشند و اعضای هستند که گره های آن در حالت دو بعدی دارای دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی و چنانچه در فضا باشند، دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی هستند. این المان ها دارای مقاومت خمشی، برشی، پیچشی و محوری می باشند. برتری مهم المان های Beam ساده بودن از لحاظ هندسی و تعداد درجات آزادی کم این المان ها می باشد. همچنین در مدل سازی میلگردها نیز از المان truss استفاده شده است در مدل سازی الیاف های CFRP نیز از المان Shell که خواص یک ناحیه ی پوسته ای را مشخص می کند، استفاده گردید. یک پوسته Shell عبارتست از ماده ای که یکی از ابعاد آن در مقایسه با دو بعد دیگر قابل نظر کردن بوده و از توزیع تنش در طول آن بعد صرف نظر می شود.

در این مطالعه از مدل سازی ترک خوردگی Concrete damage plasticity استفاده شده است. این مدل دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی در نظر می گیرد که شامل ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری می باشد (babu

و همکاران، 2014). شکل (4) نیز مش بندی تیر مورد مطالعه را نشان می دهد. مش بندی یا شبکه بندی که به نمایندگی از مدل مورد مطالعه قرار می گیرد، به اندازه کافی خوب می باشد به طوری که این اطمینان را به وجود می آورد که نیروهای اعمال شده به طور دقیق محاسبه شوند. شکل المان های مربوط به مش بندی از نوع Hex و تکنیک آن از نوع Structed که مش بندی منظم می باشد، است. همچنین بعد مش ها برابر 10 میلیمتر در نظر گرفته شد. از آنجا که مصالح مورد استفاده در مدل تیر مورد نظر شامل بتن، فولاد و الیاف می باشند، لذا می بایست اندرکنش و تماس های بین سطوح به نحوی مناسب شبیه سازی گردد. برای این منظور از طریق مازول Interaction که معمولا برای تعریف تماس ها و اندرکنش بین سطوح مورد استفاده قرار می گیرد، قید Tie برای تعریف اندرکنش بین فولاد و بتن و الیاف استفاده گردید. این قید از جمله قید های کاربردی در مهندسی عمران می باشد که می توان از آن برای یکپارچه سازی آرماتور و بتن، که در آن هر دو با المان های Solid مدل شده اند، استفاده نمود. بارگذاری اعمال شده بر روی دیواربرشی به صورت جانبی و از طریق کنترل جابجایی انجام شد و مساله غیر خطی نیز با استفاده از یک روش عددی دینامیکی (Chen و همکاران، 2009) به منظور غلبه بر مشکل متداول همگرایی در جریان مدلسازی حل گردید.

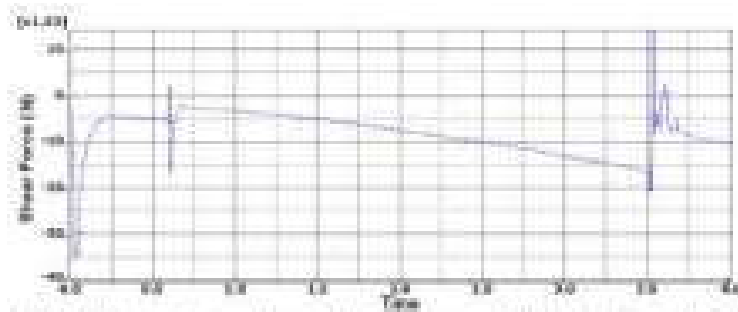


مدل-سازی-المان-محدود-مقاوم-سازی

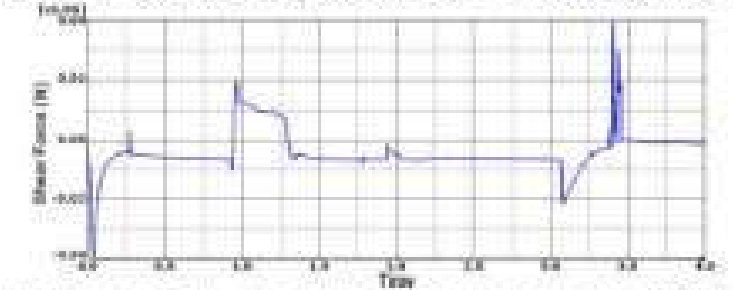
شکل های بالا مقادیر مربوط به توزیع تنش های کششی در نقاط مختلف دیوارهای برشی کوپله مورد مطالعه را در سه حالت اول، دوم و سوم بر حسب پاسکال نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود بیشینه تنش کششی ایجاد شده در دیوار برشی بدون پوشش CFRP برابر 7.996 مگاپاسکال شده است. از سوی دیگر در حالت دوم که در تیر همبند از ورق های CFRP موازی تیر و با ضخامت 0.2 میلیمتر استفاده شده است، بیشینه تنش کششی ایجاد شده برابر 12.65 مگاپاسکال می باشد. همچنین در حالت سوم که در تیر همبند از ورق های CFRP موازی تیر و با ضخامت 0.2 میلیمتر استفاده شده است، بیشینه تنش کششی ایجاد شده برابر 19.49 مگاپاسکال می باشد. بنابراین مشاهده می گردد که استفاده از ورق های CFRP در تیر همبند سبب شده است که مقدار دیوار برشی کوپله بتواند تنش های بیشتری را تحمل کند؛ به طوریکه در حالت مقاوم سازی با CFRP 0.2 میلیمتری مقدار مقدار تنش 1.56 برابر و در حالت مقاوم سازی با CFRP 0.4 میلیمتری مقدار تنش 2.43 برابر شده است. بنابراین می توان به این نتیجه دست یافت که مقاوم سازی با ورق های CFRP می تواند مقاومت کششی دیوارهای برشی کوپله و تیر همبند را افزایش دهد.

### نیروهای برشی ایجاد شده

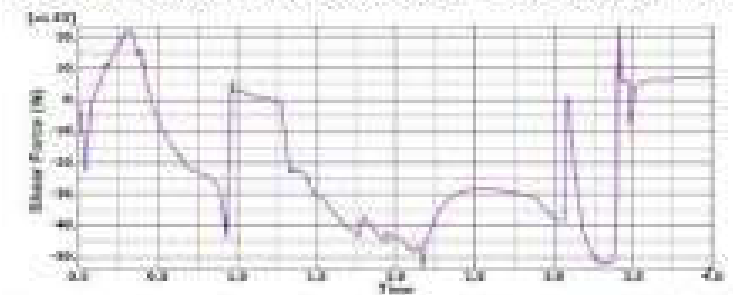
شکل های زیر مقادیر مربوط نیروهای برشی ایجاد شده در جهت X در دیوارهای برشی پیرامون تیر همبند را در سه حالت اول، دوم و سوم نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد در حالت بدون استفاده از ورق CFRP، بیشینه نیروی برشی ایجاد شده برابر 35 کیلونیوتن می باشد. همچنین در حالت دوم که در تیر همبند از ورق های CFRP موازی و با ضخامت 0.4 میلیمتر استفاده شده است، بیشینه نیروی برشی ایجاد شده برابر 40 کیلونیوتن می باشد و در نهایت در حالت سوم که در تیر همبند از ورق های CFRP موازی و با ضخامت 0.2 میلیمتر استفاده شده است، بیشینه نیروی برشی برابر 55 کیلونیوتن است.



شکل (11) نیروهای برشی ایجاد شده در جهت X در دیوارهای برشی پیرامون تیر همبند (حالت اول)



شکل (12) نیروهای برشی ایجاد شده در جهت X در دیوارهای برشی پیرامون تیر همبند (حالت دوم)

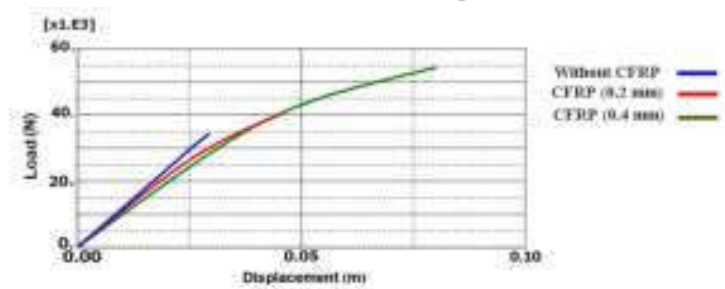


شکل (13) نیروهای برشی ایجاد شده در جهت X در دیوارهای برشی پیرامون تیر همبند (حالت سوم)

### نیروی-برشی-دیوار-مقاوم-سازی

دو عامل تعیین کننده در سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی مانند سیستم های مهاربند، دیوارهای برشی بتنی و فولادی، قاب های ممان گیر و ... سختی و مقاومت آنها می باشد. با توجه به لزوم کنترل تغییرمکان جانبی در ساختمان ها، سختی سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی از اهمیت خاصی برخوردار است. سیستم هایی که دارای سختی بیشتری می باشند، تغییر مکان جانبی آنها در مقابل بارهای جانبی کمتر است. شکل (14) منحنی بار-جابجایی را برای سه حالت مورد بررسی در این مطالعه نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می گردد، بار نهایی دیوار برشی در حالت بدون مقاوم سازی برابر 35 کیلو نیوتن و جابجایی متناظر آن برابر 2.7 سانتیمتر می باشد. در حالت های دوم و سوم نیز بار نهایی دیوار برشی به ترتیب برابر 55 کیلو نیوتن و 40 کیلونیوتن و جابجایی متناظر با آنها به

ترتیب برابر 7.62 سانتیمتر و 4.71 سانتیمتر می باشد. در مدل های تحلیل شده شاهد این بودیم که وجود ورق های CFRP باعث افزایش ظرفیت دیوار برشی شده است. به عبارتی استفاده از ورق CFRP با ضخامت های مختلف سبب شده که مساحت زیر منحنی بار-جابجایی افزایش یابد. این بدین معناست که وجود CFRP می تواند باعث افزایش باربری دیوارهای برشی کوپله گردد. از سویی دیگر در مقایسه بین دو حالت مقاوم سازی شده با CFRP که از دو ضخامت مختلف استفاده شده است، شاهد این هستیم که افزایش ضخامت از 0.2 میلیمتر به 0.4 میلیمتر به طور قابل ملاحظه ای در افزایش ظرفیت باربری تاثیر گذار بوده به گونه ای که در حالت مقاوم سازی تیر همبند با ورق CFRP 0.4 میلیمتری ظرفیت باربری دیوار برشی حدود 37 درصد افزایش پیدا کرد.



شکل (۱۴) منحنی بار-جابجایی برای سه حالت مورد بررسی

منحنی بار-جابجایی-مقاوم سازی

#### نتیجه گیری:

1. مقایسه نمودارهای بار - جابجایی مدل های عددی شبیه سازی شده نشان می دهد که در ناحیه ارتجاعی رفتار تقریباً یکسانی بین دیوارهای برشی شبیه سازی شده وجود دارد، به عبارتی سطح زیر نمودار هر سه مدل دیوار برشی کوپله تقریباً با یکدیگر یکسان می باشد. اما در ناحیه خمیری تفاوت رفتاری بین حالت ها کاملاً مشهود می باشد، که این موضوع تاثیر استفاده از پوشش های CFRP در افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری دیوارهای برشی را نشان می دهد.
  2. نتایج و خروجی های حاصل شده در این مطالعه عددی نشان می دهد که مقاوم سازی تیر همبند دیواربرشی کوپله بتن مسلح با استفاده از الیاف های CFRP باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار خواهد شد؛ به گونه ای که در حالت استفاده از پوشش CFRP شاهد این موضوع بودیم که میزان نیروی برشی تحمل شده برای حالت با پوشش CFRP و با ضخامت 0.4 میلیمتر در مقایسه با حالت بدون مقاوم سازی در حدود 60 درصد افزایش پیدا کرده است
  3. از مقایسه تنش های کششی ایجاد شده در تیر همبند دیوارهای برشی کوپله بتن مسلح مورد بررسی می توان به این نتیجه دست یافت که استفاده از پوشش های CFRP با هدف مقاوم سازی این دیوارها، مقاومت کششی بتن را می تواند به مقدار قابل توجهی افزایش دهد، بطوریکه در مطالعه حاضر شاهد این بودیم که در اثر استفاده از پوشش CFRP مقاومت کششی بتن در حدود 2.5 برابر افزایش داشته است
  4. در مقایسه بین ورق های CFRP با ضخامت های مختلف شاهد این هستیم که افزایش ضخامت از 2.0 میلیمتر به 0.4 میلیمتر به طور قابل ملاحظه ای در افزایش ظرفیت باربری تاثیر گذار است؛ به گونه ای که در حالت مقاوم سازی تیر همبند با ورق CFRP 4 میلیمتری ظرفیت باربری دیوار برشی حدود 37 درصد افزایش پیدا کرد. بنابراین توجه به ضخامت ورق CFRP انتخاب شده می تواند تاثیر بسزایی به لحاظ افزایش ظرفیت دیواربرشی داشته باشد.
- حفاظت از سازه ها در برابر اثرات تخریبی نیروهای محیطی و انرژی های ورودی به سازه همواره از مهم ترین دغدغه های مهندسی سازه بوده است. سازه ها به دلایلی از جمله عدم وجود یک سیستم مقاوم در مقابل نیروی جانبی، قرار داشتن

در مناطقی با خطر نسبی بالای زلزله، ضعف در طراحی و اجرا، عدم کیفیت مصالح، رعایت نکردن اصول فنی در زمان اجرا و ضعف در آیین‌نامه‌ها مقاومت کافی در مقابل نیروی زمین لرزه را ندارند. در سال‌های اخیر سیستم‌های جدیدی ارائه شده که هر یک به نوعی نیروی زلزله موثر بر سازه را کاهش می‌دهد و همچنین در حد امکان سازه را میرا می‌سازد و از جمله این سیستم‌ها می‌توان به میراگرهای ویسکوز اشاره نمود.

### ترمیم و تقویت تیرهای بتن آرمه

از ساده‌ترین روش‌های تقویت و ترمیم تیرهای بتن آرمه استفاده از ورقه‌های فلزی یا صفحات الیاف مسلح پلیمری می‌باشد که حتی در هنگام بهره برداری سازه نیز می‌توان از آن بهره برد. اما برخی خصوصیات منحصر بفرد ورقه‌های کامپوزیتی مانند مقاومت فوق العاده در محیط‌های مرطوب و خورنده و نیز سبکی و سهولت نصب، استفاده از این کامپوزیت‌ها را نسبت به ورقه‌های فلزی رایج‌تر ساخته است. تکنولوژی FRP از روش‌هایی است که به سادگی و سهولت در تقویت سازه‌های اجرا شده و بهره برداری شده برای بهبود باربری و رفتار مناسب سازه به کار برده می‌شود. معمولاً این مصالح به صورت پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربنی CFRP و یا پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه‌ای GFRP استفاده می‌شود. به خصوص در سال‌های اخیر گرایش به استفاده از FRP در تقویت دال‌ها افزایش یافته که این امر به دلیل سهولت کار کردن با این ماده، وزن کم، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا، مقاومت شیمیایی زیاد در برابر خوردگی، پوسیدگی و زنگ زدگی می‌باشد. لذا در این راستا هدف ما از این تحقیق بررسی ظرفیت تیرهای بتن آرمه خورده شده با ترمیم CFRP می‌باشد.

روش پژوهش

در ابتدا با استفاده از مطالعات و مقالات دیگر، علل ایجاد خوردگی در مقاطع را بررسی خواهیم کرده سپس به روش المان محدود با مدلسازی نمونه در برنامه ABAQUS به بررسی و تحقیق در این زمینه خواهیم پرداخت.

### خوردگی های بتن

در این بخش، به معرفی دو نوع از مهمترین خوردگی‌ها که مستقیماً بر روی خود بتن تاثیر دارند می‌پردازیم. بطور کلی خوردگی در بتن، به خرابی یا تغییر و دگرگونی در خواص و مشخصات مواد بتن اطلاق می‌گردد. خوردگی را نمی‌توان بطور کامل متوقف نمود بلکه می‌توان سرعت این فرایند را کاهش داد. این مشکل ممکن است ناشی از آسیب از طرف یون‌های معلق در هوا باشد. در مقاوم سازی سازه‌ها پیش از هر چیز انتخاب روش مناسب است که با شناخت دقیق علت وجود مشکل و برطرف ساختن آن میسر می‌شود.

عوامل مؤثر بر خوردگی شامل موارد زیر می‌باشد :

1. درجه حرارت محیط وقتی افزایش می‌یابد محیط برای انجام واکنش‌های شیمیایی آماده می‌شود. وقتی کاهش می‌یابد یخ زدگی مسیر نفوذ عوامل خورنده را فراهم می‌کند.
2. سائیدگی باعث از بین رفتن پوشش بر روی فلزات و تماس آنها با عوامل خوردگی می‌شود.
3. عوامل شیمیایی در هوا، آب و خاک و یا بصورت تماس مستقیم
4. شدت تنش موجود در سازه باربر

### عوامل شیمیایی خورنده سولفات‌ها:

وجود مقدار بسیار زیاد سولفات‌های داخل خاک یا آب قادر است در بتن‌هایی که به طرز صحیح طراحی و ساخته نشده‌اند سبب بروز اشکال شده و باعث تخریب آنها شود. سولفات‌ها که عمدتاً شامل سولفات کلسیم، سولفات سدیم و سولفات منیزیم هستند در تماس با ترکیبات هیدرات سیمان سخت شده به بتن حمله می‌کنند. در جایی که سازه‌های بتنی در مناطق ساحلی با فنداسیون‌هایی در تراز آب‌های زیرزمینی نمک دار واقع شده باشند نیز بتن در معرض حمله مواد شیمیایی از جمله سولفات‌ها قرار دارد. حمله سولفات‌ها در مناطق گرمسیر ساحلی با آب و هوای گرم



باعث خرابی های بسیار شدیدی در سازه های بتنی می شود. در حالت کلی فعل و انفعال سولفات سدیم با هیدروکسید کلسیم و فعل و انفعال سولفات سدیم با هیدروآلومینات کلسیم باعث ایجاد محصولاتی مانند زیر می شوند:

1. گچ باعث سستی در سطح بتن و مقاومت آن می شود، حجم مواد جامد را 125 درصد افزایش می دهد.
2. سولفوآلومینات کلسیم سبب افزایش قابل ملاحظه در حجم بتن و در نتیجه ترک خوردگی بتن و ریزش آن می شود. افزایش حجم مواد بر اثر این ترکیب به مقدار 225 درصد می باشد.

سولفات کلسیم فقط با هیدروآلومینات کلسیم واکنش انجام می دهد که در اثر این واکنش دو شکل مختلف هیدروسولفوآلومینات کلسیم تشکیل می شود.

الف) منوسولفات با مقدار کم ب) سولفوآلومینات کلسیم یا اترینگایت به مقدار زیاد

### واکنش قلیایی سنگدانه ها

این واکنش یک واکنش شیمیایی میان اجزای معدنی فعال تعدادی از سنگدانه ها و یون هیدروکسید سدیم-پتاسیم قلیایی بتن است. این پدیده می تواند بر مقاومت بتن و در نتیجه بر عملکرد سازه بتنی تاثیر گذار باشد. برخی واکنش ها سودمند هستند اما بعضی از واکنش های به وجود آمده می تواند باعث به وجود آوردن مشکلاتی در بتن شود که شامل انبساط غیرعادی درونی که باعث ترک خوردگی، جابجایی قسمت های مختلف سازه و کاهش مقاومت آن می باشد. این واکنش در دو حالت اتفاق می افتد: واکنش قلیایی سیلیکا - واکنش قلیایی کربنات. واکنش قلیایی سیلیکا بیش از واکنش کربنات نگران کننده است زیرا سنگدانه های معدنی حاوی سیلیکا متداول تر هستند. نشانه های وقوع آسیب در اثر واکنش قلیایی می تواند به صورت شبکه ای از ترک ها، گره های نزدیک، ورقه ای شدن و جابجایی قسمت های مختلف سازه نمایان شوند. سرعت خرابی به وجود آمده در اثر واکنش قلیایی سنگدانه ها یک فرایند کند می باشد.



شکل (1): ترک های کشیده در اطراف سنگدانه ها

### امتیازات کامپوزیت های CFRP در تقویت بتن:

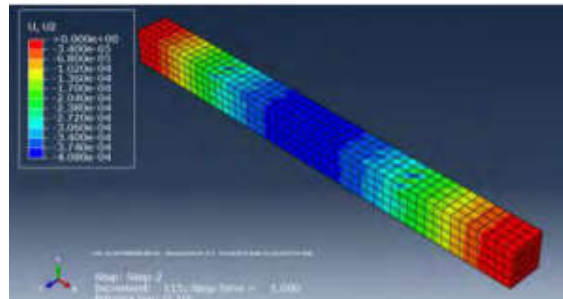
با توجه به اینکه کامپوزیت ها در مقیاس وزنی خیلی سبک تر از فولاد و بتن بوده و همچنین مقرون به صرفه برای استفاده در مقاوم سازی سازه ها می باشند. از جمله دلایل مزیت استفاده از این کامپوزیت ها می توان به موارد زیر اشاره نمود. استفاده از کامپوزیت ها برای تقویت در مقایسه با سایر روش ها نیاز به زمان بسیار کمتری دارد، و اعضای تقویت شده حداکثر ظرف چند ساعت آماده سرویس دهی می شوند. دلیل نازک بودن ضخامت لایه های کامپوزیت (در حد میلی متر)، استفاده از آنها برای تقویت، اضافه فضای را اشغال نمی کند. اضافه وزن تحمیلی ناشی از وزن این مصالح بسیار ناچیز و قابل صرفه نظر کردن است.

