

دوام و پایایی بتن

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد عمران گرایش سازه

عمر خدمت دهی طولانی مترادف با دوام در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که دوام تحت یک مجموعه شرایط، لزوماً به معنای دوام مجموعه تحت شرایط دیگری نمی‌باشد، به همین دلیل متداول است که هنگام تعریف دوام اشاره‌ای کلی به محیط نیز شود. بر طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انستیتوی بتن آمریکا (ACI)، دوام بتن سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقاومت در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش، و یا هر فرآیندی که موجب آسیب دیدگی شود، گفته می‌شود. بنابراین، بتن بادوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت دهی خود را در شرایط محیطی حفظ کند. هیچ مصالحی ذاتاً با دوام نیست. در نتیجه عوامل محیطی، ریز ساختار مصالح، متعاقب آن، خواص این مصالح با گذشت زمان تغییر می‌کند. یک ماده وقتی به انتهای عمر خدمت دهی خود می‌رسد که، خواصش، تحت شرایط مفروض استفاده از آن، به حدی آسیب دیده باشد که ادامه استفاده از مصالح ناایمن یا غیر اقتصادی شناخته شود.

اهمیت دوام بتن

در حال حاضر، عموماً پذیرفته شده است که در طراحی سازه‌ها، می‌باید مشخصات دوام مصالح مورد نظر، همانند سایر مشخصات و ویژگی‌های آن، نظیر خواص مکانیکی و هزینه و قیمت اولیه، مورد ارزیابی قرار گیرد. در ابتدا، دوام بیشتر از نقطه نظر تاثیرات اقتصادی و اجتماعی آن مدنظر قرار می‌گیرد. افزایش روز افزون هزینه‌های تعمیر و جایگزینی سازه‌ها، ناشی از خرابی مصالح، بخش عمده‌ای از کل بودجه ساختمان سازی را به خود اختصاص می‌دهد. به عنوان مثال، تخمین زده شده است که در کشورهای صنعتی بیش از ۴۰ درصد کل منابع صنعت ساختمان در قسمت تعمیر و نگهداری سازه‌های موجود و کمتر از ۶۰ درصد آن برای احداث ساختمانهای جدید بکار گرفته می‌شود. بهای روز افزون جایگزینی‌ها در سازه‌ها، و تأکید فزاینده بر هزینه‌های مصرفی در طی طول عمر سازه، به جای هزینه‌های معرفی اولیه آن، مهندسان را مجبور می‌کند که دوام را جدی بگیرند. نهایتاً اینکه، پی برده شده است که رابطه نزدیکی بین دوام مصالح و شرایط محیطی وجود دارد. حفاظت از منابع طبیعی از طریق بادوام‌تر ساختن مصالح در هر حال یک اقدام زیست محیطی می‌باشد. همچنین، استفاده از بتن در محیطهای آسیب رسان روز به روز نیز توسعه می‌یابد. از جمله این محیطها، سکوها، فراساحل، مخازنی که برای نگهداری گازهای مایع در دماهای سرمازا بکار می‌روند، و راکتورهای تحت فشار بالا، در صنایع هسته‌ای، را می‌توان نام برد. شکست سال‌های قبل در سازه‌های فولادی فراساحل در نروژ نشان داد که هم تلفات جانی و هم خسارات مالی مربوط به خرابی زودرس و اتفاقی در مصالح ساختمانی می‌تواند بسیار زیاد باشند.



شکست در سازه‌های فولادی فراساحل و اهمیت دوام بتن

عوامل فیزیکی موثر بر دوام بتن

عوامل فیزیکی ای که به گونه‌ای زیان آور بر روی دوام بتن تأثیر می‌گذارند از جمله عبارتند از:

۱. فرسودگی سطحی، ترک خوردگی ناشی از فشار تبلور نمکها در منافذ، و در معرض دماهای بسیار گرم یا سرد، نظیر یخ زدگی و آتش قرار گرفتن
 ۲. تأثیرات مواد شیمیایی زیان آور شامل تراوش محلولهای اسیدی به درون خمیر سیمان، واکنشهای انبساط زای ناشی از حمله سولفاتی، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و خوردگی آرماتور داخل بتن.
- در این مطلب، به طور مفصل در مورد اهمیت، ظواهر فیزیکی، مکانیزم‌ها و کنترل علل مختلف آسیب دیدگی بتن بحث گردیده است. در انتها، توجه ویژه‌ای به عملکرد بتن در آب دریا شده است. از آنجا که علل فیزیکی و شیمیایی زیادی به طور همزمان بر روی آسیب دیدگی بتن تأثیر می‌گذارند، لذا مطالعه رفتار بتن در آب دریا فرصت بسیار مناسبی را برای ما فراهم می‌آورد که میزان پیچیدگی مسائل دوام را تصدیق کرده و عوامل موثر بر دوام سازه‌های بتنی را بشناسیم.



تخریب بتن ناشی از حملات مخرب

زوایای مهم دوام بتن

اغلب معلومات ما درباره فرایندهای فیزیکی - شیمیایی مسبب آسیب دیدگی بتن از روی تاریخچه سازه‌های واقعی به دست می‌آید، زیرا شبیه سازی ترکیب حالت‌های دراز مدتی که معمولاً در واقعیت وجود دارند در آزمایشگاه مشکل می‌باشد. با این وجود، در عمل به ندرت آسیب دیدگی بتن ناشی از یک علت منحصر بفرد است. معمولاً، در مراحل پیشرفته‌تر خرابی مصالح، بیش از یک پدیده زیان آور مشاهده می‌شود. به طور کلی، علل فیزیکی و شیمیایی خرابی آن قدر در هم پیچیده شده و تداخل دارند و آن قدر موجب تشدید یکدیگر می‌شوند که اغلب، حتی جدا کردن علت از معلول امکان پذیر نیست. بنابراین، رده بندی خرابی‌های بتن به انواع مشخص و شسته و رفته، می‌باید با احتیاط صورت گیرد. از آنجا که هدف از این رده بندی می‌باید به طور سیستماتیک و تک تک روشن شده و شرح داده شود و این کار می‌باید انواع پدیده‌های گوناگون را نیز در برگیرد، لذا این گرایش نیز وجود دارد که در حالی که چند تا از این پدیده‌ها به طور همزمان وجود دارند، تأثیرات متقابل واند رکنش بین آنها نیز بررسی شده و مدنظر قرار گیرند.