کامپوزیت ها خود زنگ نمی زنند همچنین با نفوذ ناپذیر کردن سطوح، از تماس عوامل مضره با اعضای سازه ای جلوگیری کرده آنها را محافظت می کنند همچنین در طولانی مدت نیاز به تعمیرات دوره ای ندارند. انعطاف موجود در طراحی این مصالح متناسب با نیاز (سختی، مقاومت و شکل پذیری) آنها را به مصالحی بی رقیب در مقاوم سازی تبدیل

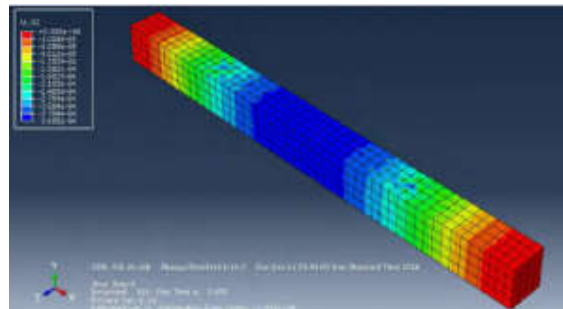
کرده است. با توجه به خواص این نوع الیاف در برابر خوردگی می‌توان گفت ایده‌ای بسیار مناسب در جهت افزایش ظرفیت مقاطع خورده شده می‌باشد چه در زمینه ترمیم و چه در زمینه جلوگیری از ایجاد خوردگی های آتی .

### یافته ها

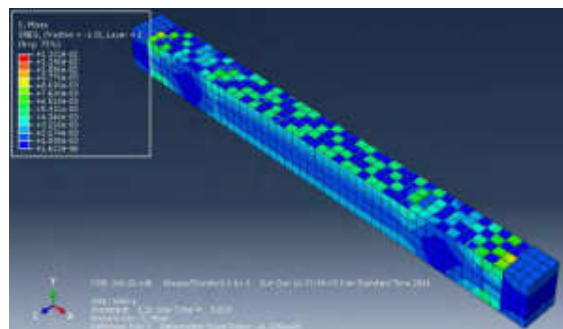
مدلسازی تیر بتن آرمه خورده شده در آباکوس در ادامه با مدل سازی دو تیر بتنی یکسان از لحاظ خوردگی و ابعاد و نوع بارگذاری خواهیم پرداخت که یکی از آنها را با CFRP به طور کامل دورپیچ نموده ایم.



شکل (2) : تغییرات جابه جایی در تیر بتنی آرمه بدون CFRP



شکل (3) : تغییرات جابه جایی در راستای محور Y (دور پیچ کامل با CFRP)



شکل (4) : تغییرات تنش S Mises در تیر بتنی (دور پیچ کامل با CFRP)

### نتیجه گیری

به طور کلی مطالعات بر روی ترمیم خوردگی بسیار محدود می‌باشد و معمولاً استفاده از CFRP در تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته اند که به طور مثال مقاطع تحت بارگذاری، آتش سوزی و ... تحت ترمیم یا تقویت قرار گرفته اند. نتایج ما در این مقاله بر روی تیری می‌باشد که طور کامل با CFRP تقویت شده می‌باشد همینطور نوع خوردگی تنها بر روی خود بتن در نظر گرفته شده است و در ابتدا آسیبی را به فولاد داخل بتن در نظر نگرفته ایم.

همین طور پیشنهاد می‌شود در زمینه ترمیم خوردگی مواردی چون مدل سازی انواع خوردگی بر روی بتن و فولاد مورد توجه بیشتری قرار بگیرد و البته مدل سازی های متنوع تر بسته به شرایط بارگذاری، ترک های موجود و البته مدل های مختلف نصب الیاف بر روی مقاطع در جهات زوایای مختلف صورت گیرد. از جمله نتایج حاصل شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود :

- در مطالعات انجام شده در این زمینه به این نتیجه رسیدیم که دور پیچ کردن تیر بتن آرمه خورده شده میتواند تا 13/1 برابر نسبت به حالتی که از CFRP استفاده نشده جابه جایی در جهت Y را کاهش دهد.
- تنش نیز میتواند به میزان 35/3 برابر برای کل تیر در صورت استفاده از CFRP کاهش یابد.
- با توجه به این که نوع بارگذاری به صورت متمرکز در قسمت های 2/3 و 1/3 تیر میباشد نوع ترک ها عموماً به صورت افقی در زیر بار های وارده میباشد، به همین دلیل با توجه به عمود قرار گرفتن الیاف و ترک ها می‌توان گفت این حالت یعنی دورپیچ نمودن کامل تیر با الیاف عملکرد مناسبی داشته است.
- البته باید به این موضوع اشاره نمود که نوع بارگذاری و مقدار آن نیز می‌تواند در این زمینه موثر واقع شود زیرا ممکن است نوع ترک های ایجاد شده متفاوت باشد.

منابع

بررسی ظرفیت تیر های بتن آرمه خورده شده با ترمیم CFRP؛ امیر نجاری؛ سومین کنفرانس سالانه پژوهش های معماری، شهرسازی و مدیریت شهری.

jackets for seismic retrofit of.Zou, X. K., Teng, J. G., De Lorenzis, L. and Xia, S. H. (2006).  
"Optimal performance -based design of FRP

افتخار، محمدرضا؛ مستوفی نژاد، داوود؛ 1388؛ " اثرات آرایش میلگرد بر نحوه ترک خوردگی و بار جداسازی ورق در تیرهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات CFRP"؛ هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران شیراز؛ ایران.  
تقویت الیافی با اضافه کردن میله های پلیمری تقویت شده الیافی (FRP) در منطقه مفصل پلاستیک از بتن انجام می‌شود. میله های FRP اضافه شده به عنوان تقویت کننده هایی افقی برای افزایش شکل پذیری بتن به شکلی مشابه با بتن الیافی تقویت شده عادی عمل می‌کنند. هنگامی که این تکنیک تقویت کنندگی الیاف با ژاکت گذاری مرسوم ترکیب می‌شود، بتن در تمامی بخش های یک مقطع عرضی ممکن است به صورت موثری محصور شود.

### بهسازی لرزه ای

بسیاری از سازه های بتن مسلح موجود که قبل از کاربرد آئین نامه های مدرن طراحی مقاوم در برابر زلزله طراحی و ساخته شده بودند، در برابر زلزله های فوق در مقیاس متوسط آسیب پذیر هستند. ستون های بتن مسلح به دلیل استفاده از آرماتور گذاری عرضی با جزئیات نادقیق به طور خاصی آسیب پذیرند. به همین دلیل این ستون ها شکل پذیری کافی را ارائه نمی دهند و احتمال وقوع شکست برشی، شکست مفصل برشی یا شکست وصله ی پوششی در یک زلزله شدید وجود دارد. در نتیجه بهسازی این ستون های RC از اهمیت زیادی در توانبخشی به سازه های موجود برخوردار است. رایج ترین روش بهسازی؛ ژاکت گذاری بتنی و فولادی است که در سال های اخیر به دلیل سرعت و آسانی نصب، کاهش تعمیر و نگهداری، مقاومت بالا، وزن سبک، دوام بالا و افزایش کمتر در سختی سازه بجای فولاد از مصالح پلیمری الیاف تقویت شده (FRP) در ژاکت گذاری استفاده می‌شود که موجب یک افزایش کمتر در نیروی اینرسی لرزه ای می‌شود. پارامترهایی مانند مقاومت بتن، انواع الیاف و رزین، کسر حجمی الیاف و جهت گیری فیبر در ژاکت، ضخامت ژاکت (یا تعداد لایه) و باند رابط بین هسته و ژاکت (به عنوان مثال مکانیکی و یا شیمیایی) و در نهایت شکل مقطع در مقاومت و انعطاف پذیری بتن محصور شده با الیاف FRP اثر می‌گذارند. مثلاً در ستون های دایره ای درجه پیش تنیدگی تحت کنترل باشد و از 25/0 بیشتر نشود، همچنین سطح ستون ساییده شده و ورقه های CFRP با چسب اپوکسی به سطح ستون چسبانده شوند، بسیار موثر است. در صورتی که بهسازی خمشی ستون های RC مربعی یا

مستطیلی بوسیله ژاکت‌گذاری به دلیل محصورشدگی ضعیف بتن در وسط جنب‌های ستون، به خصوص برای ستون‌های بزرگ کارآمدی زیادی ندارد. تلاش‌های زیادی برای بهبود اثربخشی ژاکت‌گذاری برای ستون‌های مربعی/مستطیلی انجام شده است. از جمله این روش‌ها :

- تغییر شکل مستطیلی به شکل دایره‌ای
- استفاده از سخت‌کننده‌های اضافی در مفصل پلاستیک برای افزایش سختی خارج از صفحه از ژاکت
- موج دار کردن ورق فولادی برای افزایش سختی خمشی خارج از صفحه
- استفاده از بولت‌های مهاری برای تقویت اثربخشی محصورشدگی

در این مقاله به بررسی یک طرح بهسازی که از تکنیک الیاف تقویت‌کننده در جهت عرضی یک ستون بهره می‌برد، پیشنهاد و بررسی شد. در این تکنیک، میله‌های FRP کوچک در جنب‌های یک ستون در منطقه مفصل پلاستیک قرار داده می‌شوند. این میله‌های کوچک به عنوان تقویت‌کننده‌های عرضی در روشی مشابه با الیاف در بتن الیافی تقویت شده (FRC) عمل می‌کنند تا ترک خوردگی را محدود کنند و شکل‌پذیری بتن را افزایش دهند. اثربخشی این طرح جدید با آزمایش نیم ستون نشان داده شده است.

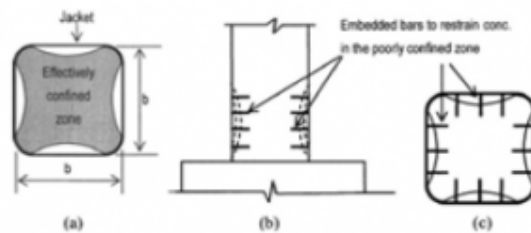
### فلسفه‌ی بهسازی

عملکرد یک ژاکت بر دو بخش تقسیم می‌شود :

- تامین تقویت‌کننده برشی اضافی برای از افزایش مقاومت برشی ستون
- تامین محصورشدگی برای افزایش مقاومت خمشی و شکل‌پذیری ستون

برای شکست خمشی، دو حالت شکست رایج وجود دارد : خردشدگی بتن در منطقه مفصل پلاستیک و شکست وصله پوششی از میلگردهای تقویت‌کننده کششی.

محصورشده‌گی موثر از یک ژاکت می‌تواند شکل‌پذیری مصالح بتن را افزایش دهد و در نتیجه شکل‌پذیری ستون افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل 1 (a) نشان داده شده است، یک ژاکت مربعی/مستطیلی فقط می‌تواند در محدوده گوشه‌ها و مرکز یک ستون محصورشدگی موثر ایجاد کند. محصورشدگی در وسط یک جنب مستقیم، همانند قسمت‌های سایه نخورده در شکل 1 (a)، به دلیل مقاومت خارج از صفحه ضعیف، ژاکت ناکافی است. به عنوان یک نتیجه، شکل‌پذیری بتن در ناحیه‌ی محصور شده ضعیف، پایین است و نمی‌تواند تقاضای لرزه‌ای را برآورد کند. عامل کلیدی در بهسازی ستون‌های RC مربعی/مستطیلی افزایش شکل‌پذیری بتن در منطقه محصور شده ضعیف است.



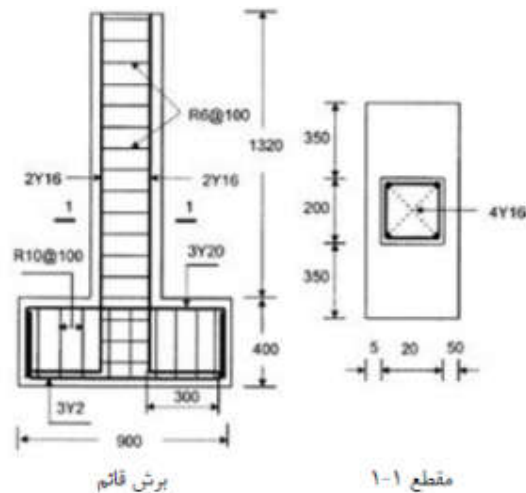
شکل (1) : مکانیزم محصورشدگی FRP بوسیله میله‌های مدفون

افزایش شکل‌پذیری FRC از مقاومت الیاف‌ها در برابر بازشدگی ترک‌های کوچک در بتن به عنوان بازدارنده‌های ترک نشئت می‌گیرد. به خوبی می‌دانیم که ترک‌های طولی در یک ستون بتنی تحت بار فشاری گسترش می‌یابند. بدیهی است، تقویت‌کننده‌ها در جهت عرضی عمود بر بار یا ترک‌ها در محدود کردن بازشدن ترک‌های طولی بسیار کارآمدتر هستند و تقویت‌کننده‌های طولی ناکارآمد هستند. به صورت تجربی نشان داده شده است که الیاف فولادی با جهت افقی در افزایش شکل‌پذیری FRC کارآمدترین مورد است و شکل‌پذیری FRC می‌تواند چند برابر بتن ساده باشد. با توجه به مشاهدات قبلی، می‌توان تقویت‌کننده‌های عرضی یا افقی را در مناطقی از بتن با محصورشدگی ضعیف از مفصل پلاستیک مدفون کرد تا شکل‌پذیری بتن در آن منطقه افزایش یابد، همانطور که در شکل 1 (a,b) نشان داده

شده است. این موضوع در ترکیب با ژاکت‌گذاری مرسوم می‌تواند محصور شدگی موثری برای بتن حول گوشه‌ها و قسمت‌های داخلی ستون ایجاد کند، قرار دادن میلگردها می‌تواند یک روش موثر برای حل مشکل محصورشدگی ضعیف در ستون‌های RC مستطیلی ارائه دهد. برای ستون‌های کوچک مربعی/مستطیلی، ژاکت‌گذاری به خودی خود معمولاً برای تامین محصورشدگی مناسب برای ستون‌های RC کافی است.

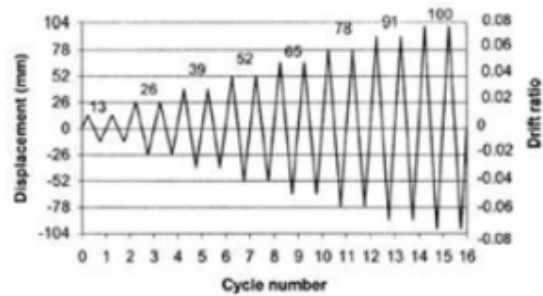
### برنامه‌ی آزمایشگاهی

برای آزمایش ستون، اعمال بار محوری قابل توجه حیاتی است. نمونه آزمایش معمولی یک ستون طره‌ای بلند 1320 mm با یک مقطع عرضی مربعی بود. همانطور که در شکل (2) نشان داده شده است، ریشه ستون در ابعاد به عنوان مفصل تیر - ستون یا یک پی ساخته شد. ضخامت کاور 25 میلی‌متر بود. آرماتورهای طولی Y164 با یک شکل «L» مانند به داخل ریشه ادامه پیدا کرده بودند. انتهای دیگر میلگردها به یک صفحه فولادی روی ستون به یک مفصل فولادی جوش داده شده بودند. ورق فولادی روی ستون به یک مفصل فولادی جوش داده شده بود که به فعال کننده بار محوری متصل شده بود. خاموت‌های R6 در فاصله 100 میلی‌متری از یکدیگر و یک قلاب 90 درجه و طول همپوشانی 45 میلی‌متری در یک گوشه داشتند، در کل شش ستون در این نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل (2) : جزئیات آرماتورگذاری

ستون C1 یک نمونه بهسازی نشده بود که برای آزمایش بارگذاری یکنواخت به عنوان یک ستون کنترل مورد استفاده قرار گرفت. هدف دوم این آزمایش یکنواخت پیدا کردن جابه‌جایی تسلیم ستون بهسازی نشده بود که برای تعیین تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای شکل (3) لازم بود. ستون C2 یک نمونه بهسازی نشده برای آزمایش چرخه‌ای بود که به عنوان معیاری برای مقایسه با دیگر ستون‌های بارگذاری شده به صورت چرخه‌ای و بهسازی شده مورد استفاده قرار گرفت. ستون‌های C3 - C6 توسط طراح‌های متفاوتی بهسازی شد. ستون C3 با قرار دادن میله‌های FRP شیشه‌ای (GFRP) بهسازی شد. ستون‌های C4 و C5 با ژاکت‌گذاری FRP کربنی (CFRP) به علاوه قرار دادن میله‌های یکسان مشابه ستون C3 بهسازی شدند. ستون C6 فقط با ژاکت‌گذاری و بدون قرار دادن میله بهسازی شد.



شکل (3): تاریخچه بارگذاری برای بارگذاری رفت و برگشتی

### اطلاعات بهسازی

قطر اسمی میله‌های GFRP، 6mm؛ مقاومت کششی میله‌ها، 850 مگاپاسکال و کرنش نهایی آن 45/1٪ آزمایش نمونه‌های اصلی بود. میله‌ها به قطعه‌هایی با طول 100mm برش داده شده بودند. قبل از ساخت، گمانه‌هایی با عمق 100mm و قطر 10mm در منطقه مفصل پلاستیک ستون‌های C3، C4 و C5 حفر شدند. گرد و غبار داخل سوراخ‌ها با استفاده از یک جاروبرقی و پمپ از بین رفت. برای قرار دادن میله‌ها، یک لوله نازک مخصوص برای تزریق اپوکسی به سوراخ‌ها استفاده شد تا اطمینان حاصل شود که سوراخ‌ها به صورت کامل با این ماده پر شده‌اند. سپس میله‌های GFRP در سوراخ‌ها قرار داده شد تا فرایند نصب و راه‌اندازی کامل شود. سیستم ورقه‌ای MBrace شامل ورقه‌های CFRP و یک اشباع‌کننده‌ی دو بخشی ساخته شده توسط شرکت MBT (سنگاپور) برای ژاکت‌گذاری مورد استفاده قرار گرفت. ضخامت اسمی ورق الیاف، 0/165mm بود و رزین اشباع با ترکیب بخش‌های A و B در نسبت حجمی 3:1 آماده شده بود. قبل از ژاکت‌گذاری ستون، گوشه تیز ستون بتنی سمباده کشیده شد تا یک شعاع گوشه 15 میلی‌متری ایجاد شود. در ساخت ژاکت، ورق‌های کربنی با اپوکسی مخلوط شده اشباع شده بودند و یک اندود اپوکسی به سطوح آماده شده ستون کشیده شد. سپس پارچه‌های اشباع شده حول ستون با جهت‌گیری الیاف در جهت بیرونی پیچیده شد. طول هم‌پوشانی 110mm بود. دو لایه ورق CFRP به ستون‌های C4، C5 و C6 اعمال شد. ژاکت‌گذاری فقط در منطقه مفصل پلاستیک در کف ستون قابل اعمال بود و ارتفاع ژاکت 250mm بود. یک فاصله 15 میلی‌متری بین ورق CFRP و ریشه خالی ماند تا از لهیدگی ژاکت در پایه جلوگیری شود. کنترل شدید مقاومت کششی و مدول یانگ الیاف کربنی به ترتیب 449 و مگاپاسکال آزمایش شده بودند. ازدیاد طول در پارگی حدود 1/78٪ بود. آزمایش نمونه‌های اصلی از میله‌های GFRP و ورق‌های CFRP نشان داد که مصالح تا زمان گسیختگی به صورت الاستیک خطی عمل می‌کنند.

### میله‌های فولادی و بتنی

برای ساخت نمونه‌ها از بتن مخلوط آماده با مقاومت فشاری مشخص شده‌ی 402 مگاپاسکال استفاده شد. مقاومت بتن ارائه شده در جدول 1 برابر مقاومت ستون هم‌ارز است که به صورت محاسبه شده بود، که مقاومت متوسط بتن از سه مکعب (100 100 100 mm) است که در همان روز در آزمایش ستون مربوطه آزمایش شده است. نتایج آزمایش‌های مصالح میلگردهای تقویتی در جدول موجود در تصویر (4) ارائه شده‌اند.

Reinforcement	Yield strain	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Stub main bar Y20	0.0025	533.1	646.6
Column main bar Y16	0.0024	507.6	666.0
Stub stirrups R10	0.0017	412.0	568.6
Column stirrups R6	0.0017	419.3	538.5

شکل (4) : جدول نتایج آزمایش تقویت‌ها

### مشاهدات آزمایش

در آزمایش اول، ستون C1 به صورت یکنواخت تا زمان شکست بارگذاری شد. مشاهده شد که اولین ترک در جنب کششی رخ داد، هنگامی که جابه‌جایی جانبی به حدود 6/0٪ نسبت به تغییر مکان جانبی رسید. منحنی‌های واکنش این شش ستون در شکل (5) نشان داده شده‌اند.



شکل (5)

برای مقایسه‌ی نتایج آزمایش و عملکرد ستون‌ها، مشخصات زیر مورد بحث قرار گرفت.

### نسبت شکل‌پذیری

نسبت شکل‌پذیری به عنوان جابه‌جایی نهایی تقسیم بر جابه‌جایی تسلیم یا جابه‌جایی نهایی روی شاخه‌ی نرم، جایی که مقاومت به 5٪ مقاومت اوج کاهش می‌یابد، تعریف می‌شود. نسبت شکل‌پذیری از دو ستون بهینه‌سازی نشده، C1 و C2، به ترتیب 71/1 و 88/1 است. در میان ستون‌های بهینه‌سازی شده، ستون C6 که با ژاکت‌گذاری بهینه‌سازی شده، کوچکترین نسبت شکل‌پذیری 2/3 را دارد، در حالی که ستون‌های C4 و C5 که هم ژاکت‌گذاری و هم با قرار دادن میله‌ها بهینه‌سازی شده بودند، بزرگترین نسبت شکل‌پذیری به ترتیب 99/4 و 1/5 را دارند. ستون C3 نیز که با قرار دادن میله بهینه‌سازی شده بود، نسبت شکل‌پذیری 63/4 داشت. بنابراین مشاهده شد شکل‌پذیری ستون‌ها می‌تواند به شدت توسط روش‌های بهینه‌سازی افزایش یابد. نسبت شکل‌پذیری ستون C3 نشان داد که قراردعی میله‌های افقی می‌تواند به طور موثر انبساط جانبی بتن را محدود کرده و در نتیجه زوال مقاومت بتن را به تاخیر بیاورد. نتایج نشان داد ژاکت‌گذاری به تنهایی نیز بسیار موثر است. زیرا اگر اندازه ستون کوچک باشد، ژاکت‌گذاری معمولاً برای ستون‌های مستطیلی کارآمد است.

### کاهش سختی

تمام ستون‌های (C1 تا C6) قبل از اینکه نسبت تغییر مکان جانبی حدود 5/2٪ در شروع مقاومت اوج داشته باشند، کاهش سختی مشابهی داشتند. پس از آن، ستون‌های بهینه‌سازی نشده، C1 و C2، به لحاظ سختی سریعتر از ستون‌های بهینه‌سازی شده، C3-C6، خراب می‌شوند. در نتیجه واضح است که روش‌های بهینه‌سازی در شاخه نزولی منحنی واکنش، سرعت تخریب بتن را در مقایسه با ستون‌های بهینه‌سازی نشده آهسته‌تر می‌کنند. از دیگر نتایج این است که قراردعی میله در محصور کردن بتن و حفظ یکپارچگی ستون‌ها به میزان ژاکت‌گذاری موثر است. از آنجا که

ژاکت گذاری در محصور کردن بتن برای ستون‌های بزرگ مربعی/مستطیلی کمتر کارآمد است، انتظار می‌رود که قراردعی میله برای بهینه‌سازی ستون‌های بزرگ کارآمدتر از ژاکت گذاری باشد.

### اتلاف انرژی

اتلاف انرژی در ستون بهینه‌سازی نشده C2 سریعتر است. به عبارت دیگر، در برون گردی جابه‌جایی مشابه، نسبت به ستون‌های بهینه‌سازی شده در ستون بهینه‌سازی نشده اتلاف انرژی بیشتری رخ می‌دهد. این به دلیل خردشدگی قابل توجه بتن در ستون بهینه‌سازی نشده است که انرژی بیشتری جذب می‌کند. این موضوع معقول است زیرا در یک عضو کاملاً الاستیک اتلاف انرژی رخ نمی‌دهد. در میان ستون‌ها C3 بیشترین و C6 کمترین اتلاف انرژی را داشتند. نتایج اتلاف انرژی به وضوح نشان می‌دهد که هر دو روش بهینه‌سازی قرار دادن میله و ژاکت گذاری می‌تواند طاقت ستون‌ها را تا چندین برابر افزایش دهند.

### نتایج کلی

در این مقاله با قرار دادن میلگردهای تقویتی در منطقه مفصل پلاستیک یک روش جدید برای بهسازی ستون‌های RC مربعی/مستطیلی پیشنهاد و آزمایش شد. هدف قرار دادن میله افزایش شکل‌پذیری بتن در منطقه مفصل پلاستیک بود و همچنین در صورت امکان طول مفصل پلاستیک را افزایش دهد. این آزمایش نشان داد که این روش در به تاخیر انداختن زوال بتن و جلوگیری از کمانش طولی آرماتورها موثر است بنابراین در افزایش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی ستون‌های بهسازی شده تاثیر دارد.

منابع

مروری بر بهسازی لرزه ای ستون های چهارگوش بتن مسلح توسط الیاف FRP کربنی همراه با میله‌های GFRP ؛ حمید صابری ، شکوفه زارعی ؛ تیر ماه 1396.

Griffith, M. C., Wu, Y. F., and Oehlers, D. J. \_2005\_. "Behaviour of steel plated RC 347–333, 4\_8, *Struct. Eng Adv* ".columns subject to lateral loading

Retrofit of concrete columns with inadequate lap splices by the use of " \_1996\_ 714–693, 4\_12, *Spectra Earthquake* ".rectangular steel jackets

چندین روش جهت تعمیر و تقویت سازه‌های بت نامرئ وجود دارد که از جمله آنها م‌یتوان به استفاده از ژاکتهای بتنی، ژاکتهای فولادی و ژاکتهای پلیمری اشاره نمود. امروزه استفاده از ژاکتهای پلیمری به دلیل خواص فوق العاده آن نظیر مقاومت وسختی بالا، وزن اندک، مقاومت در برابر خوردگی، ناهمسانگرد بودن این مواد و طراحی بهینه، نصب آسان و سریع و هزینه کل کمتر (شامل زمان ، مصالح و اجرا ) نسبت به ورقهای فولادی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله نیز به بررسی مسائل تقویت ستون های بتن آرمه پرداخته می شود. از جمله مسائل کلیدی در این زمینه بهبود رفتار تنش-کرنش عضو محصورشده توسط این نوع ژاکتها می باشد.





## تقویت-ستون-های-بتن-آرمه-FRP

سازه های بتن آرمه به دلایل متعددی ممکن است در معرض آسیب قرار گیرند که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

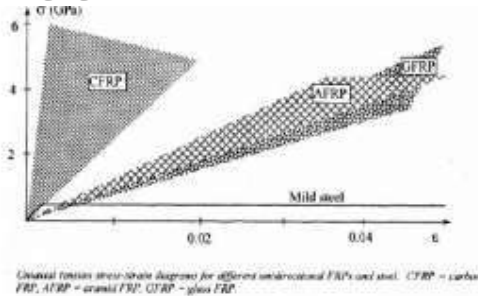
رفتار سازه های بتن آرمه در زلزله های اخیر نشان داده است که آیین نامه طراحی سازه های بتن آرمه که در سالهای قبل از 1970 م. تدوین یافته است دارای نقایص و کمبودهایی از قبیل جزئیات ضعیف وصله آرماتورهای طولی و نرسیدن میلگردهای طولی به حالت تسلیم، کمبود فولادهای عرضی محصورکننده و مهار قلاب انتهایی آرماتورهای عرضی در منطقه پوشش بتن می باشد. قرارگیری بتن تحت تاثیر شرایط محیطی مخرب باعث خوردگی فولاد می شود. این مسئله مخصوصا در مورد سازه های دریایی، ساحلی و پایه پل ها که شرایط محیطی خوردگی دارد بیشتر مورد توجه است. پیشرفت سریع خوردگی در محیطهای آلوده به نمک باعث ترک خوردگی و پوسته شدن بتن پوشش می شود. بار سازه های موجود نیز به دلایل مختلف ممکن است با توجه به گذشت زمان افزایش یابد؛ که این افزایش در ساختمان های مسکونی به دلیل تغییر کاربری و در مورد پلها به دلیل افزایش بار ترافیکی رخ می دهد. شناخت بهتر نیروهای زلزله نسبت به گذشته و تغییرات آیین نامه زلزله باعث شده که سازه های موجود را می توان دوباره ارزیابی کرده و در برابر زلزله مقاوم سازی نمود. امروزه استفاده از ژاکتهای پلیمری به دلیل خواص فوق العاده آن نظیر مقاومت و سختی بالا، وزن اندک، مقاومت در برابر خوردگی، ناهمسانگرد بودن این مواد و طراحی بهینه، نصب آسان و سریع، هماهنگی با معماری سازه، کارایی اجرایی خوب، انعطاف پذیری بیشتر در طراحی، هزینه کل کمتر (شامل زمان، مصالح و اجرا) نسبت به ورقهای فولادی، انجام تقویت در زمان استفاده از سازه، عدم تغییرات قابل توجه در سختی اعضای سازه در حالت تقویت برشی و دوام بیشتر اعضای دور پیچ شده مورد توجه قرار گرفته است. این الیاف با ایجاد حالت تنشهای سه محوره باعث افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن محصورشده می گردند. شایان ذکر است که استفاده از این مواد در سازه های جدید (الیاف به صورت تیوب) مورد توجه قرار گرفته است. در حالت استفاده از این مواد بصورت تیوب دیگر نیازی به قراردادن آرماتورها در داخل بتن و استفاده از قالب برای بتن ریزی نیست و از لحاظ اجرایی آسانتر می باشد.

### قسمتهای تشکیل دهنده مواد مرکب

مواد مرکب از سه قسمت اصلی الیاف، چسب و ماده ای کم وزن بنام پر کننده تشکیل شده که الیاف جهت تحمل بار و چسب برای چسباندن الیاف و عملکرد یکنواخت آنها بکار برده می شوند.

## 28-1-1- خصوصیات الیاف

متداولترین نوع الیاف مورد استفاده در ساخت کامپوزیتهای الیاف کربن، شیشه و آرامید م یباشند. این الیاف دارای مقاومت کششی بسیار بالایی بوده و رفتار تنش- کرنش این الیاف بصورت خطی می باشد.



شکل 1: منحنی تنش-کرنش الیاف پلیمری در مقایسه با فولاد

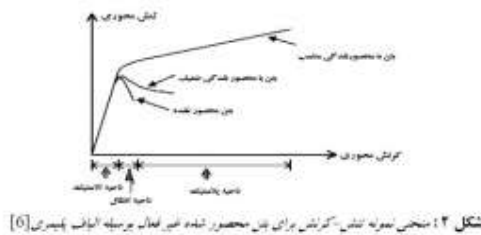
تنش-کرنش الیاف-پلیمری

همانگونه که در شکل 1 ملاحظه می شود الیاف تا لحظه گسیختگی رفتار خطی داشته که این نوع رفتار دو عیب عمده دارد :

1- اعضای تقویت شده با الیاف شکل پذیری کمتری دارند، اما در صورتیکه برای محصورشدگی عضو بکار روند (مثل ستون) مقاومت و شکل پذیری را افزایش می دهند. 2- باز توزیع تنشها بعلت کمبود شکل پذیری محدود است. الیاف کربن دارای این خاصیت می باشند که در محدوده وسیعی از سختی ها می توانند تولید شوند، که این امر در طراحی سازه ای کامپوزیتها م ی تواند موثر باشد ( شکل ۱). تنها مشکل استفاده از این الیاف هزینه بالای آن می باشد. مهمترین خواص الیاف کربن عبارتند از: مقاومت و سختی خیلی بالا، مقاومت بسیار عالی در برابر مواد شیمیایی و رطوبت، مقاومت بالا در برابر خستگی و گسیختگی در اثر خزش، رسانا بودن و مستعد خوردگی.

#### رفتار تنش- کرنش بتن محصورشده بوسیله الیاف پلیمری

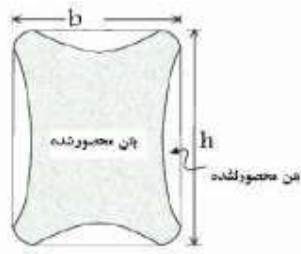
در تحقیقاتی که بمنظور شناخت رفتار اعضا سازه ای صورت می گیرد، بیشتر توجهات روی اصول و مبانی سازه ای می باشد. به همین دلیل بخش بزرگی از کارهای تحقیقاتی انجام شده روی رفتار نمونه های کوچک بتن ساده تقویت شده بوسیله الیاف پلیمری تحت بارهای محوری می باشد. تقویت شده بوسیله الیاف پلیمری تحت بارهای محوری می باشد. در شکل 2 منحنی های تنش- کرنش محوری بتن محصور شده توسط الیاف پلیمری در مقایسه با بتن ساده محصور نشده نشان داده شده است. منحنی تنش- کرنش بتن محصور شده غیرفعال ( قبل از شروع بارگذاری هیچگونه فشار جانبی به بتن وارد نمی شود) اساسا شامل دو بخش است. بخش اولیه منحنی مربوط به قسمت خطی و بخش ثانویه مربوط به منطقه پلاستیک می باشد. شیب قسمت خطی منحنی مشابه شیب قسمت خطی بتن محصور نشده می باشد.



شکل ۲ منحنی نمونه تنش- کرنش برای بتن محصور شده غیر فعال بوسیله الیاف پلیمری [6]

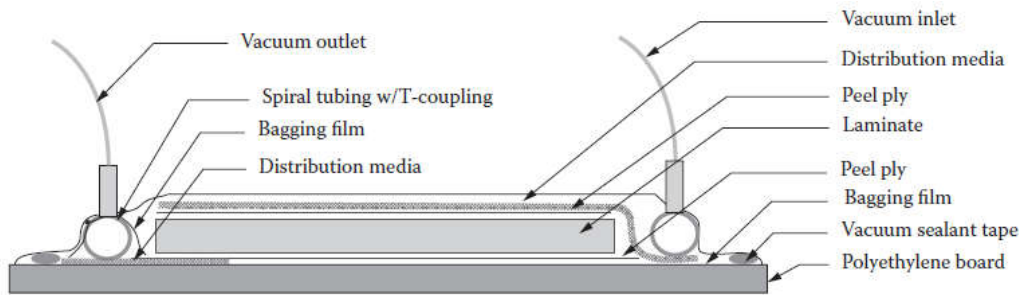
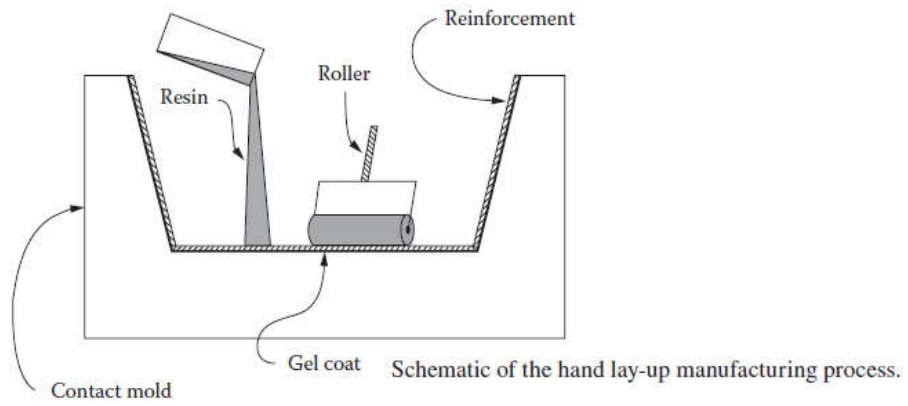
#### تنش- کرنش- بتن- محصور- شده

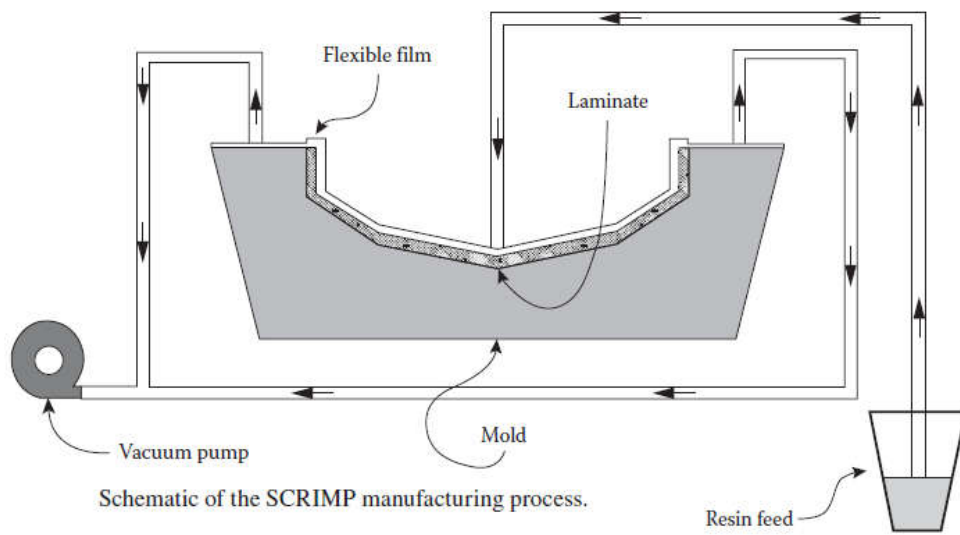
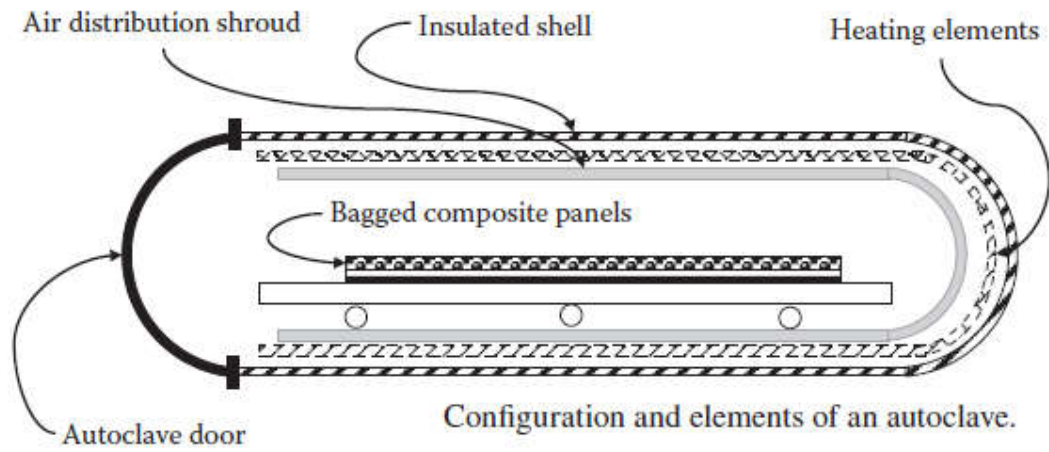
نوع ژاکت محصورکننده بتن اثر کمتری روی بخش خطی منحنی داشته؛ به جز اینکه ژاکتهای سخت تر تمایل به افزایش مختصر تنش و کرنش در نقطه انتقال منحنی ها و شیب بیشتر ناحیه خمیری دارند. دلیل اینکه منحنی های تنش- کرنش بتن محصور شده و محصورنشده در منطقه خطی شبیه به یکدیگر می باشند این است که بتن در بارهای کم انبساط جانبی کمتری داشته و در نتیجه ژاکت محصورکننده فعال نمی شود. ناحیه خمیری بلافاصله پس از مقاومت حداکثر بتن محصورنشده تشکیل می شود. در این نقطه بعلت رشد سریع کرنشهای جانبی بتن و انبساط حجمی آن ژاکت فعال می شود. در ناحیه پلاستیک با افزایش جزئی در تنش محوری، افزایش زیاد در انبساط جانبی مشاهده می شود که این انبساط بدلیل گسترش ترکها و تخریب ساختار درونی بتن بوده و باعث افزایش فشار محصورکنندگی ژاکت می باشد. از اینرو، با توجه به اینکه الیاف تا لحظه گسیختگی رفتار خطی خواهند داشت، این مکانیزم در ایجاد شیب بخش خمیری منحنی سهم بسزایی دارد. اگر بتن خوب محصورشده باشد شیب ناحیه خمیری مثبت و کاملاً خطی خواهند بود، که دلالت بر این دارد که فشار محصورکنندگی برای مهار اثرات انبساط جانبی بتن ناشی از رشد خرابی در آن مناسب بوده و ظرفیت باربری بیشتری را ایجاد می کند. اگر بتن خوب محصور نشده باشد، تنش محوری حداکثر، شبیه به حالت بتن محصورنشده خواهد بود که دلالت بر ناکافی بودن فشار محصورشدگی برای شروع اثرات خرابی بتن که کرنش های بزرگتری را تحمل می کنند، دارد.