بهبود دوام در بتن

بتن خوب تحت انواع وسیعی از شرایط محیطی متنوع، ماده‌ای نسبتاً با دوام است. اما شرایط اقلیمی معمولی ممکن است اثرات زیان باری بر روی بتن ضعیف داشته موجب تجزیه و فروپاشی آن گردد. اثرات آب و هوایی ناشی از پدیده مخرب یخ زدن و آب شدن، تر و خشک شدن متناوب، فعل و انفعالات شیمیایی نامطلوب و تغییرات دما در بتن حجیم است. آزمایش‌های زیادی در آزمایشگاه‌ها انجام شده و به منظور تعیین دوام بتن تحت انواع مختلف شرایط محیطی مورد استفاده قرار گرفته است ولی ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و گزارش‌های کارگاهی اگر غیرممکن نباشد، مشکل است. عوامل اساسی که ممکن است بر دوام بتن اثر بگذارند:

- خواص فیزیکی بتن سخت شده
- مصالح تشکیل دهنده بتن
- روش‌های به کار گرفته شده جهت تولید و ساخت جهت حصول دوام مناسب، بتن باید:
- دارای نسبت آب به سیمان پایین باشد
- مصالح تشکیل دهنده آن سالم باشند
- متراکم و خوب ساخته شده
- به طور صحیح عمل‌آوری شده باشد
- در صورتی که در معرض پدیده یخ زدن و آب شدن باشد، بین ۴ تا ۶ درصد حباب هوا داشته باشد
- ارزیابی دوام بتن ممکن است مطالعه خواص ارتجاعی، خمیری و حرارتی اجزای تشکیل دهنده و عدم سازگاری‌های احتمالی را نیز ایجاب نماید.

عموماً آب در تمام شکل‌های آسیب دیدگی بتن دخالت دارد و در اجسام متخلخل معمولاً میزان تراوایی جسم (در برابر آب) شدت آسیب دیدگی را تعیین می‌نماید. بنابراین، ساختمان و خواص آب، با در نظر گرفتن اثر تخریبی آن بر روی اجسام متخلخل، تشریح شده و سپس عمل‌های کنترل کننده تراوایی خمیر سیمان، سنگدانه‌ها و بتن ارائه می‌گردند.



تخریب ناشی از هوازدگی بتن

مشاهدات کلی دوام بتن

قبل از بحث در مورد جوانب و زوایای مهم دوام بتن، توجه به چند نکته کلی به درک بهتر موضوع کمک خواهد نمود.

- اولین نکته مهم در مورد آب است، آب، عنصر اولیه بوجود آوردن و تخریب کردن بسیاری از مصالح طبیعی و همچنین منشأ اغلب مسایل مربوط به دوام بتن می‌باشد. آب به عنوان عامل بسیاری از انواع فرایندهای فیزیکی کاهنده کیفیت نیز در اجسام متخلخل شناخته شده است. همچنین آب، به عنوان وسیله‌ای برای انتقال یونهای مهاجم، می‌تواند سرچشمه فرایندهای شیمیایی کاهنده کیفیت نیز باشد.
- دومین نکته این است که پدیده‌های فیزیکی - شیمیایی مرتبط با حرکات آب در اجسام متخلخل را نفوذپذیری جامدات کنترل می‌کند. به عنوان مثال، میزان آسیب دیدگی شیمیایی به این بستگی دارد که آیا حمله شیمیایی محدود به سطح بتن است و یا اینکه به داخل مصالح نیز رسوخ کرده است.
- سومین نکته این است که میزان آسیب دیدگی، تحت تأثیر نوع و غلظت یونهای داخل آب و ترکیب شیمیایی جسم است. بر خلاف سنگهای طبیعی و مواد معدنی، بتن جزء مواد بازی است دلیل آن هم این است که محصولات ناشی از هیدراتاسیون خمیر سیمان پرتلند، از ترکیبات قلیایی کلسیمی تشکیل می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود که آبهای اسیدی، خصوصاً، برای بتن مضر باشند.

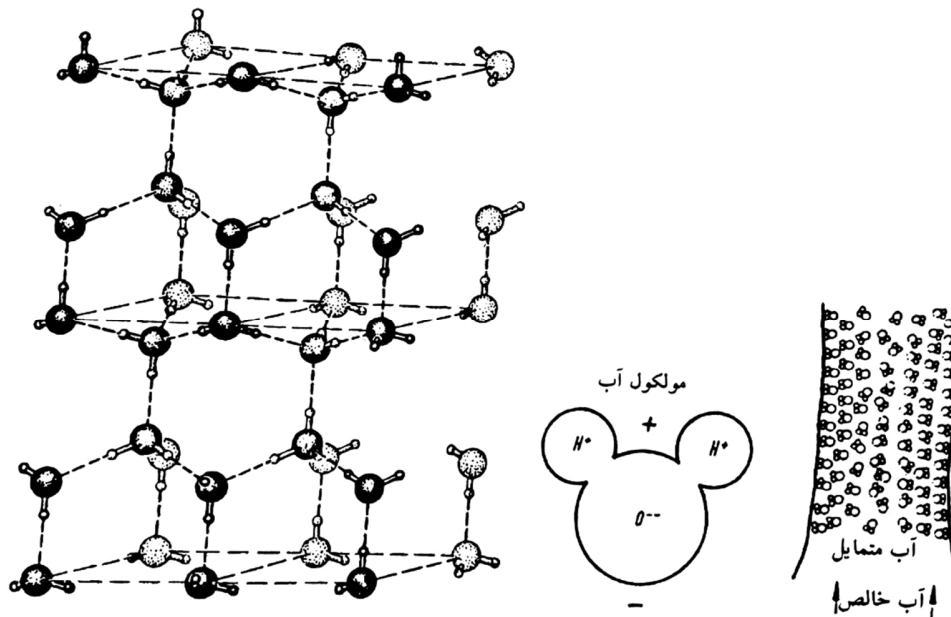
در ادامه مشخصاتی از آب را که عامل اصلی تخریب مواداند، بررسی نماییم.