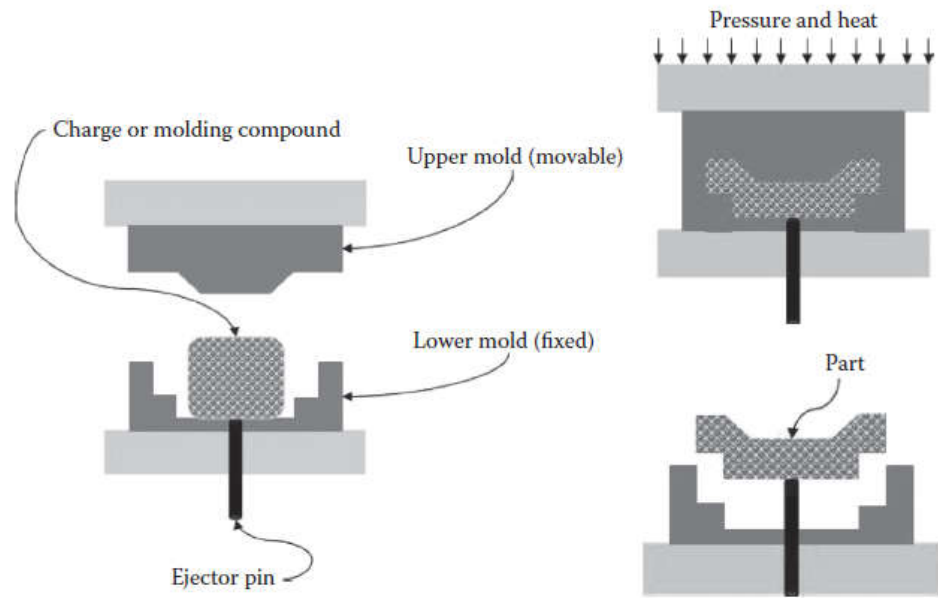


شکل ۳: سطح مقطع موثر محصور شده [3]

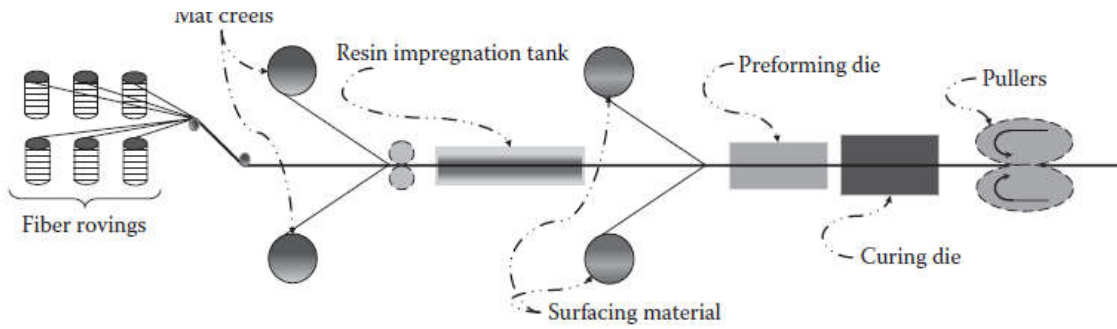
سطح-مقطع-محصور-شده



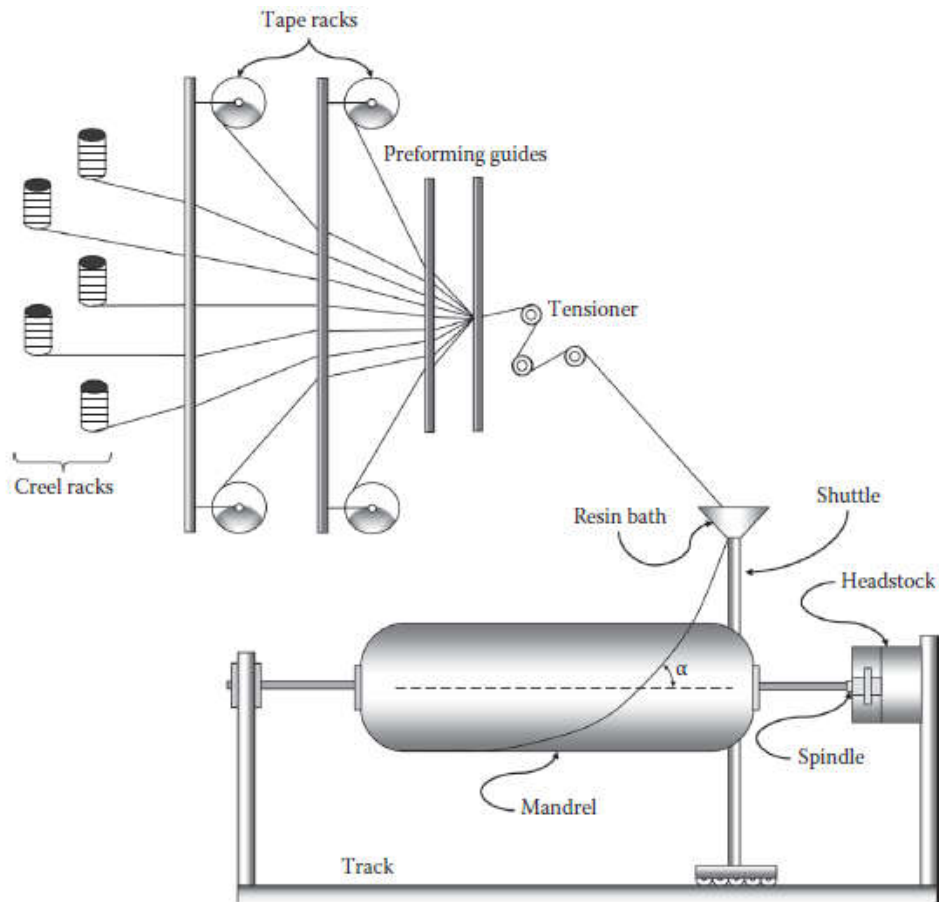




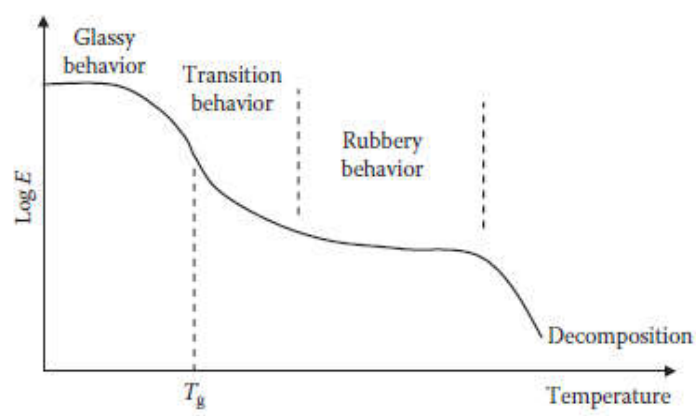
Compression molding manufacturing process.



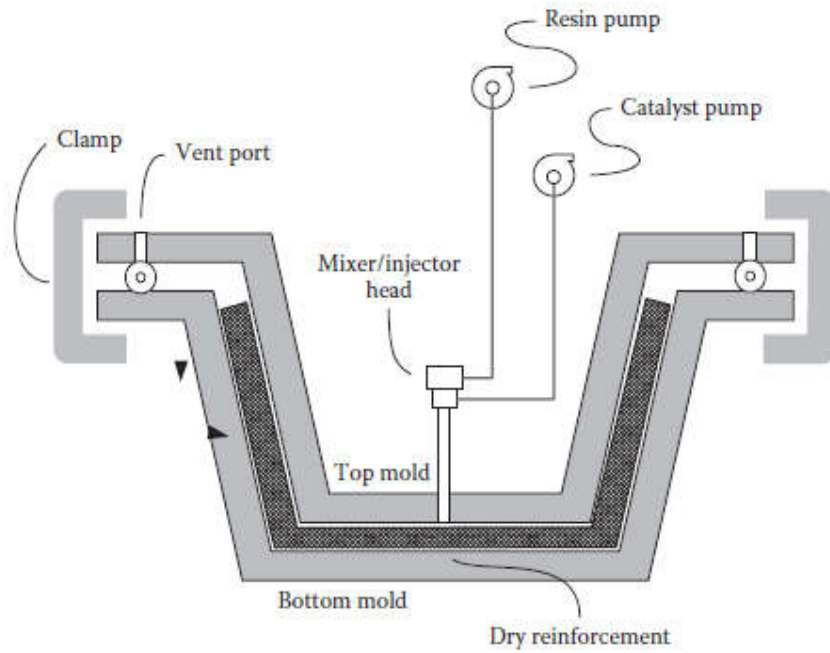
Components and stages of the pultrusion manufacturing process.



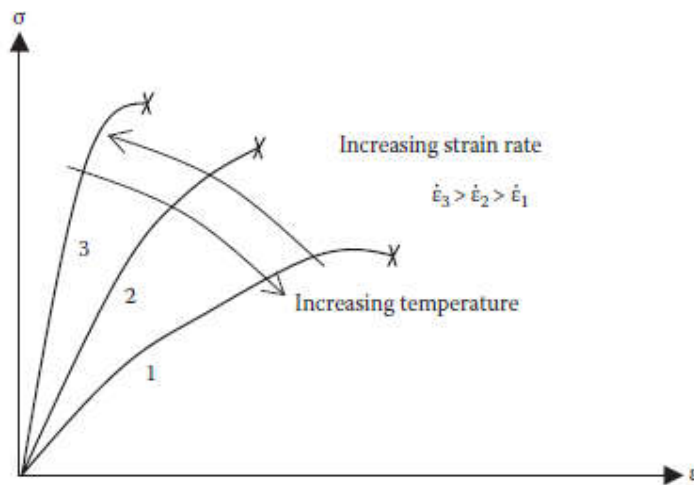
Schematic of the filament winding manufacturing process.



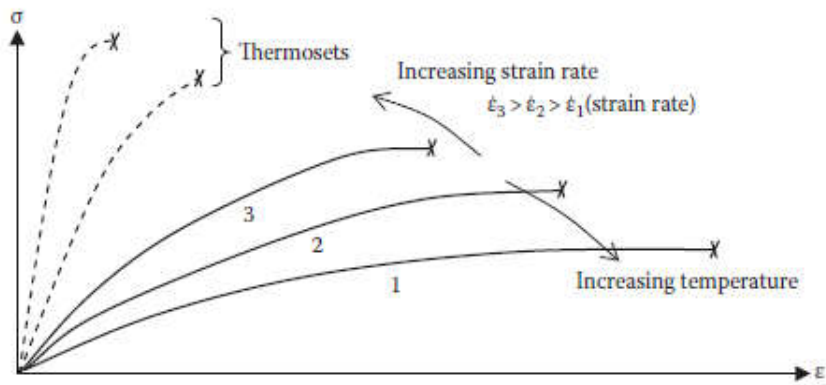
Logarithm of stiffness versus temperature for a thermoset matrix.



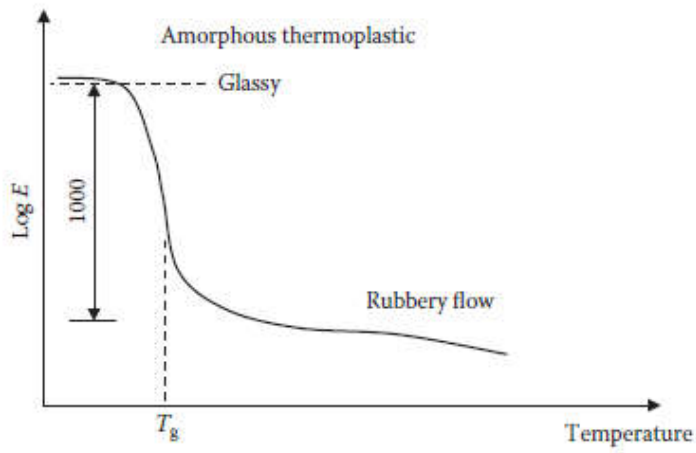
Components and representative configuration in the RTM process.



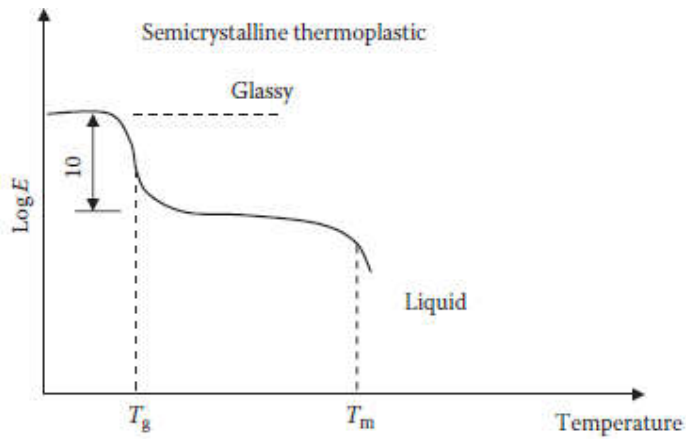
Load-rate- and temperature-dependent stress-strain behavior of thermoset matrices.



Load-rate- and temperature-dependent stress–strain behavior of thermoplastic matrices.



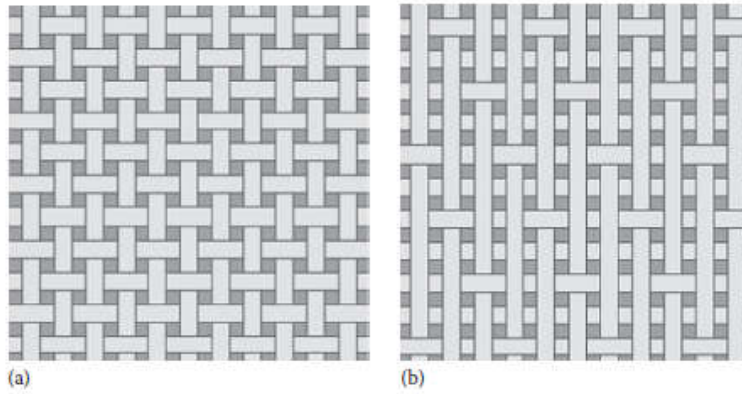
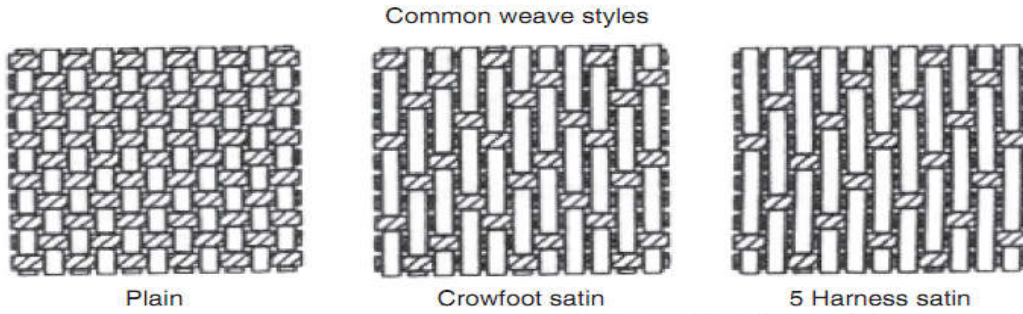
Logarithm of stiffness versus temperature for an amorphous thermoplastic matrix.



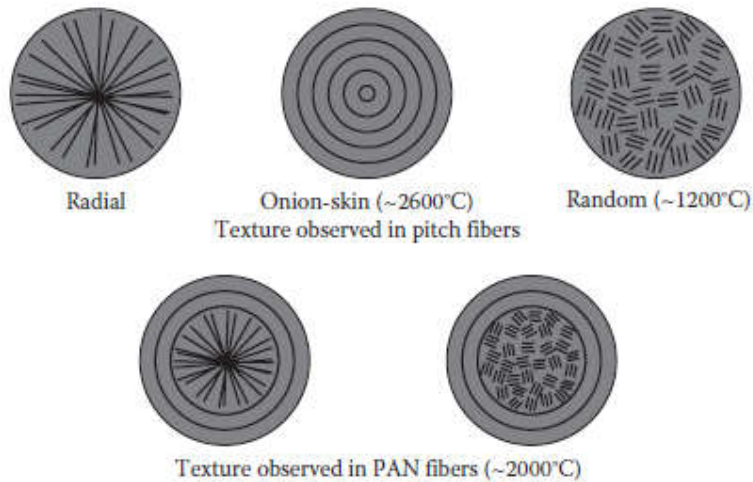
Logarithm of stiffness versus temperature for a semicrystalline thermoplastic matrix.



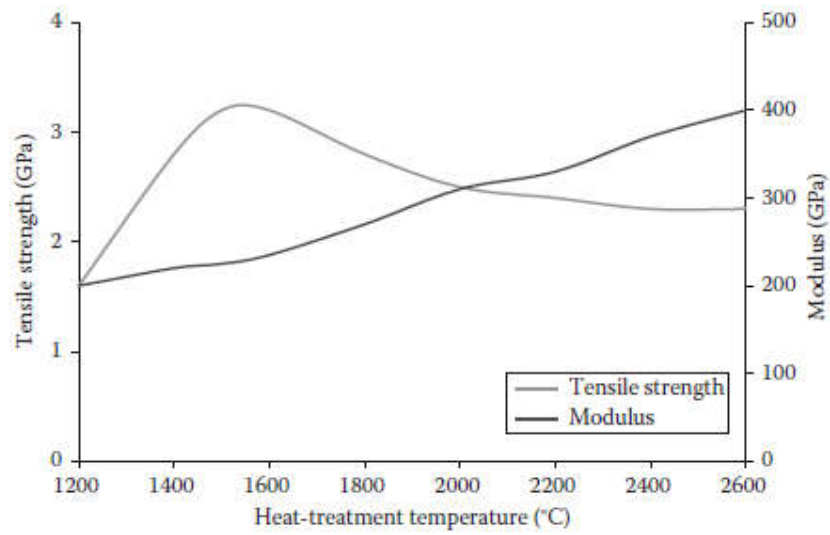
- Glass (silica,  $\text{SiO}_2$ ; calcium oxide,  $\text{CaO}$ ; etc.)
- Carbon (graphite, C)
- Kevlar<sup>®</sup>, Spectra<sup>®</sup> (organic, carbon based)
- Silicon carbide ( $\text{SiC}$ )
- Aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Boron (B)
- Beryllium (Be), which is highly toxic



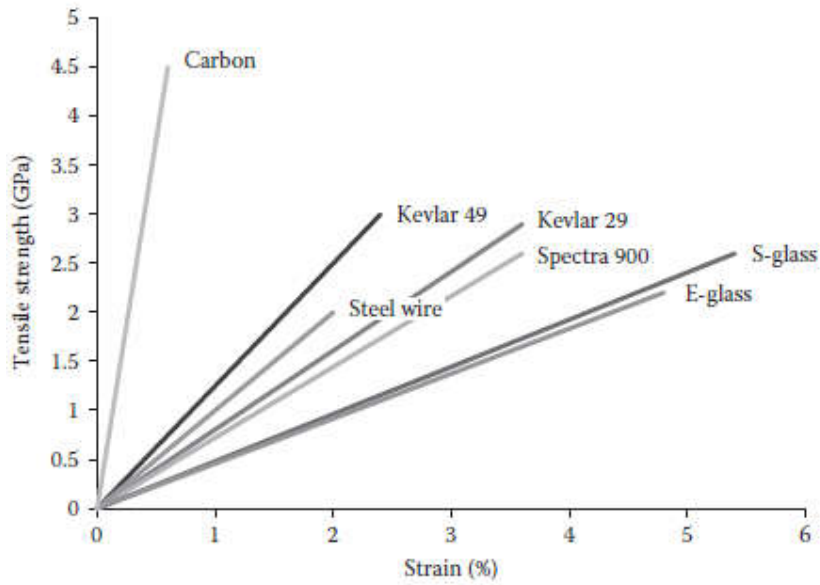
(a) Plain and (b) satin weaves.



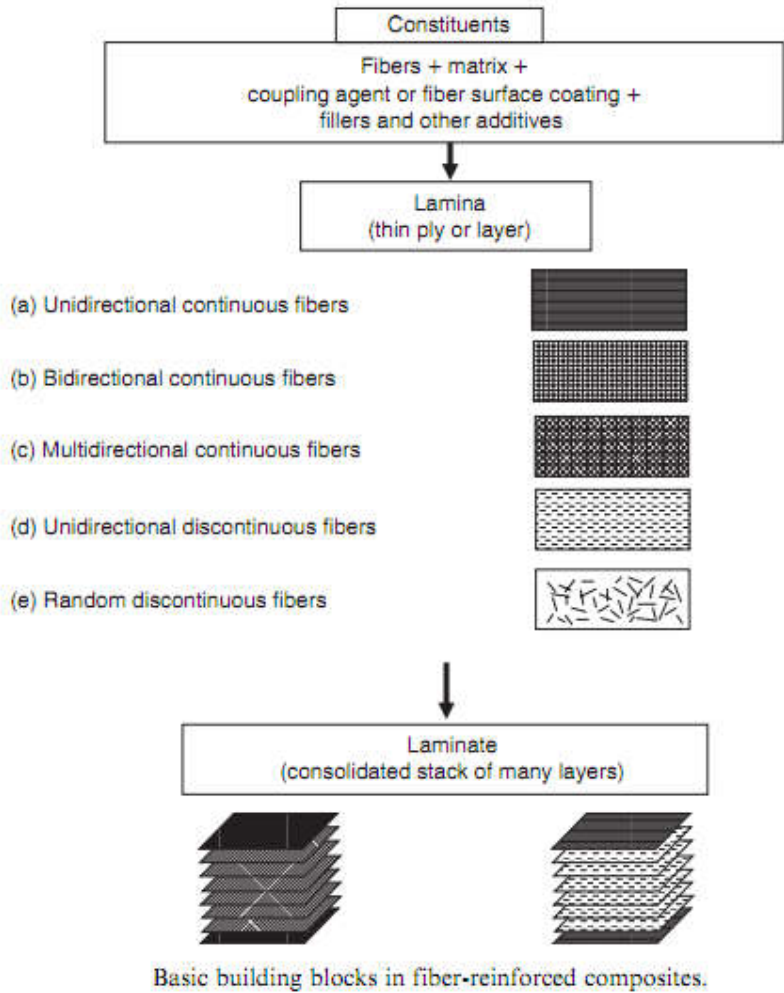
Cross-sectional structure of carbon fibers.



Heat-treatment effects on strength and stiffness of carbon fibers.