آب به عنوان یک عامل آسیب رسان در دوام بتن

بتن تنها مصالحی نیست که در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی آسیب دیدگی مرتبط با آب صدمه می‌بیند. بنابراین، شایسته آن است که مشخصاتی از آب را که عامل اصلی تخریب مواداند، بررسی نماییم. آب، در انواع صورتهای آب دریا، آب زیر زمینی، رودخانه، دریاچه، باران، برف و بخار، بدون شک فراوانترین مایع در طبیعت است. مولکولهای آب، به دلیل کوچک بودن، قادر به نفوذ در منافذ با حفره‌های خیلی ریز می‌باشند. آب، به عنوان حلال، قادر به حل کردن مواد زیادتری، در مقایسه با سایر مایعات شناخته شده دیگر، تشخیص داده شده است. این خاصیت، به دلیل وجود یونها و گازهای زیاد در بعضی از آنهاست که به نوبه خود عاملی برای تجزیه شیمیایی مواد جامد می‌شوند. همچنین باید توجه شود که آب بیشترین گرمای تبخیر را در بین مایعات معمولی دارا است. بنابراین در دماهای معمولی، آب تمایل دارد که به جای آنکه تبخیر شده و مواد جامد را بر جای بگذارد، به صورت جسمی در حالت مایع باقی بماند. در اجسام متخلخل، حرکات داخلی و تغییرات ساختار آب، علت انواع مختلف تغییرات حجمی موجب گسیختگی شناخته شده‌اند. برای مثال، تبدیل آب به یخ، تشکیل ساختمان منظم آب در داخل منافذ ریز، افزایش فشار اسمزی بر اثر تفاوت غلظتهای یونی، و به وجود آمدن فشار هیدروستاتیک ناشی از تفاوت فشارهای بخارها می‌تواند منجر به تنشهای داخلی زیادی در داخل جسم مرطوب شود. مروری کوتاه بر ساختمان آب برای درک این رویدادها مفید خواهد بود.

ساختمان آب

مولکول $H - O - H$ دارای پیوند کووالانسی است. بدلیل تفاوت بین مراکز بارهای هیدروژن و اکسیژن، پروتون با بار مثبت یون هیدروژن یک مولکول آب، الکترون با بار منفی مولکولهای آب مجاورش را به خود جذب می‌نماید. این نیروی جاذبه نسبتاً ضعیف که پیوند هیدروژنی نامیده می‌شود، باعث بوجود آمدن ساختمان منظم آب می‌شود. بیشترین تجلی این نظم قوی در ساختمان آب، بر اثر پیوند هیدروژنی، در یخ دیده می‌شود، شکل زیر را مشاهده کنید. در یخ، مولکول آب به وسیله چهار مولکول دیگر طوری احاطه شده است که در هر دسته از مولکولها یک مولکول در وسط قرار گرفته و چهار مولکول دیگر در چهار گوشه یک چهار وجهی قرار گرفته‌اند. مولکولها و دسته مولکولها، در هر سه جهت به وسیله پیوند هیدروژنی به هم متصل شده‌اند. یخ در دمای صفر درجه سانتیگراد، که تقریباً ۱۵ درصد از پیوند هیدروژنی آن شکسته می‌شود، ذوب میشود. در نتیجه این شکست بخشی در جهت گیری دارای پیوند چهار وجهی، هر مولکول آب می‌تواند بیش از چهار تا از مولکولهای مجاور خود را جذب نماید. بنابراین، چگالی آن از ۹۱۷/۰ به ۱ افزایش می‌یابد. برگشت پذیری این فرآیند این پدیده را تشریح می‌کند که چرا آب بر اثر انجماد، به جای انقباض انبساط پیدا میکند.



ساختمان یخ و ساختمان مولکولهای آب در ساختمان و خواص آب تحت تأثیر دما واندازه منافذ موجود در یک جامد هستند در مقایسه با ساختمان یخ، در دماهای معمولی تقریباً ۵۰ درصد پیوند هیدروژنی آب شکسته است. مصالح در حالت پیوند شکسته دارای بارهای سطحی ناکافی هستند که باعث افزایش انرژی سطحی می‌گردند. انرژی سطحی در مایعات، موجب کشش سطحی می‌شود و این موضوع هم دلیلی برای چسبیدن تعداد زیادی از مولکولها به یکدیگر می‌باشد. کشش سطحی (که بنابر تعریف، نیروی لازم برای جدا کردن مولکولهای مایع از یکدیگر می‌باشد) زیاد آب مانع عملکرد آن به عنوان یک ماده روان کننده مؤثر در بتن می‌شود، مگر آنکه ماده افزودنی مناسبی به آن اضافه گردد. شکل گیری ساختمان جهت یافته آب، که ناشی از پیوند هیدروژنی در منافذ ذره بینی است، عامل انبساط بسیاری از سیستمها شناخته شده است. در جامدات، وجود انرژی سطحی ناشی از بارهای ناکافی به مساحت سطح بستگی دارد. بنابراین، هنگامی که تعداد زیادی منافذ ریز موجود باشند انرژی سطحی افزایش می‌یابد. چنانچه آب قادر به نفوذ به درون این منافذ ذره بینی باشد و نیروهای جاذب در سطح منافذ، برای شکستن کشش سطحی حجم کلان آب و متمایل کردن مولکولهای آن به طرف یک ساختمان منظم (مشابه ساختمان یخ)، به حد کافی قوی باشند، این ساختمان جهت یافته یا منظم آب، که تراکمش کمتر از حجم کلان آب است، به فضای بیشتری نیاز داشته و در نتیجه باعث انبساط آن خواهد شد.

نقش آب بر دوام بتن

تراوایی

نقش آب در بتن، می‌باید از یک دیدگاه صحیح مدنظر قرار گیرد، زیرا آب، به عنوان یک جزء لازم برای واکنشهای هیدراتاسیون سیمان و یک ماده روان کننده برای اجزای مخلوط بتن، از ابتدای کار، در بتن نقش ایفا می‌کند. بسته به شرایط محیطی و ضخامت قطعه بتنی، به تدریج، اکثر آب قابل تبخیر بتن (تمام آب لوله‌های مویینه و قسمتی از آب جذب شده)، از بین رفته و منافذ بتن به صورت خالی یا اشباع نشده در می‌آیند. از آنجا که این آب قابل تبخیر است، لذا قابلیت یخ زدگی دارد و همچنین برای جابه جایی داخلی آزادی دارد. بنابراین، بتنی که آب قابل تبخیر، پس از خشک شدن یا اصلاً نداشته، و یا کم داشته باشد و همچنین متعاقباً پس از قرار گرفتن در شرایط محیطی، منافذ آن دوباره اشباع نشوند، در مقابل رویدادهای مخرب وابسته به آب، آسیب پذیر نخواهد بود.

مطالب فوق الذکر به مقدار زیادی به هدایت هیدرولیکی، که بنام ضریب تراوایی (K) شناخته شده است، بستگی دارد. بایستی توجه نمود که در تکنولوژی بتن، رایج است که صفت ذکر نشود و به K، به جای ضریب تراوایی، فقط تراوایی گفته شود. گاربوچی (Garboczi) چندین نظریه را در این زمینه مورد بررسی قرار داد. این نظریه‌های سعی در ارتباط دادن پارامترهای ساختمان ذره بینی محصولات سیمانی با انتشار (میزان انتشار یونها از طریق منافذ پر از آب) و یا با تراوایی (میزان جریان لزج مایعات از طریق ساختار منفذی) داشت. در مصالحی نظیر بتن، که دارای ریز ترکهای زیادی هستند، به دلیل تغییرات غیرقابل پیش بینی‌ای که در ساختار منفذی آنها در هنگام نفوذ یک مایع خارجی صورت می‌پذیرد، امکان تعیین ضریب مشخصه انتقال وابسته به ساختار منفذی آنها، به گونه‌ای رضایتبخش، بسیار مشکل است. باید توجه داشته باشیم که به دلیل چرخه‌های مکرر باریک و پهن شدن منافذ و ریز ترکها، بر اثراند رکنشها و فعل و انفعالات فیزیکی - شیمیایی بین مایع نفوذی و مواد معدنی خمیر سیمان، خاصیت انتقال وابسته به ساختمان منفذی دائما در حال تغییر می‌باشد. به اعتقاد گاربوچی، بنا به دلایل گوناگون، پیش از آنکه سودمندی پیش بینی‌های قابلیت انتشار اثبات شود، بدان نیاز است که این پیش بینی‌ها توسعه بیشتری یافته و میزان اعتبار آنها به گونه‌ای مشخص تر تعیین شود. بنابراین، در این کتاب برای مقاصد عملی، فقط در مورد تراوایی بحث شده است. با این وجود، به طور ضمنی باید گفت که استفاده از واژه مزبور به طور خام و کلی، و نه دقیق، می‌تواند همه موارد انتقال مایعات به درون ماده را در برگیرد. تراوایی خاصیتی است که حاکم بر آهنگ جریان مایع در جسم متخلخل است. برای جریان پایا، ضریب تراوایی (K) از معادله دارسی به دست می‌آید. ضریب تراوایی بتن در برابر نفوذ گازها یا بخار آب به داخل آن، بسیار کمتر از ضریب تراوایی آن در برابر نفوذ آب مایع است. به همین دلیل، آزمایشهای انداز گیری تراوایی، عموما با استفاده از آب بدون هوای محلول انجام می‌گیرد. داده‌های این فصل بر اساس تراوایی بتن در مقابل آب خالص می‌باشد مگر اینکه روش دیگری ذکر شده باشد. همچنین می‌باید متذکر شویم که تراوایی بتن در برابر نفوذ محلولهای حاوی یونها، به دلیل فعل و انفعال این یونها با خمیر سیمان، با تراوایی آن در برابر نفوذ آب متفاوت است.

تراوایی خمیر سیمان

در خمیر هیدراته شده، انداز و پیوستگی منافذ در هر نقطه در حین فرآیند هیدراتاسیون، ضریب تراوایی را کنترل خواهد نمود. همانطور که قبلا بحث شد، آب مخلوط به طور غیرمستقیم مسئول تراوایی خمیر سیمان هیدراته شده می‌باشد، زیرا میزان این آب، در ابتدا نشان دهنده کل فضای خالی است، و پس از انجام هیدراتاسیون، این آب نشان دهنده فضای پرنشده پس از مصرف آب است، خواه این آب مصرف شده برای فعل و انفعالات هیدراتاسیون به کار رفته شده باشد و یا اینکه تبخیر شده و به داخل محیط رفته باشد، ضریب تراوایی خمیر سیمان تازه در حدود ۴-۱۰ تا ۵-۱۰ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد. در حین فرایند هیدراتاسیون به تدریج که تخلخل موئینگی کاهش می‌یابد، ضریب تراوایی نیز کمتر می‌شود (جدول زیر)، ولی تناسب مستقیمی بین این دو وجود ندارد. برای مثال هنگامی که تخلخل موئینگی از ۴۰ درصد به ۳۰ درصد کاهش می‌یابد ضریب تراوایی به مقدار خیلی بیشتری افت می‌کند، در صورتی که بر اثر کاهش بیشتر تخلخل از ۳۰ درصد به ۲۰ درصد، افت خیلی کمی در تراوایی بوجود می‌آید. علت این امر آن است که در ابتدا، با پیشرفت فرایند هیدراتاسیون سیمان، حتی مقدار کم کاهش تخلخل موئینگی کل، با تقسیم قابل توجه منافذ بزرگ است، بنابراین انداز و تعداد کانالهای جریان در خمیر سیمان به میزان زیادی کاهش می‌یابد. به طور متعارف، تخلخل موئینگی در حدود ۳۰ درصد، نشان دهنده آن زمانی است که اتصال زنجیری بین منافذ، بقدری پیچ در پیچ شده است که کاهش بیشتر تخلخل خمیر سیمان، با افت قابل ملاحظه‌ای در ضریب تراوایی همراه نخواهد بود.