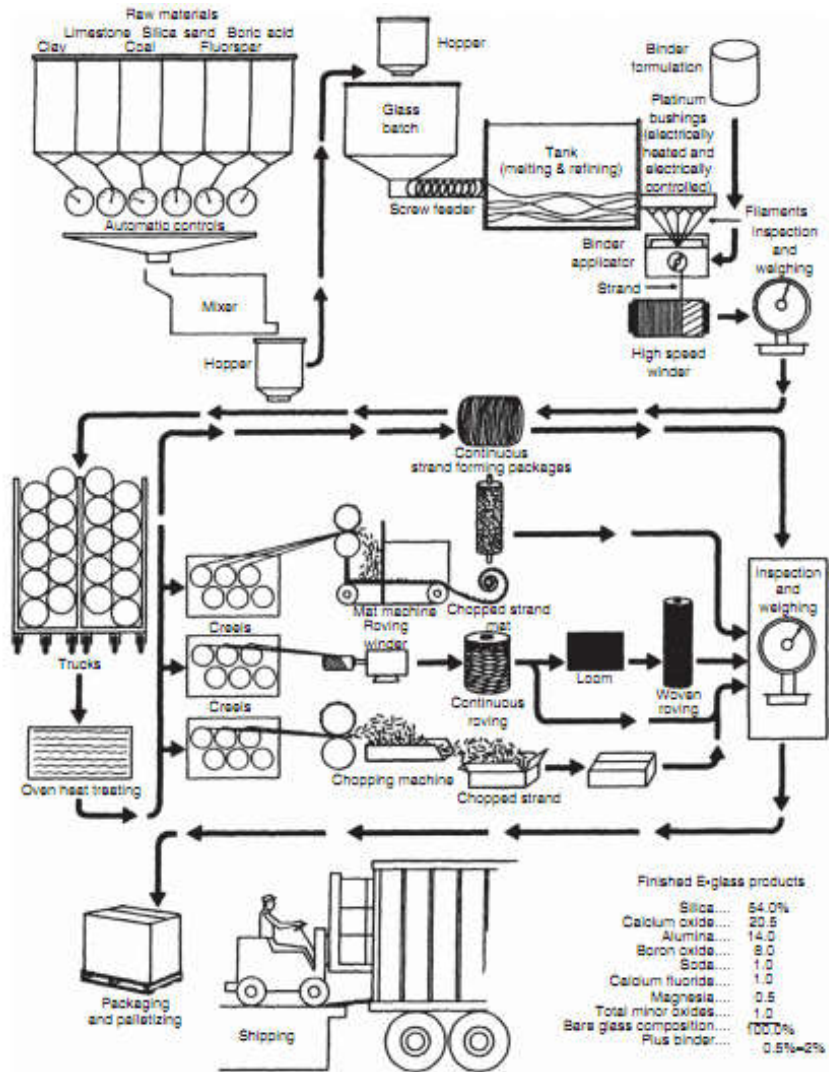


Stress-strain behavior of various fibers.

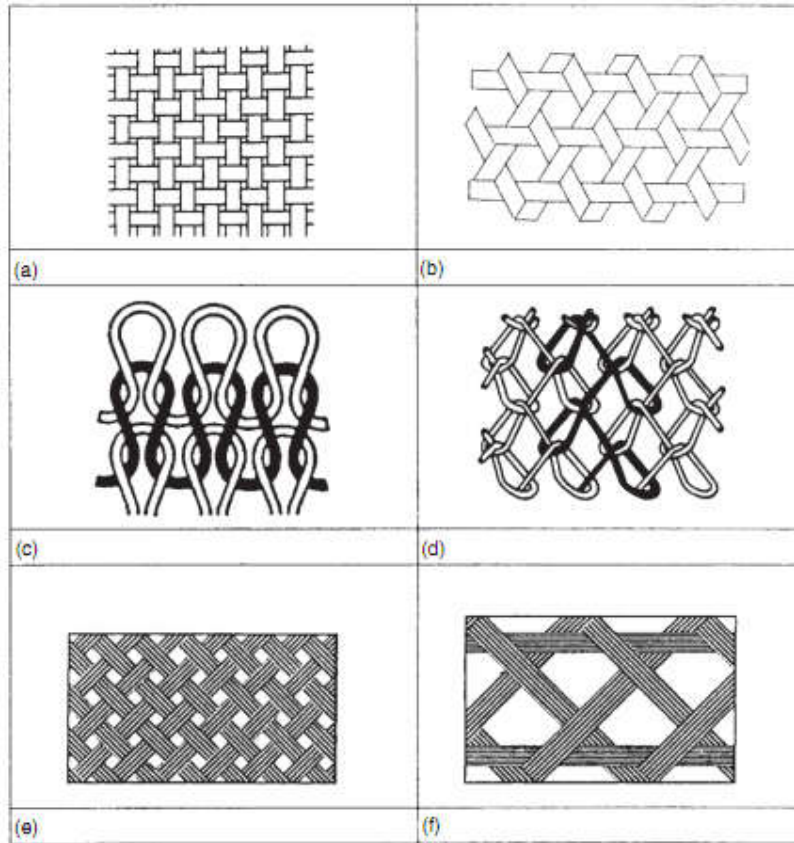


## FIBERS

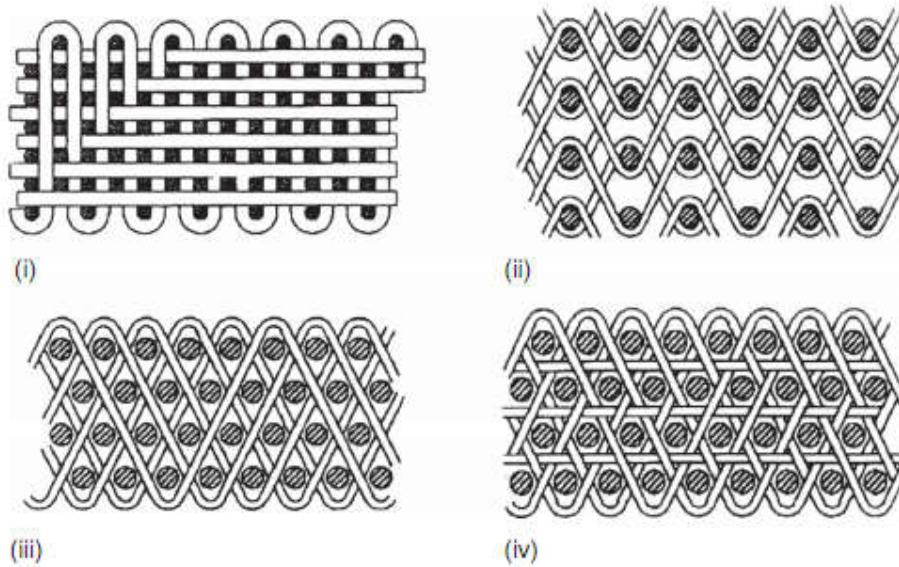
1. Density
2. Tensile strength and modulus
3. Compressive strength and modulus
4. Fatigue strength as well as fatigue failure mechanisms
5. Electrical and thermal conductivities
6. Cost



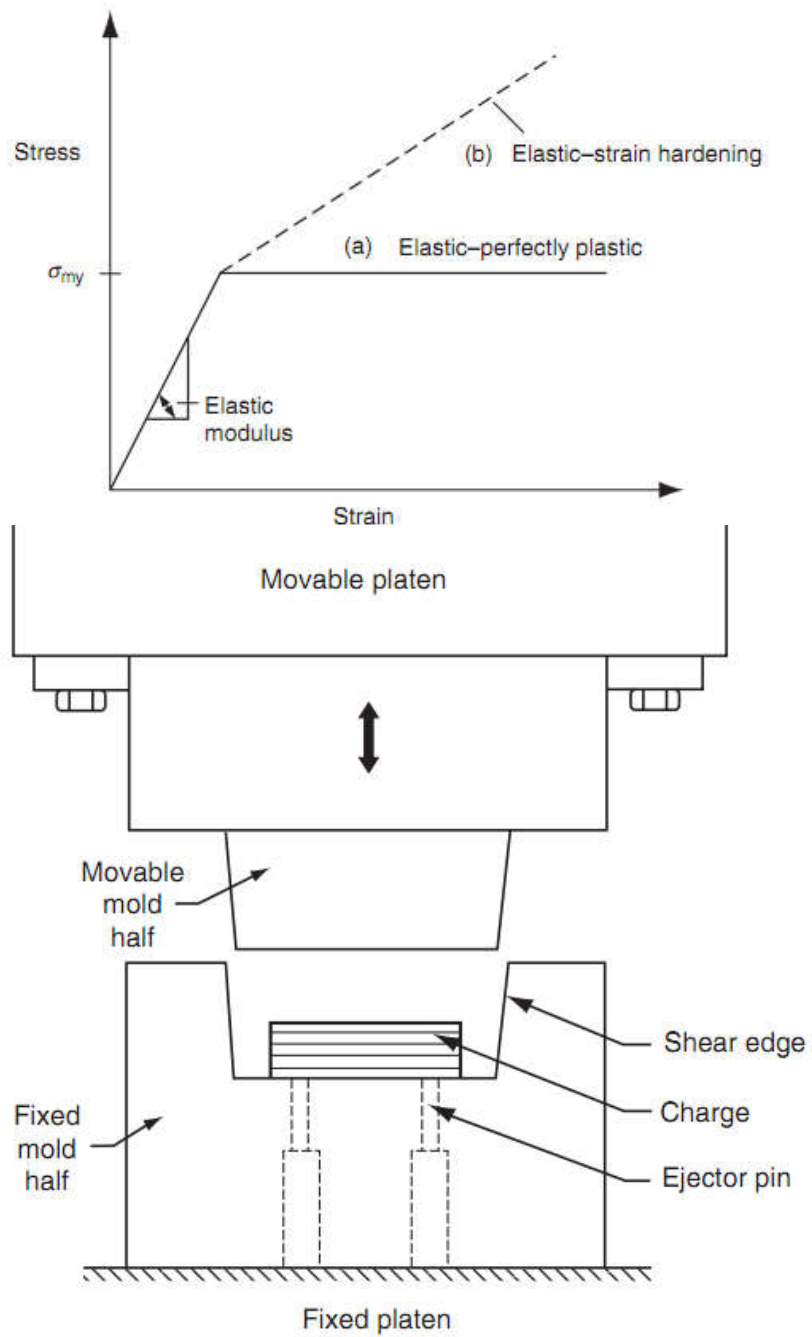
Flow diagram in glass fiber manufacturing.



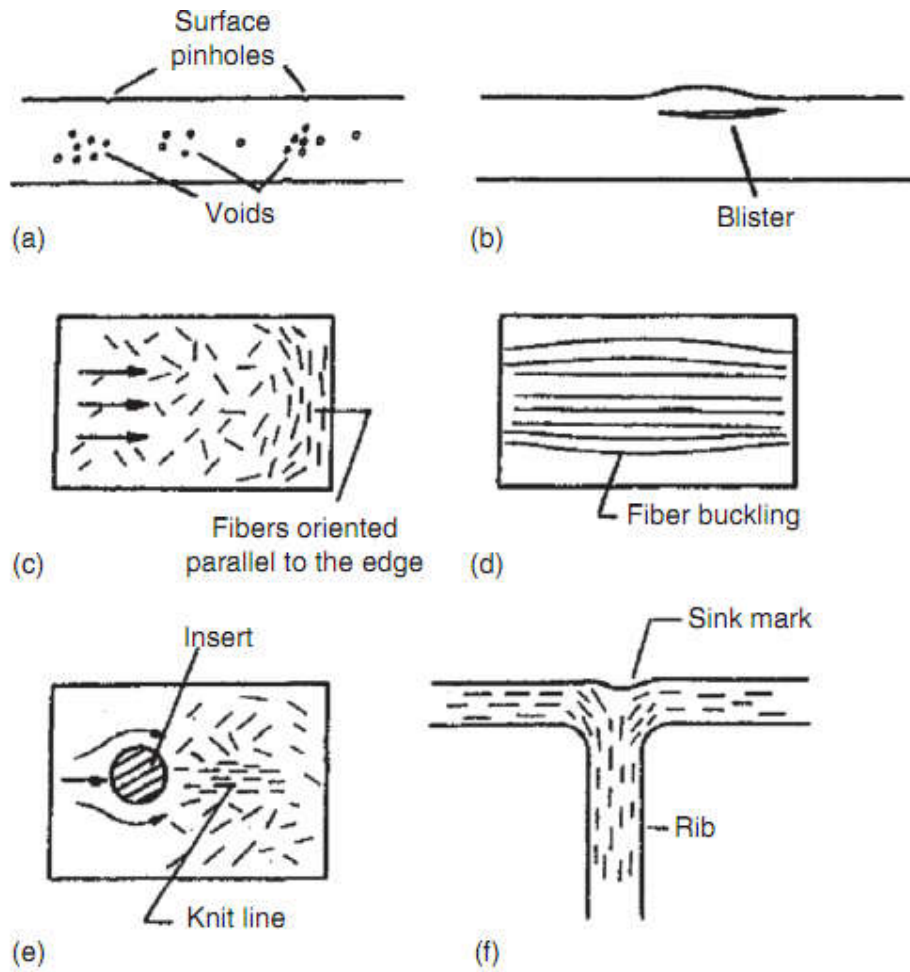
Two-dimensional fiber architectures with continuous fibers.



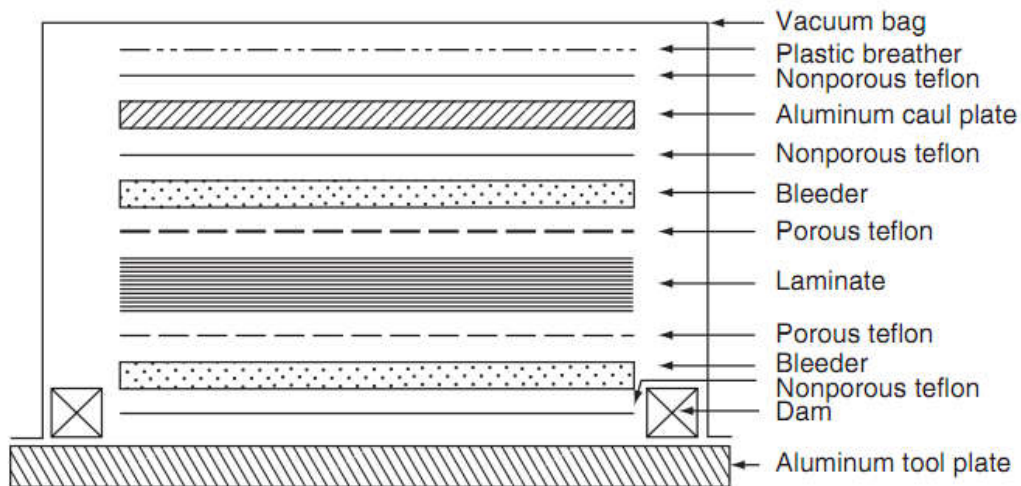
three-dimensional fiber architecture



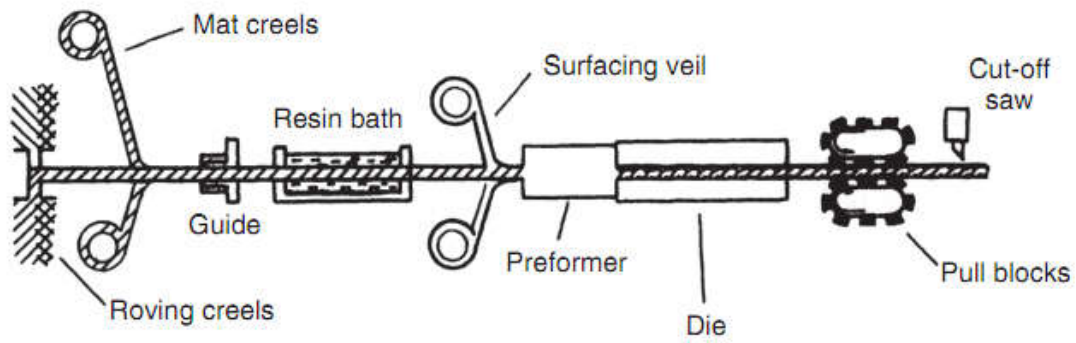
Schematic of a compression-molding process.



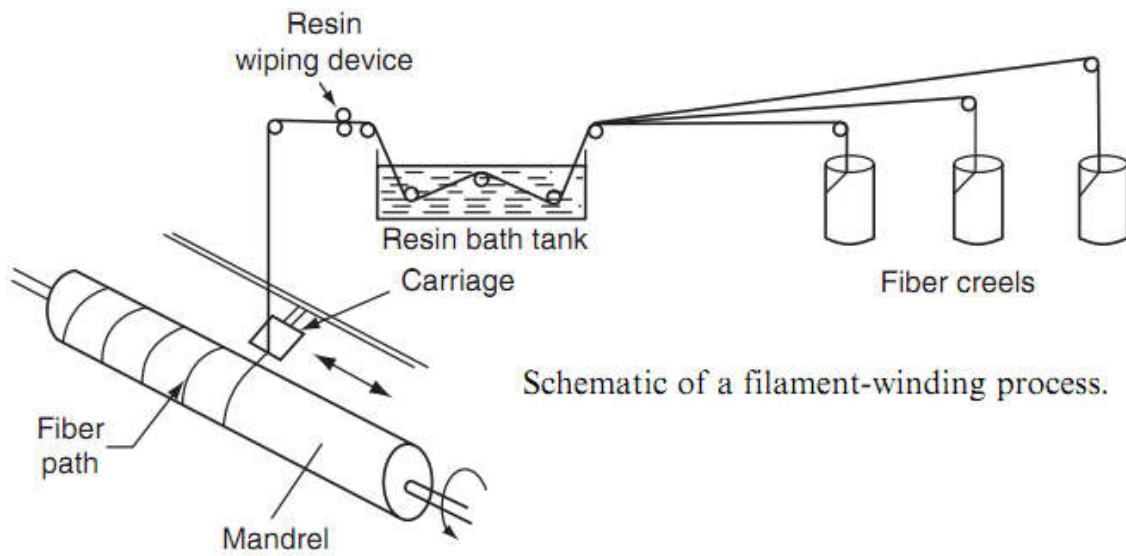
Various defects in a compression-molded SMC part.



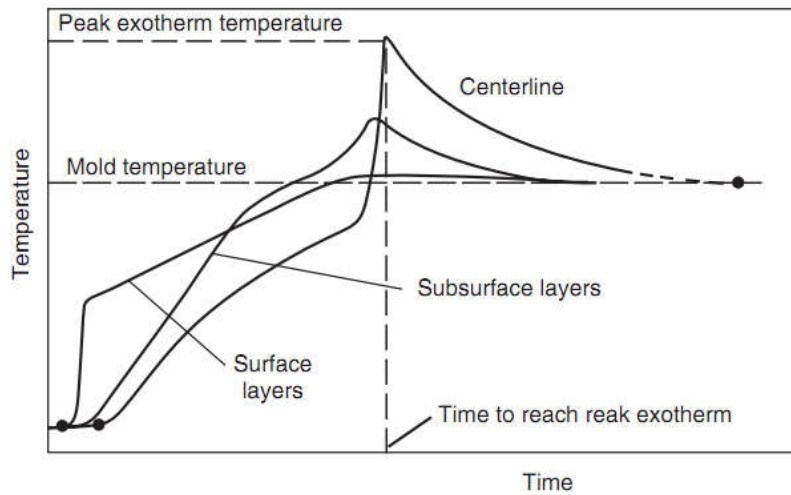
Schematic of a bag-molding process.



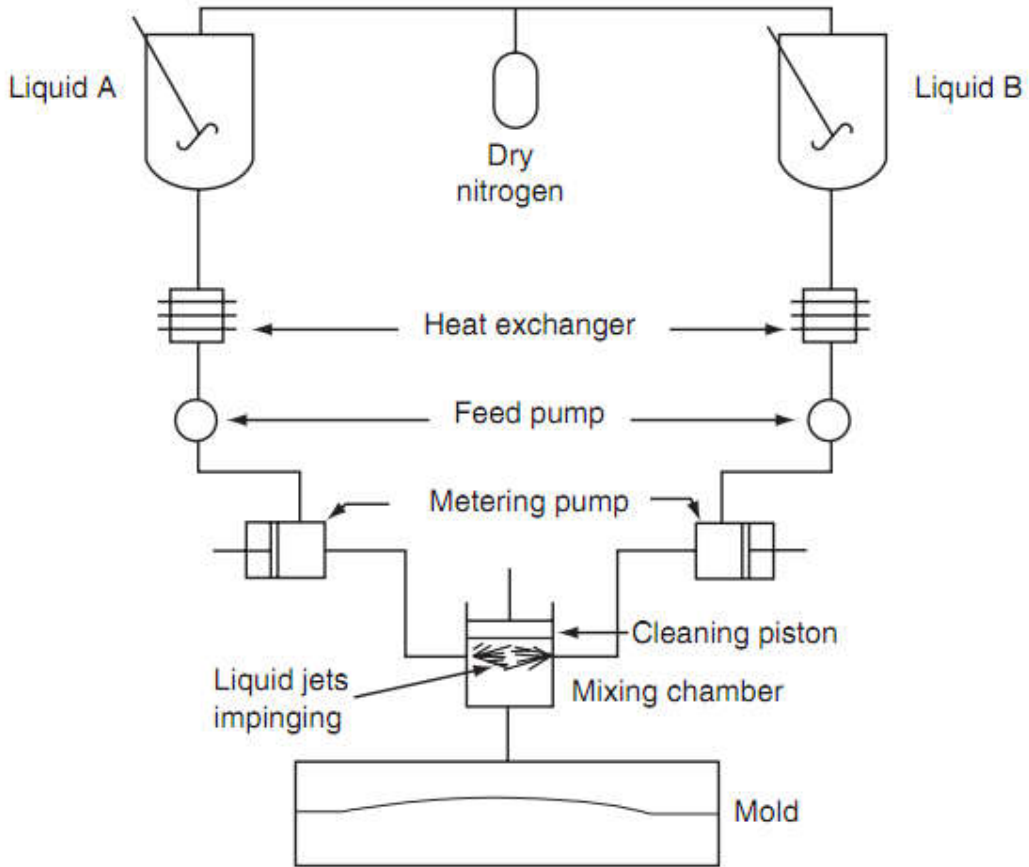
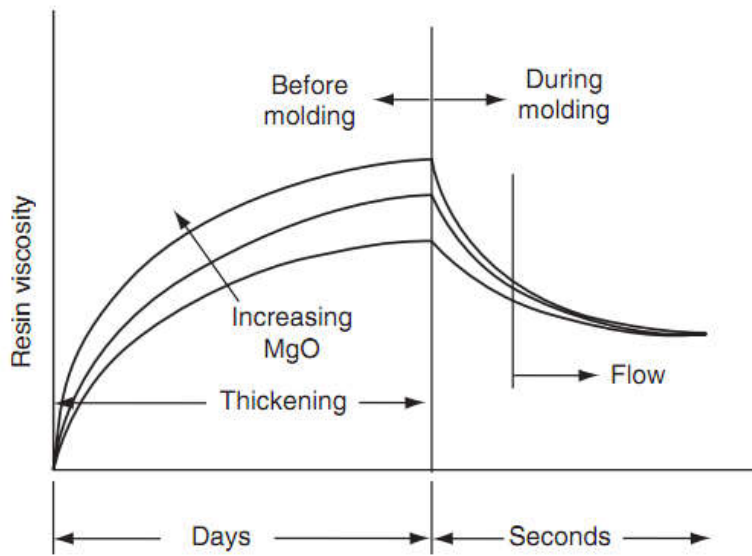
Schematic of a pultrusion process.