ضریب تراوایی ($\times 10^{-11}$ cm/sec)	سن (روز)
۲۰/۰۰۰/۰۰۰	تازه
۴/۰۰۰	۵
۱/۰۰۰	۶
۴۰۰	۸
۵۰	۱۳
۱۰	۲۴
۶	نهایی

کاهش تراوایی خمیر سیمان (با نسبت آب به سیمان ۰٫۷) با پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون به طور کلی، وقتی که نسبت آب به سیمان زیاد و درجه هیدراتاسیون کم باشد، خمیر سیمان، تخلخل موئیگی زیادی خواهد داشت و شامل تعداد تقریباً زیادی از منافذ بزرگ و کاملاً به هم متصل می‌شود و در نتیجه ضریب تراوایی آن زیاد خواهد بود. با پیشرفت هیدراتاسیون، اندازه بسیاری از منافذ کاهش یافته (مثلاً به ۱۰ یا کمتر) و همچنین اتصال زنجیریشان را از دست خواهند داد و در نتیجه تراوایی شان نیز کاهش خواهد یافت.

ضریب تراوایی خمیر سیمان هنگامی که بیشتر به منافذ موئینه کوچک بوده و به هم متصل نباشند، در حدود می‌باشد. مشاهده شده است که در خمیر سیمان معمولی، انفصال در شبکه موئینه عموماً وقتی اتفاق می‌افتد که تخلخل موئینه در حدود ۳۰ درصد باشد. برای خمیرهای با نسبت آب به سیمان ۰٫۴، ۰٫۵، ۰٫۶ و ۰٫۷، این پدیده به ترتیب بعد از ۳، ۱۴، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز عمل آوری مرطوب اتفاق می‌افتد. از آنجا که در بیشتر مخلوطهای بتن، نسبت آب به سیمان به ندرت از ۰٫۷ تجاوز می‌نماید، لذا واضح است که در بتنی که به خوبی عمل آوری شده باشد، خمیر سیمان عامل اصلی مؤثر در ضریب تراوایی نمی‌باشد.

تراوایی سنگدانه‌ها

در مقایسه با تخلخل موئیگی ۳۰ تا ۴۰ درصد در خمیرهای سیمان متعارف بتنه‌های سخت شده، حجم منافذ در اغلب سنگدانه‌های طبیعی معمولاً زیر ۳ درصد بوده و بندرت از ۱۰ درصد تجاوز می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که تراوایی سنگدانه از تراوایی خمیر سیمان خیلی کمتر باشد. البته ممکن است لزوماً همیشه بدین صورت نباشد. از داده‌های تراوایی سنگهای طبیعی و خمیر سیمان (جدول زیر) اینطور به نظر می‌رسد که ضریب تراوایی سنگدانه‌ها هم به همان گونه خمیرهای سیمان هیدراته شده با نسبتهای آب به سیمان در محدوده، متغیر می‌باشند.

نسبت آب به سیمان خمیر عمل آمده با ضریب تراوایی یکسان	ضریب تراوایی (cm/sec)	نوع سنگ
۰/۳۸	۲/۴۷×۱۰ ^{-۱۲}	سنگ بازالتی سنگین
۰/۴۲	۸/۲۴×۱۰ ^{-۱۲}	دیوریت کوارتزی
۰/۴۸	۲/۳۹×۱۰ ^{-۱۱}	مرمر
۰/۶۶	۵/۷۷×۱۰ ^{-۱۰}	مرمر
۰/۷۰	۵/۳۵×۱۰ ^{-۹}	گرانیت
۰/۷۱	۱/۲۳×۱۰ ^{-۸}	ماسه سنگ
۰/۷۱	۱/۵۶×۱۰ ^{-۸}	گرانیت

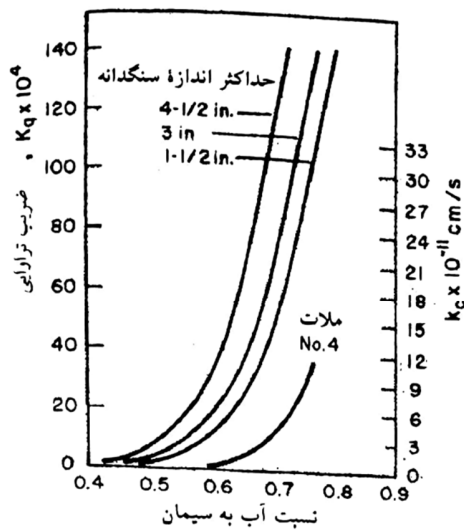
مقایسه بین تراوایی سنگها و خمیرهای سیمان

علی رغم آنکه ضریب تراوایی بیشتر مرمرها، سنگهای بازالتی، دیوریتها، بازالتها و گرانیتها سنگین می‌توانند در محدوده تا باشند، اما بعضی از انواع گرانیتها ماسه سنگها، سنگ آهکها و چرتها ارقامی تا دو برابر را نشان می‌دهند. دلیل اینکه تراوایی بعضی از سنگدانه‌های با تخلخل پایین، در حدود ۱۰ درصد، ممکن است خیلی بیشتر از آن خمیرهای سیمان باشد این است که ابعاد منافذ مویینه در سنگدانه‌ها معمولا خیلی بزرگتر است.

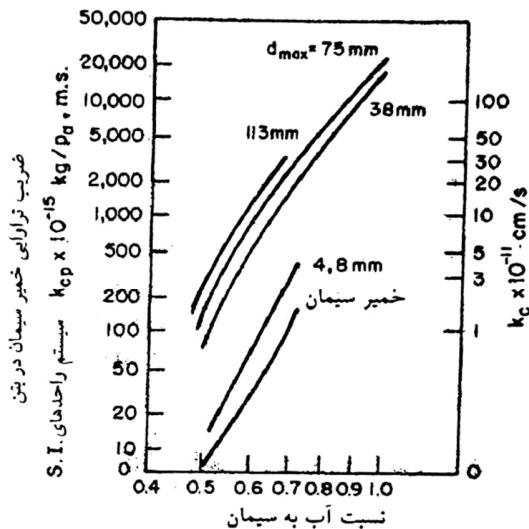
اندازه بیشتر منافذ مویینه خمیر سیمان عمل آوری شده در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر است، در صورتی که اندازه منافذ سنگدانه‌ها به طور متوسط بزرگتر از ۱۰ می‌باشند. در بعضی از چرتها و سنگ‌های آهک، منافذ از نظر اندازه، شامل مقدار بسیار زیادی منافذ ریز می‌شوند و در نتیجه تراوایی آنها کم است. ولی سنگدانه‌ها، تحت انبساط و ترک خوردگی همراه با حرکت گند رطوبت و فشار هیدرواستاتیکی حاصله بوجود آمده‌اند.

تراوایی بتن

از نقطه نظر تئوریک، انتظار می‌رود که اضافه کردن ذرات سنگدانه با تراوایی کم به خمیر سیمان، تراوایی کل سیستم را کاهش دهد. این بیان، به ویژه در مورد خمیرهای با نسبت زیاد آب به سیمان و در سنین اولیه آن، که تخلخل مویینی زیاد است صادق است. از آنجا که ذرات سنگدانه‌ها می‌باید کانالهای جریان داخل ماتریس خمیر سیمان را قطع نمایند، بنابراین، ملات یا بتن، در مقایسه با خمیر سیمان خالص، با نسبت آب به سیمان و درجه بلوغ یکسان، باید ضریب تراوایی کمتری داشته باشند. داده‌های حاصل از آزمایشها دلالت بر آن دارند که در عمل، این چنین اتفاق نمی‌افتد. دو مجموعه داده‌های شکل زیر، به روشنی نشان می‌دهند که اضافه نمودن سنگدانه به خمیر سیمان یا ملات، تراوایی را به میزان زیادی افزایش می‌دهد. در حقیقت، هر چه که اندازه سنگدانه بزرگتر باشد، ضریب تراوایی نیز بیشتر می‌شود. به طور متعارف، ضرایب تراوایی بتن با مقاومت متوسط (با سنگدانه‌های ۳۸ میلیمتری و با ۳۵۶ کیلوگرم سیمان در متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰٫۵)، و بتن با مقاومت کمی که در سدسازی مصرف می‌شود (با سنگدانه‌های به‌اندازه ۷۵ تا ۱۵۰ میلیمتری و با ۱۴۸ کیلوگرم سیمان در متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰٫۷۵) به ترتیب در حدود و می‌باشند.



(الف)



(ب)

تأثیر نسبت آب به سیمان و بزرگترین اندازه سنگدانه بر روی تراوایی بتن؛ در منحنی (KQ) میزان نسبی جریان آب در داخل بتن بر حسب فوت مکعب در سال در یک فوت مربع برای گرادیان هیدرولیکی واحد می باشد

تراوایی بتن در مقابل آب، اساساً بستگی به نسبت آب به سیمان (که اندازه، حجم و پیوستگی منافذ موئین را تعیین میکند) و بزرگترین اندازه سنگدانه (که بر روی ریز ترکهای ناحیه انتقال بین درشت دانه و خمیر سیمان تأثیر می گذارد) دارد.

توضیح این مورد که چرا تراوایی ملات یا بتن از تراوایی خمیر سیمان متناظر با آن بیشتر است، به ریز ترکهای موجود در ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر مربوط می شود. همانگونه که قبلاً ذکر شد اندازه سنگدانه و دانه بندی آن بر روی مشخصات آب انداختگی مخلوط بتن تأثیر می گذارند که این نیز به نوبه خود روی مقاومت ناحیه انتقال تأثیر می گذارد. در طی دوره های هیدراتاسیون اولیه، به دلیل تفاوت بین کرنشهای خمیر سیمان و سنگدانه، ناحیه انتقال ضعیف بوده و در برابر ترک خوردگی آسیب پذیر می باشد. کرنشهای فوق الذکر، عموماً ناشی از جمع شدگی ناشی از خشک شدن، جمع شدگی حرارتی و بار اعمال شده خارجی می باشند. ترکهای ناحیه انتقال آنقدر کوچکند که با چشم غیر مسلح آنها را نمی توان دید اما عرضشان بزرگتر از عرض حفره های موئینه موجود در ماتریس خمیر سیمان می باشد و بنابراین با افزایش ارتباطات داخلی سیستم، تراوایی آن را افزایش می دهند. به دلیل اهمیت تراوایی در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی آسیب دیدگی بتن، که در ادامه توضیح داده خواهد شد، مرور خلاصه ای از عاملهای کنترل کننده تراوایی بتن، مفید به نظر می رسد. از آنجا که مقاومت و تراوایی از طریق تخلخل موئینی با هم رابطه دارند، لذا عاملهایی که بر روی مقاومت بتن تأثیر می گذارند بر روی تراوایی هم تأثیر دارند. کاهش حجم منافذ موئینه بزرگ (مثلاً بزرگتر از ۱۰۰ nm) در ماتریس خمیر، تراوایی را کاهش خواهد داد. این امر از طریق استفاده از نسبت کم آب به سیمان، مقدار مناسب سیمان، و تراکم و شرایط عمل آوری درست، امکان پذیر خواهد بود.

به طریق مشابه، دقت کافی در اندازه سنگدانه و دانه بندی، کرنشهای حاصل از جمع شدگی ناشی از خشک شدن و جمع شدگی حرارتی، و اجتناب از بارگذاری قبل از موعد و بارگذاری بیش از حد، از جمله گامهای ضروری برای کاهش ریز ترکهای ناحیه انتقال، که به نظر می آید که علت عمده تراوایی زیاد بتن در عمل باشند، هستند. در خاتمه، باید دانست که پیچ و خم مسیر جریان مایع، که در امر تراوایی تعیین کننده است، تحت تأثیر ضخامت قطعه بتنی نیز می باشد.

انواع آزمایش های دوام بتن و سازه های بتنی

آزمایش های یخبندان و آشدگی

این آزمایش ها به دو صورت دراستانداردها وجود دارد:

- یخبندان و آب شدگی پی در پی در حالت اشباع در آب یاهوا و کنترل کاهش وزن، کاهش مقاومت، افزایش حجم و

کاهش مدول ارتجاعی دینامیکمانند ASTM C666

- یخبندان و آب شدگی پی در پی در مجاورت آب نمک یا نمک های یخ زدا و کنترل پوسته شدنسطح بتن و کاهش

وزن آن مانند ASTM C1262، ASTM C672 و EN 1340

به هرحال این آزمایش ها عمدتا در سنین کم ۲۸ تا ۹۰ روزه بر روی بتن ها در آزمایشگاه انجام می شود و مدت زمان زیادی بطول می انجامد.