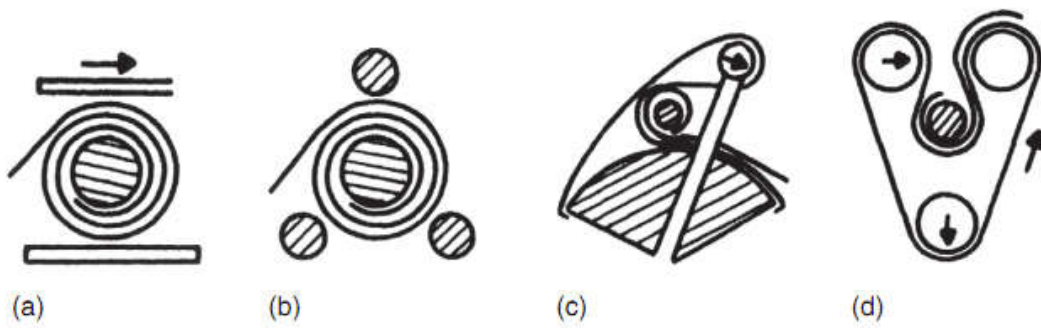
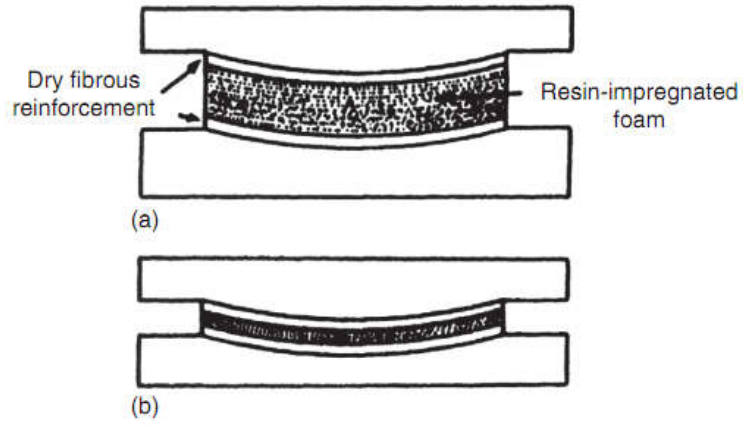
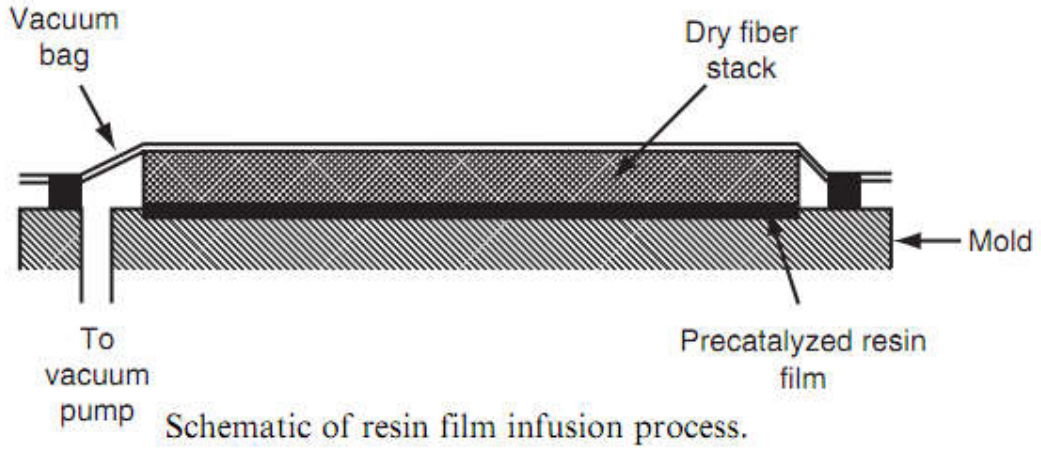
Schematic of a filament-winding process.

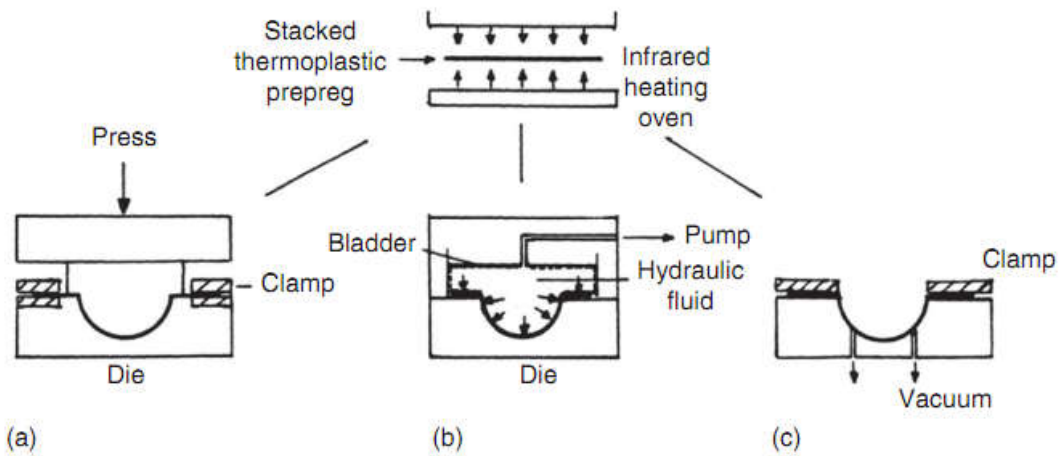




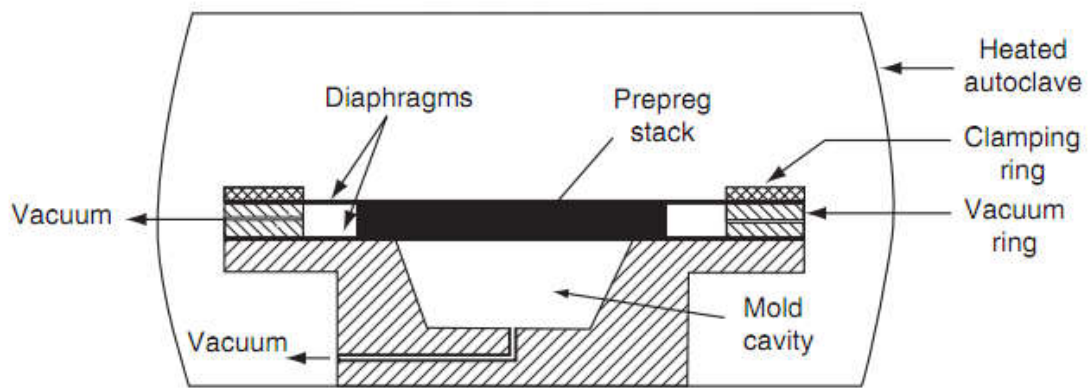


Schematic of SRIM process.

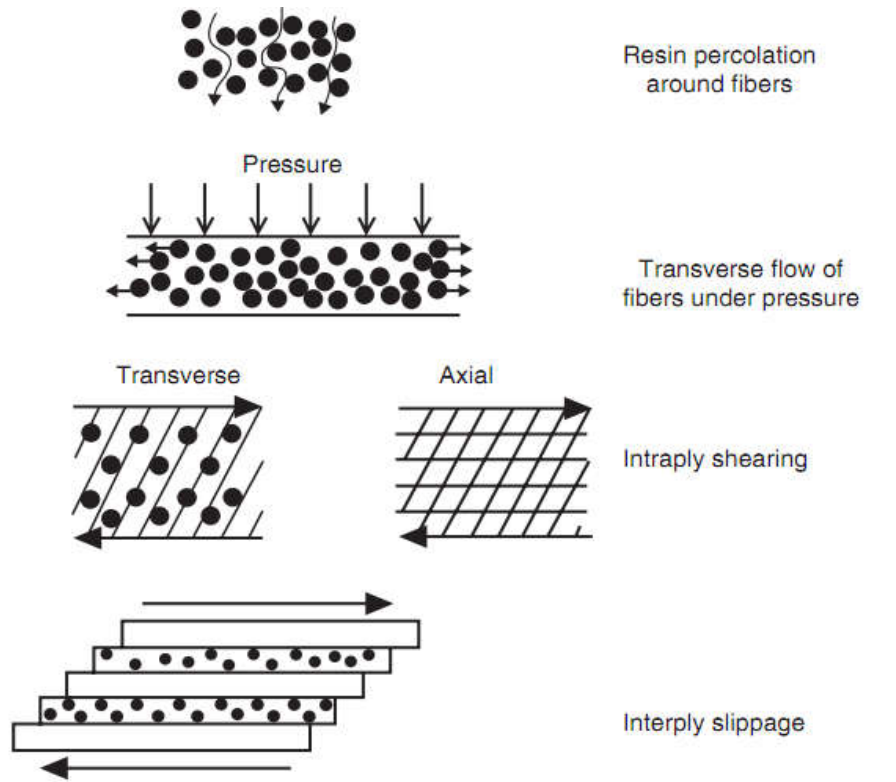




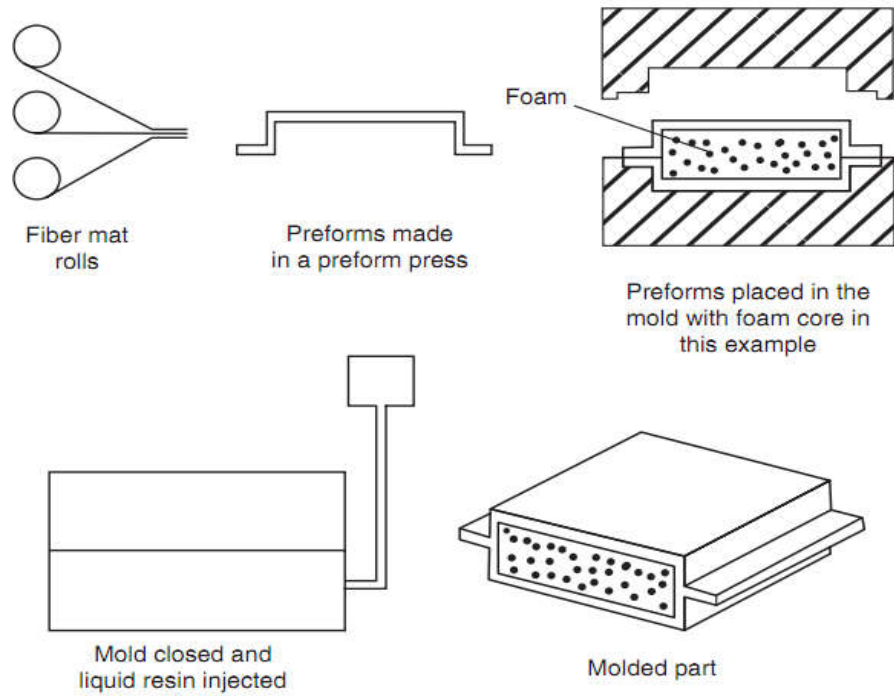
Forming methods for thermoplastic matrix composites: (a) matched die forming, (b) hydroforming, and (c) thermoforming.



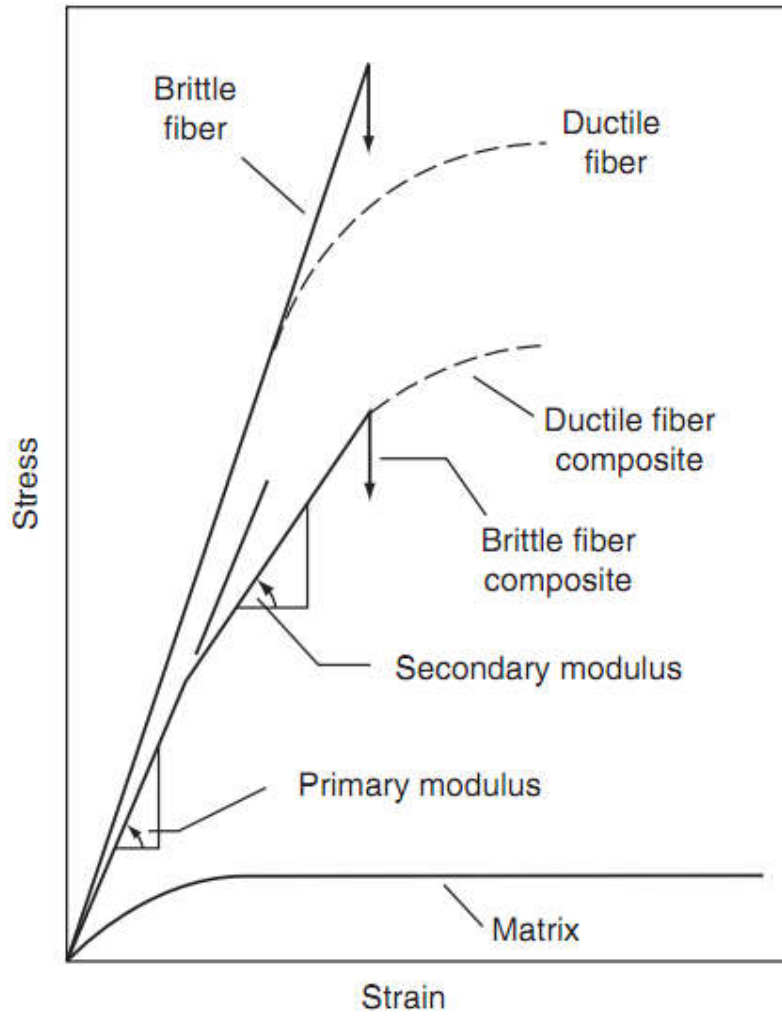
Schematic of diaphragm forming.

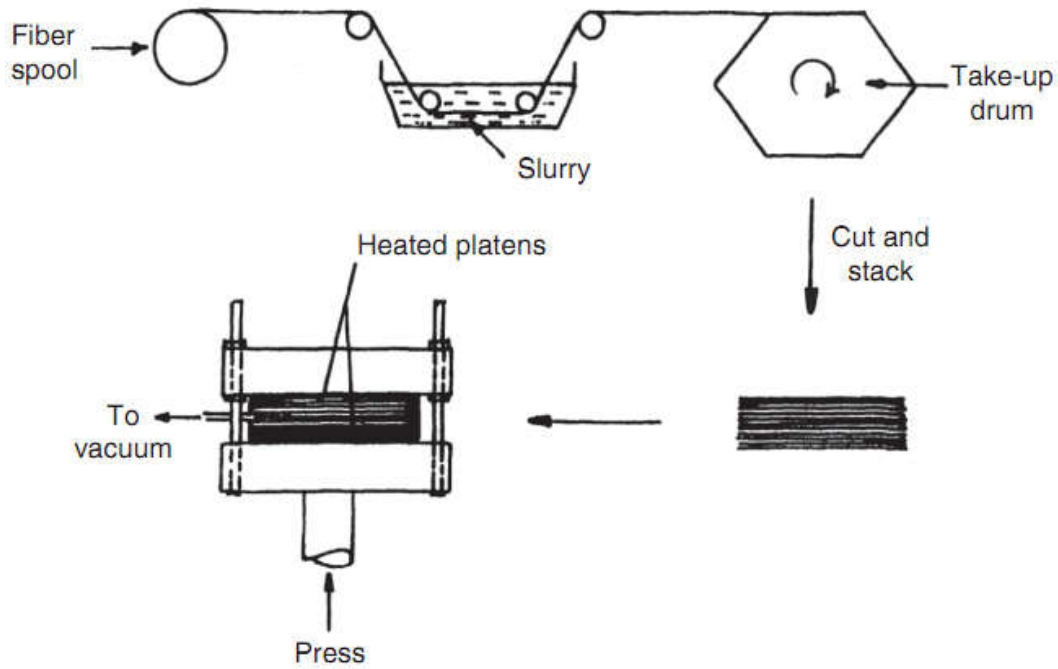


Basic mechanisms during forming of thermoplastic matrix composites.

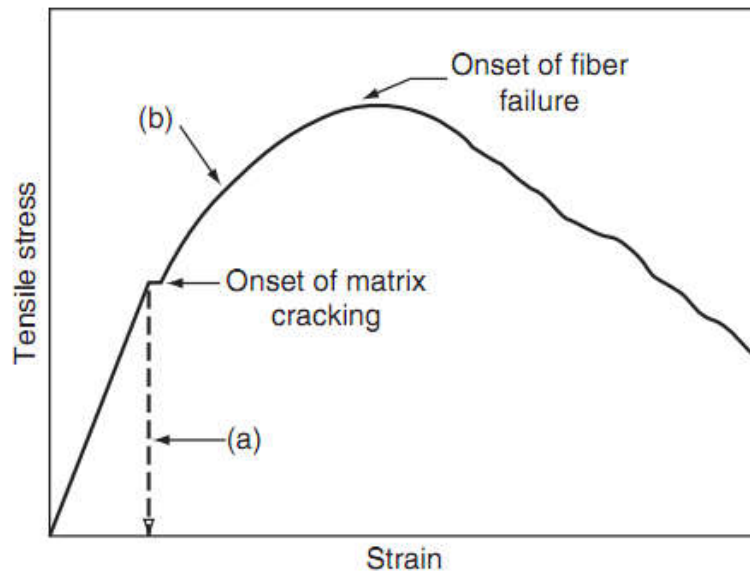


Schematic of RTM process.





Powder consolidation process for manufacturing CMC.



Schematic tensile stress-strain diagrams of ceramic matrix composites.

### Rehabilitation Structures with FRPs

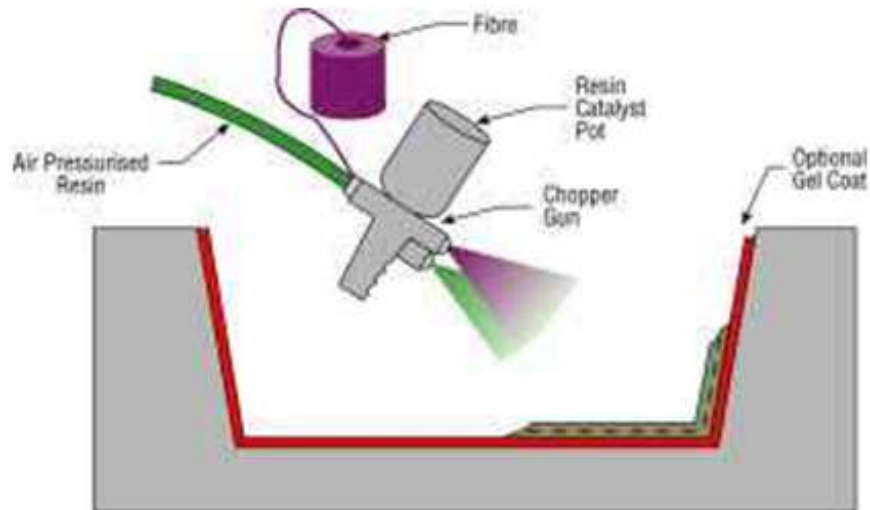
Iman Elyasian, Yazd University master of Structural Engineering  
 i.elyasian@gmail.com

A composite material is a combination of two or more different materials with a distinct interface between them. The most famous Advanced Composite Materials (ACM) in civil engineering applications is Fiber Reinforced Polymers (FRPs), that is defined as a polymer matrix, whether thermosetting (Polyester, Vinyl ester and Epoxy) or thermoplastic (Nylon) reinforced with fibers (Aramid, Carbon and Glass). These materials are superior than steel when it comes to comparing the high strength, strength-to-weight ratio (Light weight), Directional strength, Dimensional stability, ease of handling, fatigue resistance, the resistance to electrochemical corrosion, Low thermal conductivity, Low coefficient of thermal expansion, Radar transparency, Non-magnetic, High impact strength, Low maintenance, Long term durability and availability in various lengths or shapes. The FRP has the disadvantages of the loss of properties at high temperatures, as in the case of fire and the damage from Ultra-Violet light.