امروزه در آزمایش های یخبندان در حالت اشباع مانند ASTM C666 از پارامتر کاهش مدول ارتجاعی دینامیکاستفاده می

شود. پس از تعداد معینی سیکل یخبندان، درصد مدول ارتجاعی دینامیکیاولیه بدست می آید. حداقل درصد قابل قبولمدول

ارتجاعی دینامیکی اولیه، یک ملاک یا ضابطه تلقی می شود. مثلا بتنی با دوامتلقی می گردد که پس از ۳۰۰ سیکل یخبندان و آب شدگی مکرر، حداقل ۶۰ و یا ۸۰ درصدمدول ارتجاعی دینامیکی را دارا باشد.

در مواردی تعداد سیکل های یخبندانی را که مدولارتجاعی دینامیکی را به ۶۰ درصد مقدار اولیه می رساند مشخص می گردد.

بدیهی است دراین حالت باید حداقل تعداد سیکل های یخبندان مورد نظر به عنوان یک معیار اعلامگردد.

در آزمایش های یخبندان و آب شدگی پی در پی در معرضمواد یخ زدا معمولا درصد وزن بتن پوسته شده پس از تعداد معینی

سیکل یخبندان بدستمی آید. با محدود کردن میزان مواد پوسته شده، معیاری ارائه می گردد. به عنوان مثالدر ASTM

C1372 پس از ۱۰۰سیکلخاص یخبندان در آزمایش ASTM C1262 نباید از ۱درصدوزن اولیه بیشتر شود.

هرچند در این آزمایش نیز می توان تعداد سیکل یخبندانبرای دستیابی به درصد خاصی از پوسته شدن را به عنوان یک معیار

برگزید، اما این امرسابقه چندانی ندارد.

برای مثال در EN1340 برای جداول بتنی پیش ساخته مقدار مواد پوسته شده نباید از 1 kg/m^3 پس از ۲۸ سیکل خاص

یخبندان در حالی کهمحللول نمک طعام ۳درصد بر روی آن ریخته شده است، بیشتر باشد.

در ASTM C672 معمولا پس از ۵۰ سیکل یخبندان خاص در معرض مواد یخ زدا (محلولکلرید کلسیم ۴ درصد) که روی قطعه

ریخته می شود و درجه تخریب سطح پس از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ سیکل گزارش می شود که معیار درجه تخریب ارائه می شود.

به هر حال باید دانست که در همه انواع آزمایش یخبندانو آب شدگی مکرر در برابر آب یا نمک های یخ زدا، شرایط آزمایش با

واقعیت موجودتطابق ندارد اما به ناچار از این آزمایش ها و معیارهای ارزیابی آن استفاده می شود.

در ASTM C1262 که برای قطعات پیش ساخته بتنی و برخی قطعات بنایی بکار می رود و آب یا آب نمک ۳درصد (بسته به

نیاز) در مجاورت قسمت تحتانی قطعه ریخته می شود ومعمولا سیکل های خاص یخبندان اعمال می گردد و درصد کاهش وزن

بدست می آید. با توجهبه معیار خاص کاهش وزن در برابر تعداد خاصی سیکل یخبندان کیفیت دوامی قطعه کنترل می شود.

آزمایش تبلور نمک ها

برای بررسی تاثیر تبلور نمک ها بر دوام بتن، آزمایشخاصی پیش بینی نشده است، هرچند عامل مهمی در مناطق نیمه خشک و

خشک در تخریب سطحبتن ها محسوب می شود بویژه اگر املاح در بتن و یا آب و خاک وجود داشته باشد.

آزمایش دوام در برابر سولفات ها

برای بررسی دوام بتن در برابر سولفات ها آزمایشاستاندارد خاصی در ASTM و EN مشاهده نمی شود. همچنین به طریق اولی

معیارخاصی نیز وجود ندارد. پس از سالهای طولانی که از تشخیص خرابی بتن در اثر حملهمسولفات ها گذشته است هنوز آزمایش

خاص و معیار دوام بتن در برابر حمله سولفات ها و یا سولفات خاصی ارائه نشده است. سعی می شود با استفاده از سیمان مناسب، محدودیت نسبتآب به سیمان و یا عیار سیمان و یا استفاده از افزودنی های خاصی مانند پوزولان ها و سرباره ها و یا حباب زا و مواد آب بند کننده، دوام بتن را بالا برده اما نحوه تشخیص این افزایش دوام روشن نیست.

آزمایش کربناسیون

آزمایش ساده و معمول تعیین عمق کربناسیون تا چندی پیش صرفا بر اساس دستورالعمل RILEM CPC18 انجام می گردید که EN نیز به تازگی دستورالعمل استاندارد را مشابه RILEM ارائه کرده است. در این آزمایش عمق بتن کربناته شده با محلول فنلتالین به عنوان یک معرف اندازه گیری می شود. معمولا این آزمایش بر روی بتن سخت شده در شرایط محیطی واقعی اندازه گیری می شود که می توان تحت شرایطی نفوذ CO₂ را تسریع نمود. به هر حال هنوز معیار خاصی برای قدرت مقابله با کربناسیون و عمق نفوذ آن ارائه نشده است، هرچند می توان میزان نفوذپذیری گاز CO₂ در بتن را اندازه گیری نمود.