### **Manufacturing (Production Methods)**

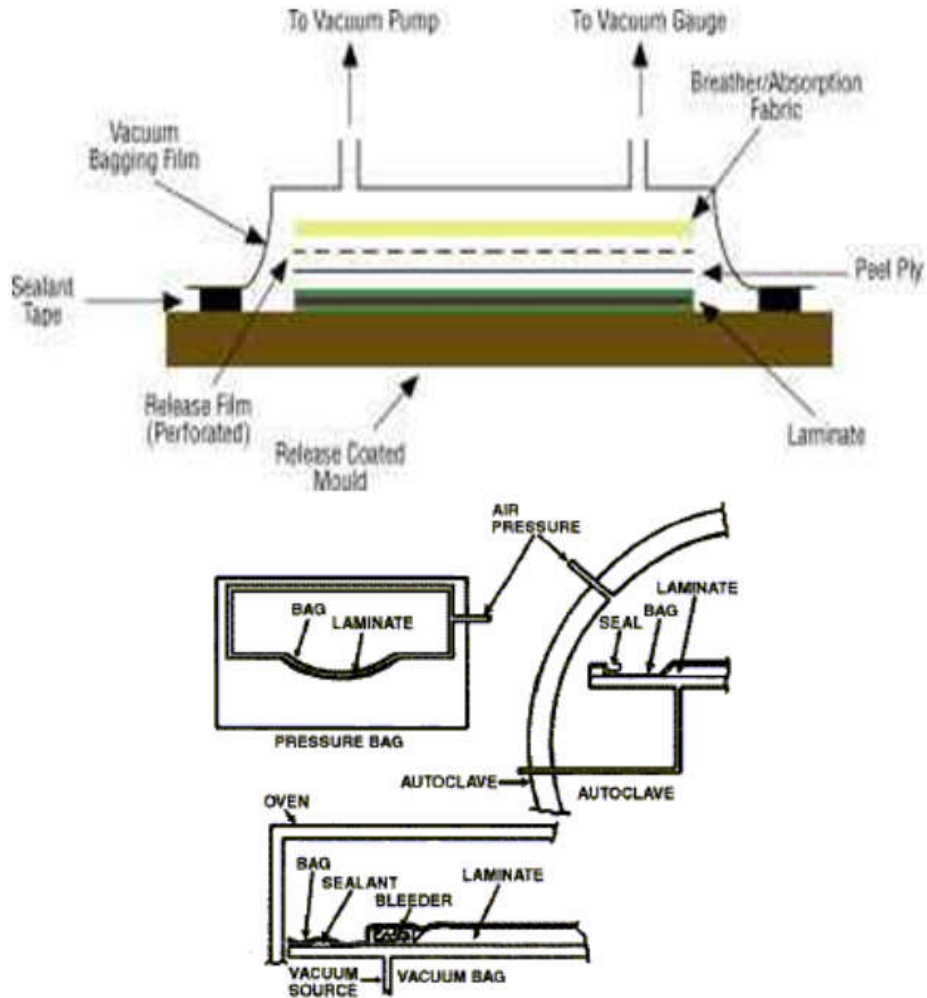
#### **1- Spray Lay-up Method**

Fiber is chopped in a hand-held gun and fed into a spray of catalyzed resin directed at the mould. The deposited materials are left to cure under standard atmospheric conditions.



#### **2-Vacuum Bagging Method**

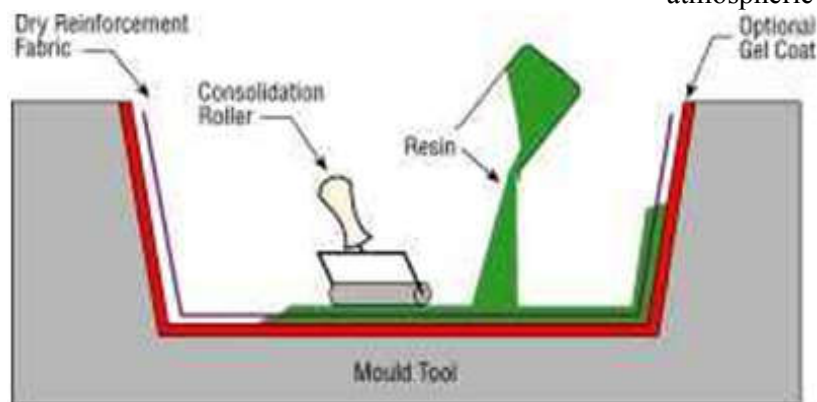
This is basically an extension of the wet lay-up process described above where pressure is applied to the laminate once laid-up in order to improve its consolidation. This is achieved by sealing a plastic film over the wet laid-up laminate and onto the tool. The air under the bag is extracted by a vacuum pump and thus up to one atmosphere of pressure can be applied to the laminate to consolidate it.



*Vacuum compaction processing [Schwarz (1992f)]*

### 3-Wet/Hand Lay-Up

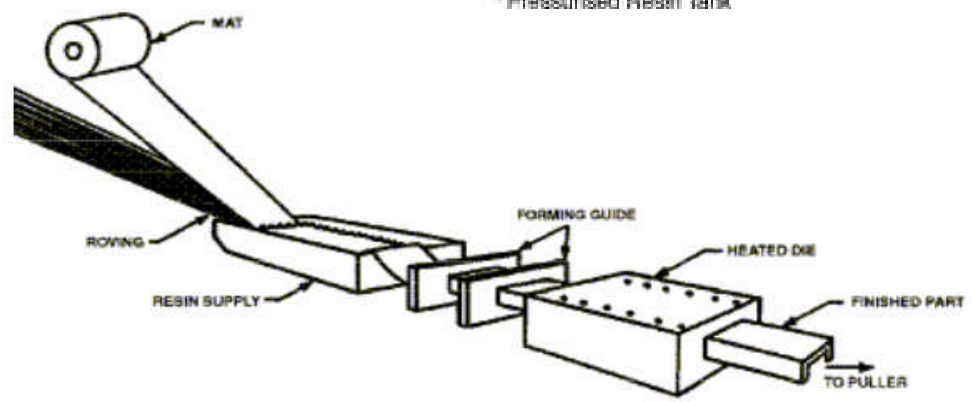
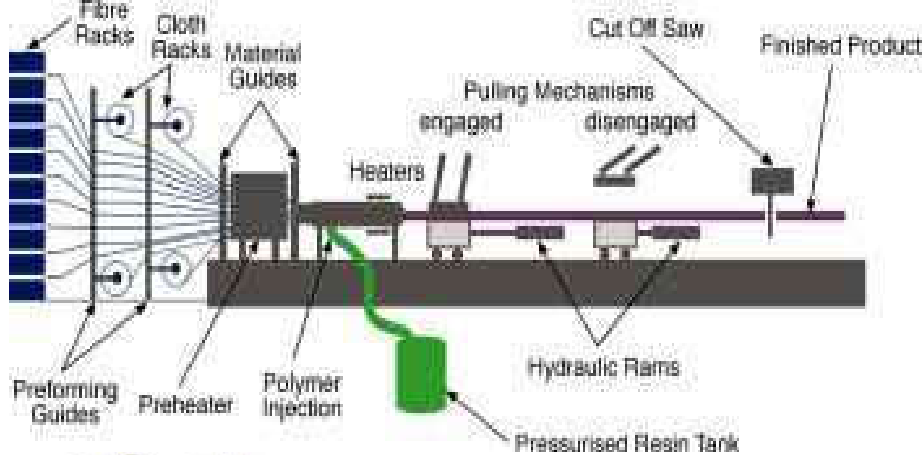
Resins are impregnated by hand into fibres which are in the form of woven, knitted, stitched or bonded fabrics. This is usually accomplished by rollers or brushes, with an increasing use of nip-roller type impregnators for forcing resin into the fabrics by means of rotating rollers and a bath of resin. Laminates are left to cure under standard atmospheric conditions



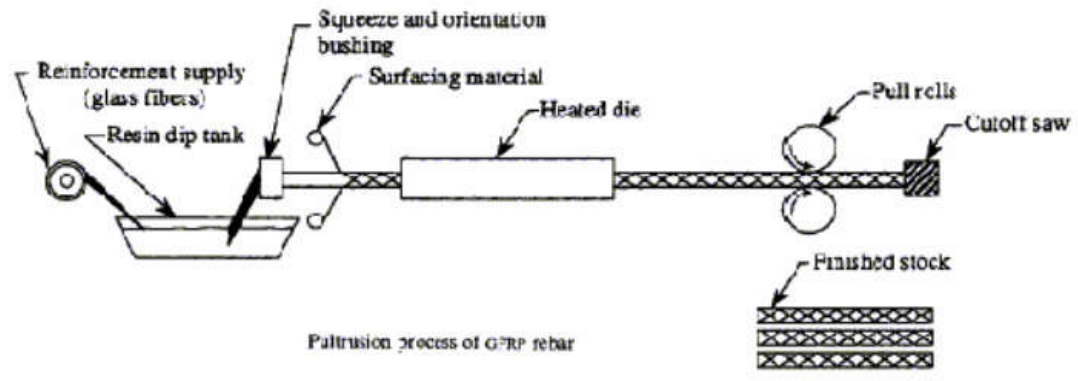


#### 4-Pultrusion Method

Fibers are pulled from a creel through a resin bath and then on through a heated die. The die completes the impregnation of the fiber, controls the resin content and cures the material into its final shape as it passes through the die. This cured profile is then automatically cut to length. Fabrics may also be introduced into the die to provide fibre direction other than at 0°. Although pultrusion is a continuous process, producing a profile of constant cross-section, a variant known as 'pulforming' allows for some variation to be introduced into the cross-section. The process pulls the materials through the die for impregnation, and then clamps them in a mould for curing. This makes the process non-continuous, but accommodating of small changes in cross-section.



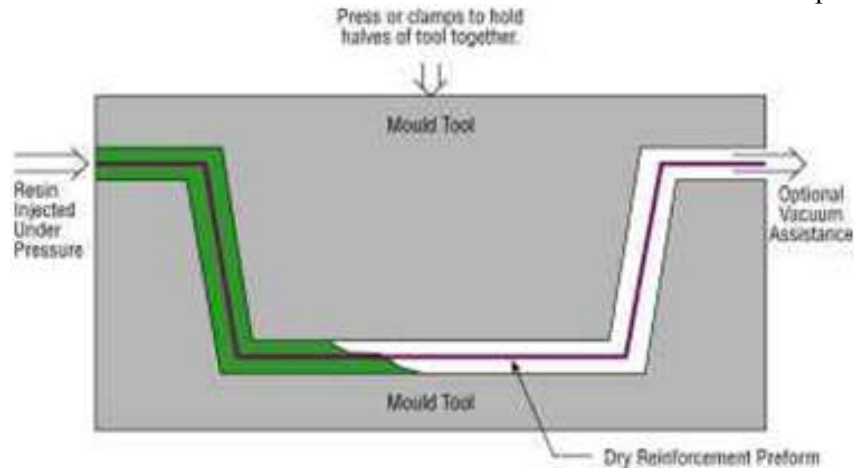
*Pultrusion process [Creative Pultrusions, Inc. (1994)]*



*Pultrusion process of GFRP rebar*

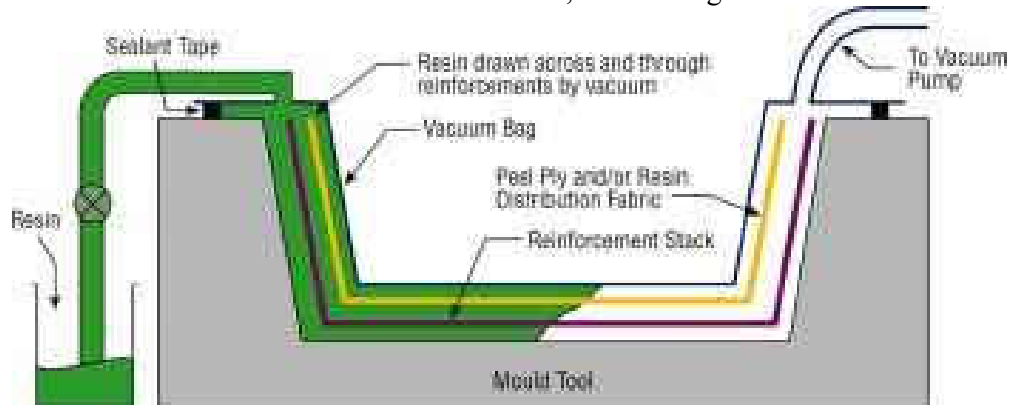
### 5- Resin Transfer

Fabrics are laid up as a dry stack of materials. These fabrics are sometimes pressed to the mould shape, and held together by a binder. These 'preforms' are then more easily laid into the mould tool. A second mould tool is then clamped over the first, and resin is injected into the cavity. Vacuum can also be applied to the mould cavity to assist resin in being drawn into the fabrics. This is known as Vacuum Assisted Resin Injection (VARI). Once all the fabric is wet out, the resin inlets are closed, and the laminate is allowed to cure. Both injection and cure can take place at either ambient or elevated temperature.

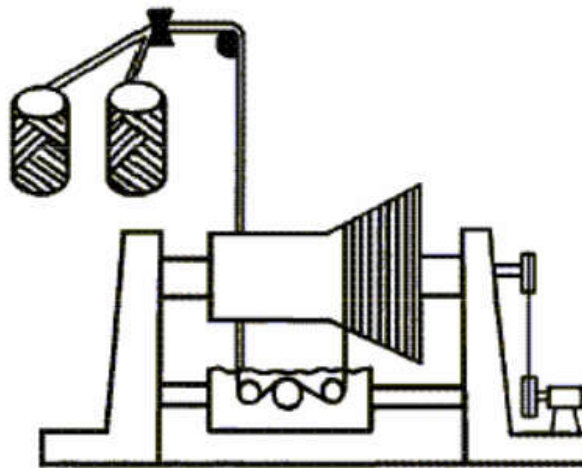


### 6-Infusion Process Method

In other infusion processes (SCRIMP, RIFT, VARTM), fabrics are laid up as a dry stack of materials as in RTM. The fiber stack is then covered with peel ply and a knitted type of non-structural fabric. The whole dry stack is then vacuum bagged, and once bag leaks have been eliminated, resin is allowed to flow into the laminate. The resin distribution over the whole laminate is aided by resin flowing easily through the non-structural fabric, and wetting the fabric out from above.



### 7-Filament Winding



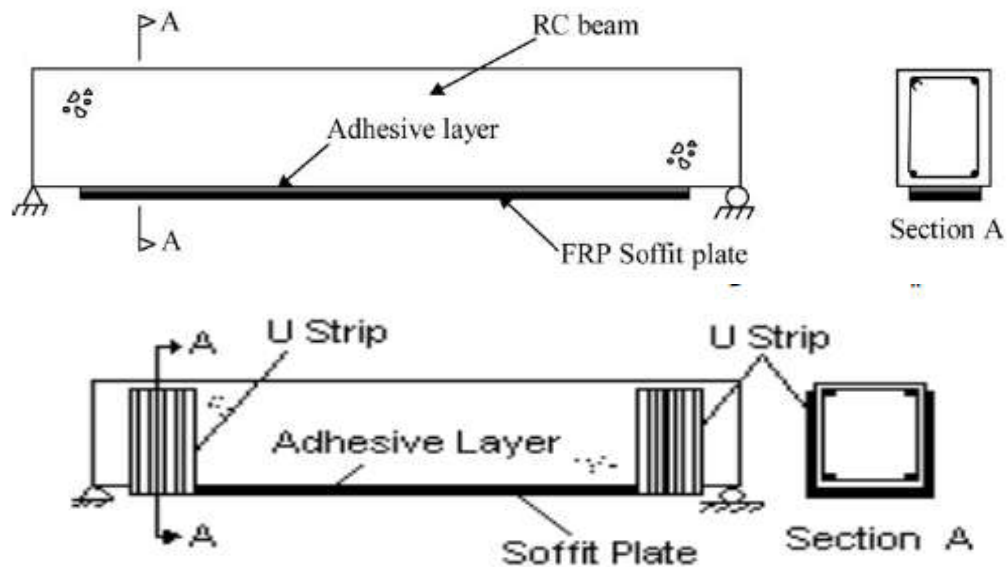
*Filament winding process [Mettes (1969e)]*

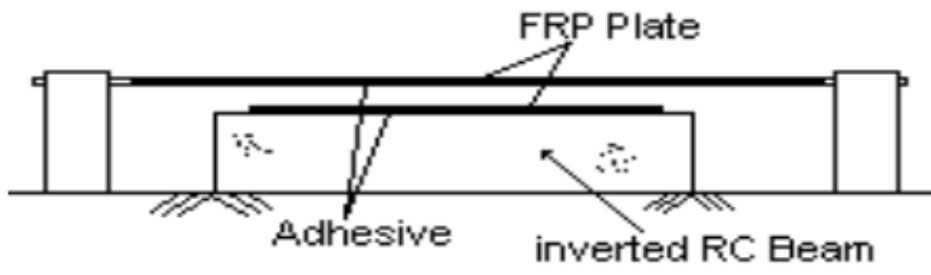
### Installation steps

- 1-Pre-installation
- 2-Surface Preparation
- 3-Saturator Setup
- 4-Application of FRP Primer
- 5- Application of Filler / Adhesive
- 6- Application of Pre-Saturated FRP Reinforcement
- 7- Installation of Anchors

### Flexural Strengthening

The flexural strength of a reinforced concrete (RC) beam can be increased by bonding a fibre reinforced polymer (FRP) plate, FRP laminates or sheets to the tension face, or to the soffit in the more restricted but commonly considered case of simply supported beams

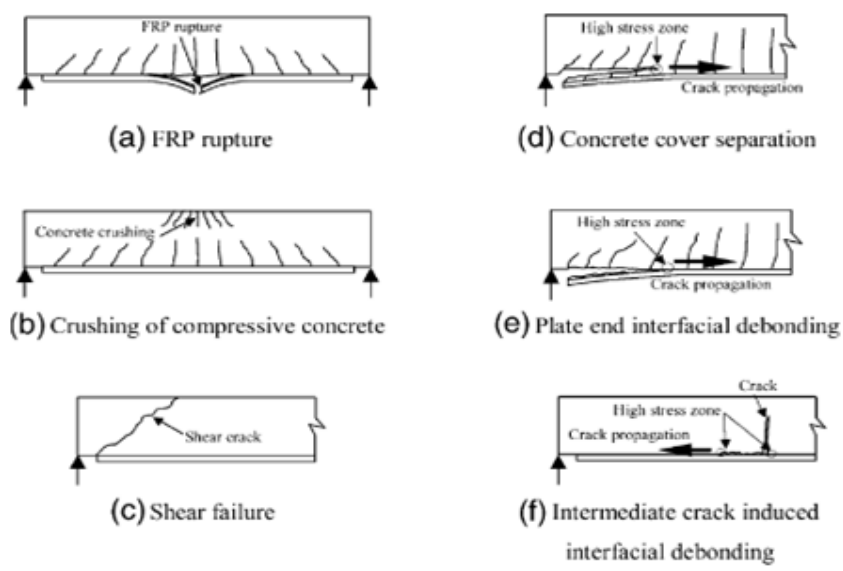




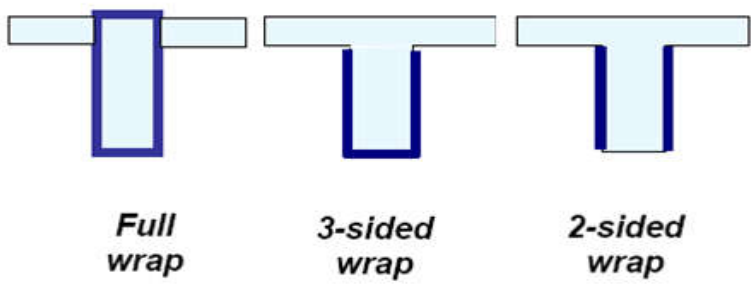
**Failure modes in bending**

Crushing of the concrete in compression before yielding of the reinforcing steel;

- Yielding of the steel in tension followed by rupture of the FRP laminate;
- Yielding of the steel in tension followed by concrete crushing;
- Shear/tension delamination of the concrete cover (cover delamination); and
- Debonding of the FRP from the concrete substrate (FRP debonding).



Failure modes of FRP-strengthened RC beams. (a) FRP rupture; (b) Crushing of compressive concrete; (c) Shear failure; (d) Concrete cover separation; (e) Plate end interfacial debonding; (f) Intermediate crack induced interfacial debonding.



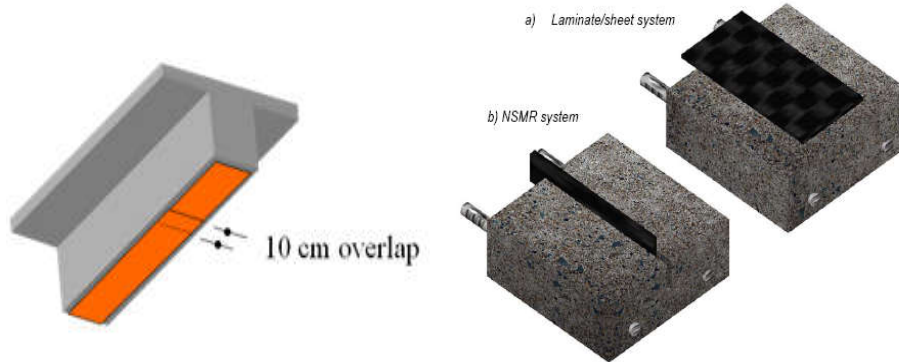
**Shear strengthening**

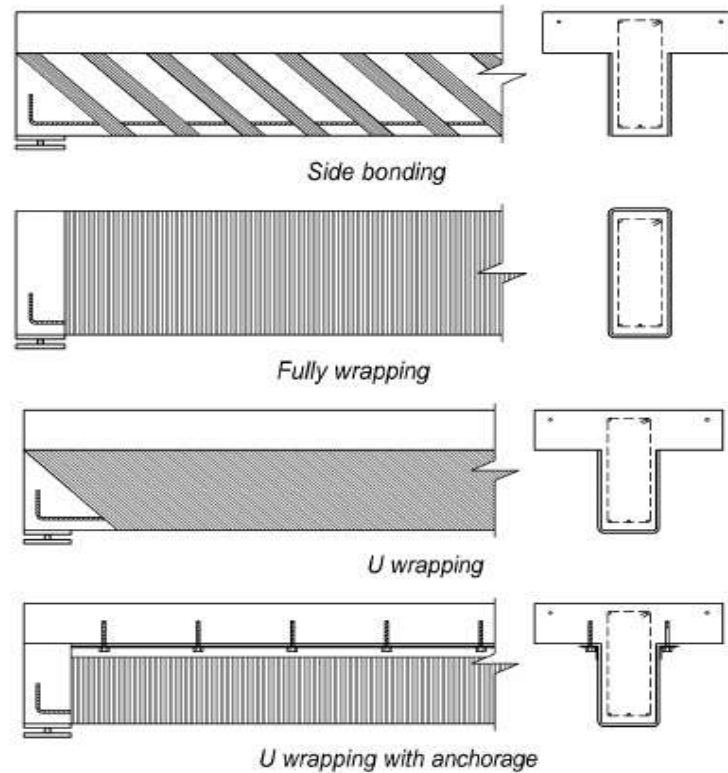
Externally bonded FRP sheets can be used to increase the shear strength of reinforced concrete beams and columns. The shear strength of columns can be improved by wrapping with a continuous sheet of FRP to form a complete ring around the member.

Shear failure of reinforced concrete beams is a complicated mechanism depending on the combination of different effects. The stresses in the shear span of a beam are usually developed in inclined critical planes. Depending on the amount of shear reinforcement, steel reinforcement, concrete strength, aggregate size, dowel effect, and position of loading the shear plane of failure may be generated between 30-60°.

- Shear failure of the web
- Bending – Shear failure
- Compressive failure in the web

The fully wrapped configuration is the safest since the failure is controlled by fibre rupture. side bonded configuration is the most exposed to debonding failure due to its limited anchorage length. Probably the most used configuration is the U wrapped system





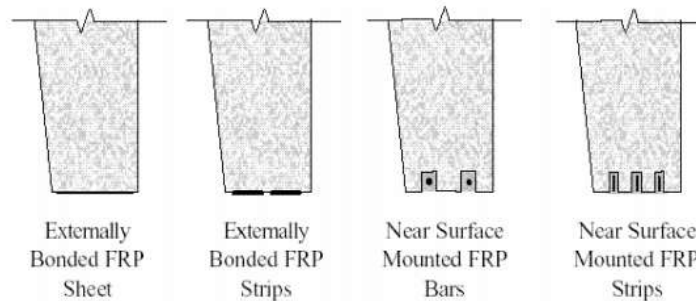
**FRP STRENGTHENING AND REPAIR SYSTEMS**

a- Externally Bonded Systems

FRP SHEETS AND LAMINATES- Dry & Wet Lay-Up Systems

b- Near Surface Mounted Systems (N.S.M.)

The NSMR system consists of adhesive and rods. The adhesive used may be of two types epoxy or high quality cement grout. The rods can have different section configurations, and the most commonly used are the rectangular and round sections. The cross sectional area of the bars is about 100-300 mm<sup>2</sup> and the length is limited to 200 m. The main characteristic of this system is the positioning of the rod inside a sawed slot. A very important factor for the NSMR system is the quality and thickness of the concrete cover



c- Pre-cured Pre-impregnate FRP laminated strips

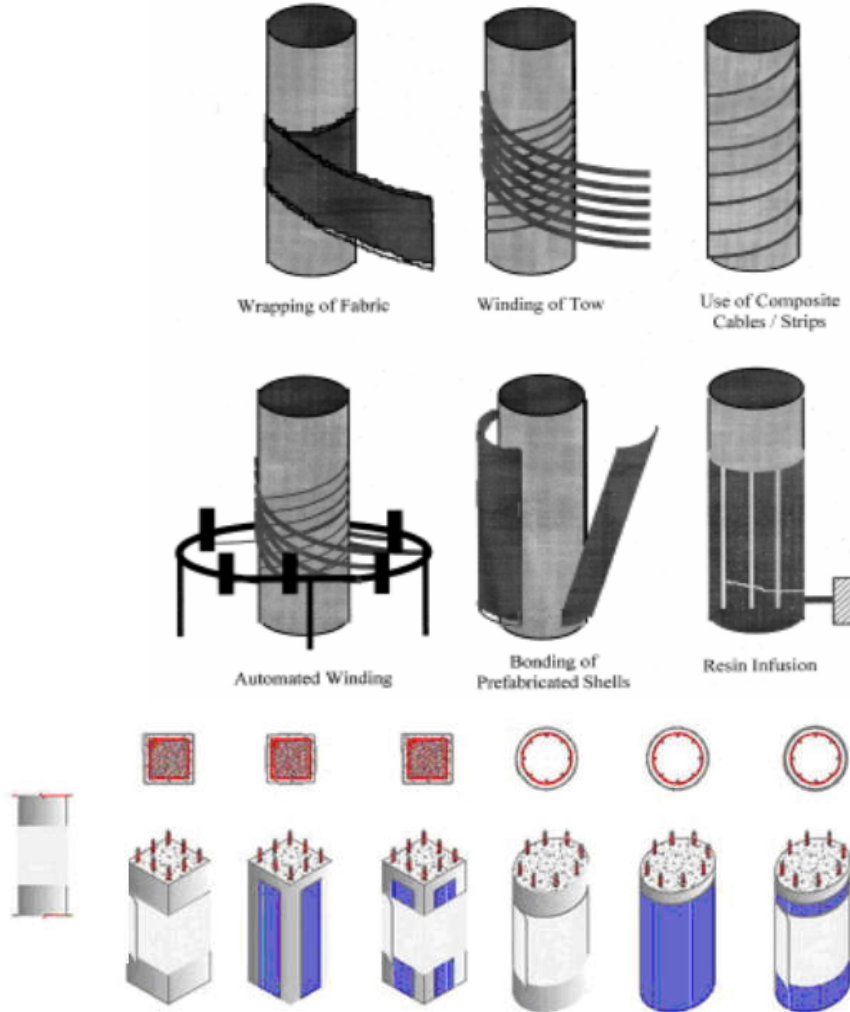
d- PREFABRICATED ELEMENTS

e- Automated Wrapping

f- Prestressed FRP System

- g- - In-Situ Fast Curing Using Heating Device
- h- f- FRP Impregnation by Vacuum

### Types of Strengthening with FRPs



**Column Strengthening-** Reinforced Concrete columns or bridge piers can be efficiently strengthened with Glass FRP (GFRP) or Carbon FRP (CFRP)- Glass FRP and Carbon FRP can provide significant lateral confinement for concrete columns or bridge piers

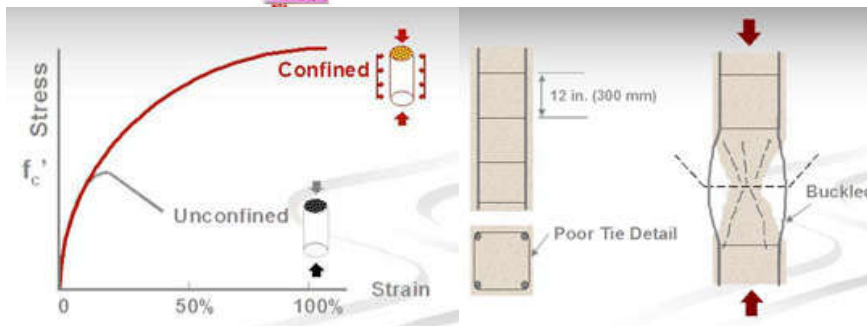
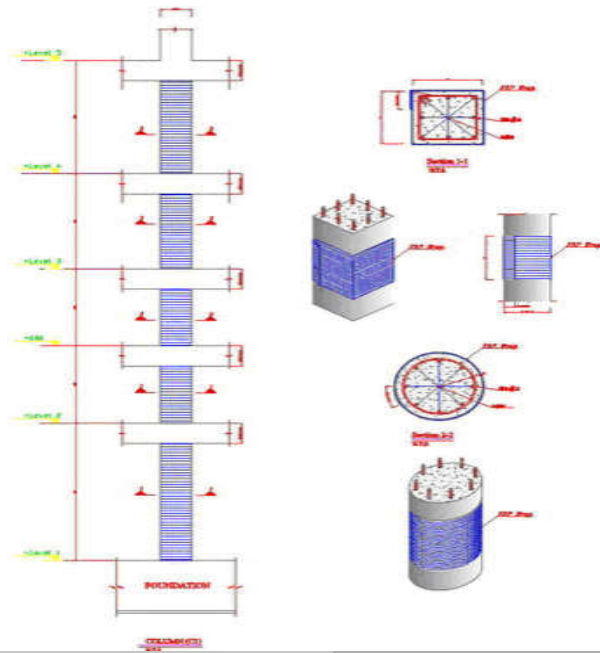
#### Advantages

- Increases Ductility
- Increases Shear Strength
- Improves Bond in Starter Bars
- Conforms to Various Cross Sections
- Requires Minimum Access
- Costs Less than Conventional Methods

#### major shortcomings of previous R/C columns

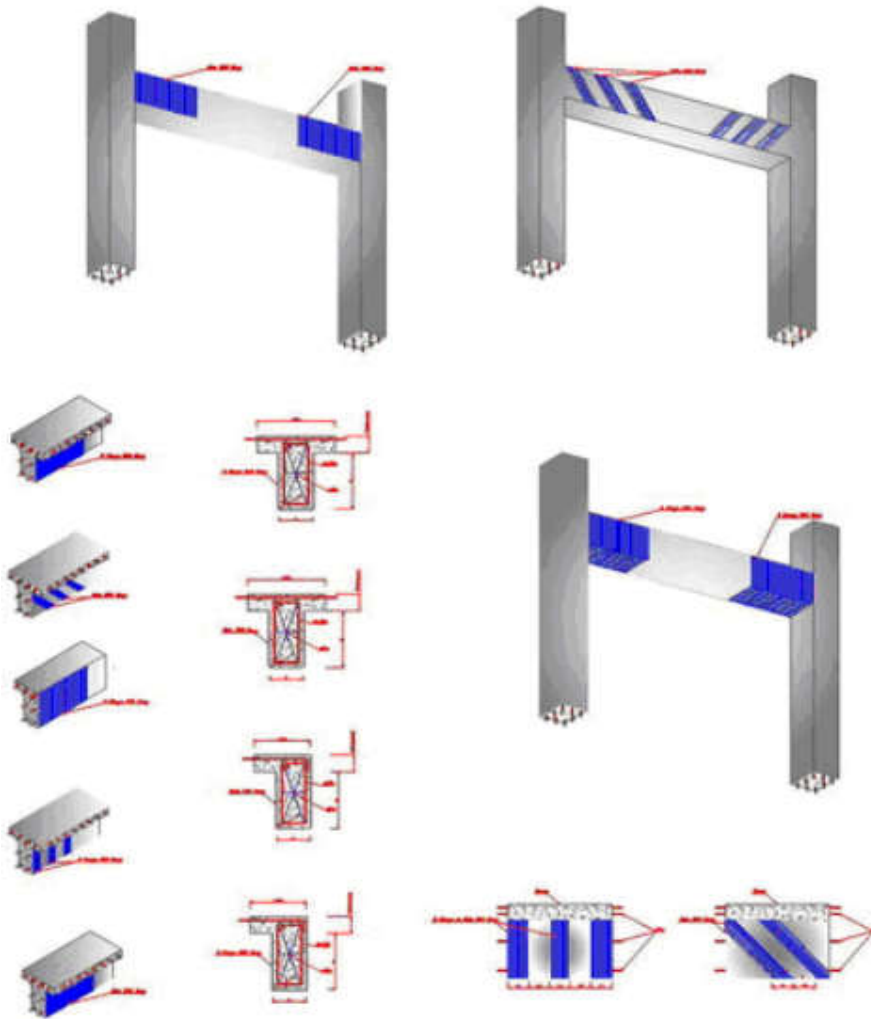
1- inadequately confined 2- the ends of the ties are not properly anchored in the core region during an earthquake, the ties open and allow the longitudinal steel to buckle, leading to failure of the column

External confinement increases the strength of the concrete.



Failure of R/C Columns



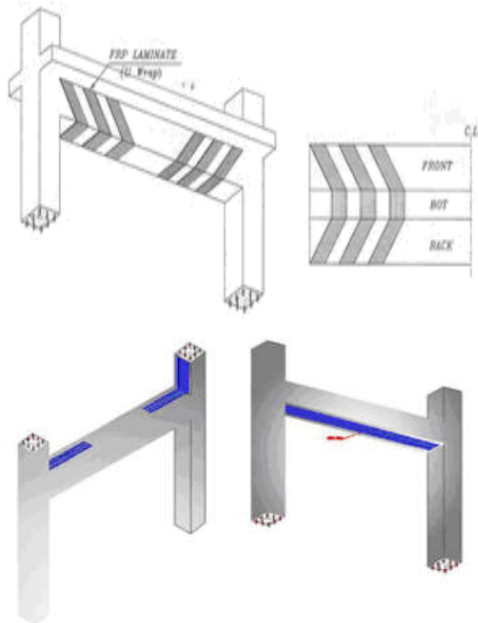


**Beam Strengthening-** Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) or Carbon FRP are economical and efficient materials for strengthening concrete beams for flexure and shear

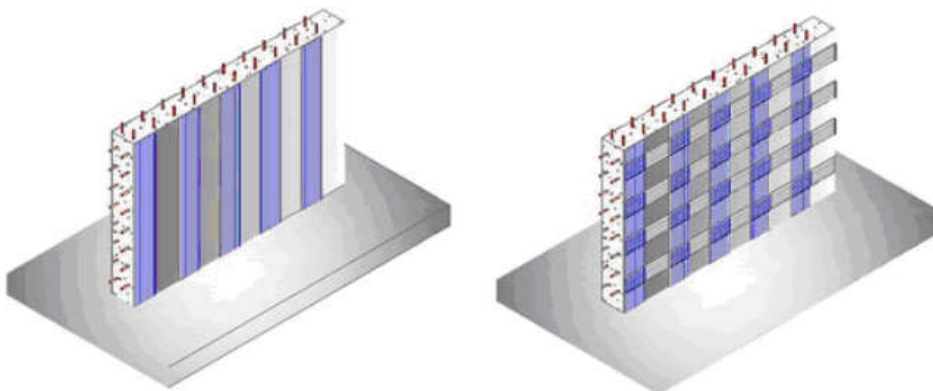
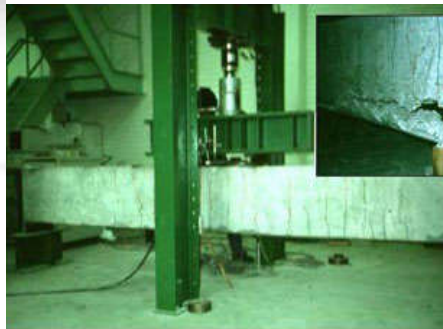
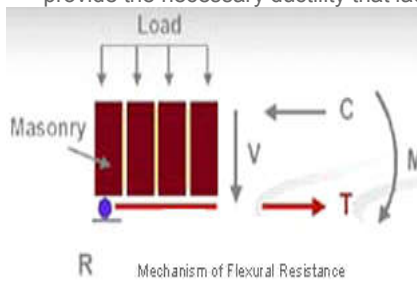
#### Advantages

- Increased flexural strength for both positive and negative moment regions
- Increased shear strength
- Increased stiffness at service loads
- Reduced cracked widths for enhanced durability and corrosion resistance
- No reduction in overhead clearance (e.g. in parking garages)
- Lower cost than conventional methods

Shear in concrete beams is resisted by tension forces in stirrups or ties. FRP can be bonded to the sides of a beam or column to increase its shear strength



failure will not take place in the bond line .failure is reached in concrete after yielding of the longitudinal steel reinforcement. This is particularly important because the yielding of steel can provide the necessary ductility that lacks in the behavior of FRP products.



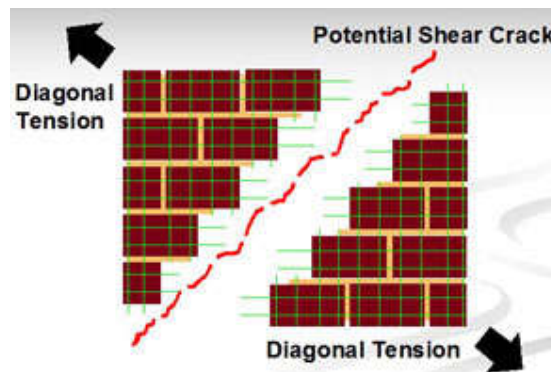
**Wall Strengthening**-A layer of epoxy is applied to the wall surface. Carbon or glass FRP fabrics saturated with Saturating Resin are applied in strips to the wall surface. The fabrics add tremendous flexural and shear strength to the wall and force all masonry units to work as a monolithic wall

**Advantages - Masonry Parapets Strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP)**  
**Seismic Repair & Strengthening of Masonry Walls (URM) with FRP**

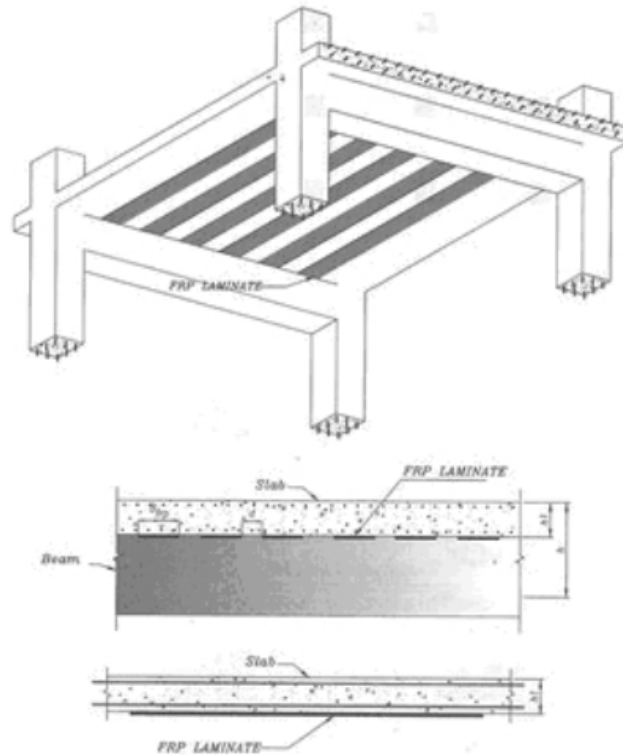
- Increases out-of-plane flexural strength

- Increases in-plane shear strength
- Confines masonry units, resulting in monolithic action of all units
- Prevents secondary damage from falling debris
- Works as a waterproofing material
- Adds very little weight to the wall
- Increases wall thickness by less than (5 mm)
- Converts masonry from a weak/brittle material to a strong/ductile material
- Results in monolithic action of all units
- Limited access requirements
- Costs less than conventional methods

The flexural strength of URM walls is limited by the tensile strength of the mortar. When glass FRP or carbon FRP is bonded to the exterior surface of the wall, it provides a large tensile component that, along with the compressive strength of the masonry, can resist large moments.



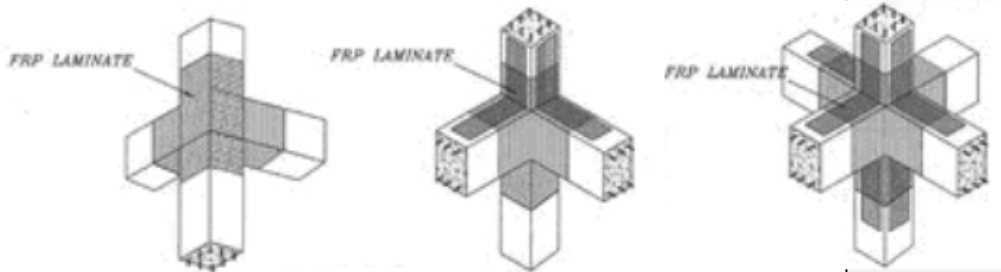
Shear is resisted as diagonal tension. When Fiber Reinforced Polymer (FRP) is bonded to the URM wall with fibers aligned in horizontal and vertical directions, a shear crack cannot cause failure until all fibers crossing that crack fail in tension. Retrofit of URM walls for shear requires that biaxial fabrics be used.



**Slab Strengthening** – Glass or Carbon FRP is a cost-effective system for strengthening concrete floors and decks or correcting design and construction errors that have lead to excessive deflection and sag in the slab

advantages of Fiber Reinforced Polymer (FRP) for strengthening slabs are:

- Increased flexural strength for both positive and negative moment regions in the slab
- Increased slab stiffness and reduced deflections at service loads
- Reduced crack widths for enhanced durability
- Covering a fraction of the slab surface with FRP may be sufficient for strengthening the entire slab
- No reduction in overhead clearance is caused by application of FRP (e.g. in parking garages)
- Lower cost for FRP compared to strengthening with conventional methods (e.g. epoxy injection in cracks)



### Joint (Connection) Strengthening

- Strengthening of smokestacks and chimneys is often required due to structural modification
- Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) system for protecting buildings against blast loads
- Repair of Pipes with Wet Layup Carbon FRP (CFRP)
- Strengthening of Tilt-up Walls with Glass or Carbon FRP
- Strengthening of Tanks with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)
- Strengthening of Steel Bridge Girders with Carbon FRP

advantages of repair and strengthening of steel beams and girders with FRP are:

- Increased flexural strength in the steel girder for both positive and negative moment regions
- Restores steel girder capacity after loss of tension flange area due to corrosion
- Increased stiffness of the steel girder in both elastic and plastic response
- Eliminates stress concentration in the steel girder due to welding
- Improved fatigue behavior of steel bridge girder (after retrofit with FRP)
- Lower cost than conventional methods

Injection of resins into cracks is a common approach to strengthen cracked tilt-up panels. The epoxy is intended to penetrate the full depth of the crack and bond the separated pieces of concrete together. If done correctly, it can also serve as a protection measure against moisture penetration and corrosion of reinforcement

- FRP covering the crack protects the internal steel reinforcement against corrosion.
- FRP can significantly increase the strength of the wall (in flexure and shear)