آزمایش انبساط ناشی از واکنش قلیایی ها با سنگدانه های بتن

معمولا بیشتر آزمایش ها در این زمینه بر روی ملات میباشد و یا شرایط خاصی همچون تشدید شرایط حاکم و یا افزایش قلیایی ها در ملات و یا محیط نگهداری را دارا می باشد. طبق استاندارد ASTM C1293 و تعدادی از استانداردهای کانادایی، انبساط بتن در شرایطی نزدیک به واقع اما در دمای ۳۸ یا ۶۰ درجه با رطوبت ۱۰۰ درصد را در زمانی طولانی تر از ۶ ماه و یا یک سال و بیشتر بدست می آورند. معیارهایی همچون انبساط ۰/۰۴ درصد پس از سه ماه در ۶۰ درجه سانتیگراد و یا پس از یک سال در ۳۸ درجه سانتیگراد ارائه شده است. به هر حال در این آزمایش انبساط بالقوه بتن بدست می آید. برای سنگدانه کربناتی از ASTM C1105 استفاده می شود و معیارهایی برای آن ارائه شده است.

آزمایش های سایش

در استاندارد ASTM برای بتن چهار آزمایش سایش ارائه شده است و برای برخی قطعات بتنی نیز از این آزمایش ها و یا آزمایش های دیگری استفاده می شود.

- ASTM C944 برای سایش بتنی ملات (روش سمباده چرخان)

- ASTM C418 برای سایش بتن (روش ماسه پاشی)

- ASTM C779 برای سایش سطوح افقی بتنی (سه روش صفحه مدور سمباده ای چرخان، چرخ استوانه ای دنداندار، بلبرینگ چرخان)

- ASTM C1138 برای سایش بتن (روش زیر آب)

به نظر می رسد در آزمایش های سایش دقت زیادی شده است تا نزدیکی بیشتری با واقعیت موجود باشد که تنوع آزمایش ها را سبب گشته است. در موارد مختلف برای هر نوع قطعه یا سطح در هر پروژها کاربرد خاص معیاری ارائه می شود که نشانه دوام بتن در برابر سایش است. در برخی استانداردهای دیگر آزمایش سایش چرخ عریض و آزمایش سایش Bohme پیش بینی شده است. برای مثال در استاندارد جداول بتنی این دو آزمایش پیش بینی شده است و معیار خاصی در هر مورد ارائه شده است.

آزمایش های نفوذپذیری

آزمایش های نفوذپذیری بتن در برابر آب و گازهای مختلفو حتی برخی سیال های خاص دیگر انجام می شود. آزمایش های نفوذپذیری بتن در برابر آب از گذشته دور بر اساس رابطه دارسی انجام می شده است. ارتش آمریکا و USBR آزمایش هایی را برای تعیین ضریب نفوذپذیری بتن در برابر آب ارائه کرده اند که بسیار مشکل است. در روش ارتش آمریکا (-CRC C163) فشار ۱۳ اتمسفر و در روش USBR 4913 فشار ۲۸/۵ بار بکار می رود. در این آزمایش ها مقدار k با بعد L/T بدست می آید. در هر پروژه مقدار حداکثر k مشخص می شود و لازم است بتن مورد نظر این خواسته را برآورد کند. بتن هایی که در حال حاضر برای پروژه های آبی ساخته میشود دارای نفوذپذیری پایینی است و عملا انجام این آزمایش و تعیین k بصورت مستقیم غیرممکن گشته است.

آزمایش های نفوذپذیری با گاز به ویژه اکسیژن روش های مختلفی دارد که معروف ترین آن مربوط به روش CemBureau (انجمن سیمان اروپا) می باشد که در RILEM و استاندارد ایتالیا (UNI) نیز آورده شده است. در این روش، نمونه قرصی شکل بتنی در محفظه‌ای با تیوبدورگیر تحت فشار قرار گرفته و در فشارهای مختلف اعمالی، دبی عبوری گاز بدست آمده و با رابطه اصلاح شده داری برای سیال تراکم پذیر، ضریب نفوذپذیری محاسبه می گردد. نتیجه این روش آزمایش به درصد رطوبت نمونه بتنی بسیار وابسته می باشد. به همین دلیل، در روش پیشنهادی این آزمایش، دو رژیم نمونه کاملاً خشک و با درصد رطوبت مشخص، پیشنهاد شده است. معیار میزان نفوذپذیری در برابر اکسیژن در مشخصات فنیداده می شود اما تلاش شده است بتن ها از این نظر تقسیم بندی شوند که در زیر دیده می شود.

جدول ۱- تقسیم بندی کیفیت بتن بر اساس نفوذپذیری بتن در برابر اکسیژن به روش CemBureau

کیفیت	عالی	خیلی خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف
ضریب نفوذپذیری (10^{-16} - 10^{-14} m ²)	کمتر از ۰/۱	۰/۵ - ۰/۱	۲/۵ - ۰/۵	۱۲/۵ - ۲/۵	بیشتر از ۱۲/۵

آزمایش های نفوذپذیری در برابر یون کلرید (آزمایش های انتشار یون کلرید)

کامل ترین راه برای تعیین ضریب انتشار یون کلرید در بتن طبق روش جدید ASTM C1556 که مشابه روش NTBuild 443 است، می باشد. در این روش بتن سخت شده در محلول نمک طعام با غلظت معین قرار می گیرد و در سنموردنظر پس از خشک کردن آن، با تعیین یون کلرید و در اعماق مختلف، ضریب انتشار یون کلرید بدست می آید که بعد از آن L^2/T است. برای بتن هر پروژه می توان ضریب انتشار خاصی را در نظر گرفت. بتن ها از این نظر به ویژه در شرایط رویارویی با یون کلرید تقسیم بندی میشوند که در زیر مشاهده می گردد.

جدول ۲- تقسیم بندی نفوذپذیری بتن بر اساس ضریب انتشار یون کلرید

طبقه بندی نفوذپذیری	شدید	متوسط	کم	ناچیز
ضریب انتشار یون کلرید (10^{-10} cm ² /s)	بیشتر از ۵	۱ تا ۵	۰/۲ تا ۱	کمتر از ۰/۲

یکی از پارامترهای منحصر بفردی که می توان به کمک آن و بهره گیری از اطلاعات و فرضیات دیگر در هر سنی غلظت یون کلرید پیش بینی نمود در هر عمقی به چه میزان است، ضریب انتشار یون کلر می باشد و بر این اساس زمان رسیدن غلظت یون کلرید در مجاورت میلگرد به حد آستانه تعیین می گردد که زمان شروع خوردگی رامشخص می کند. معمولاً از آنجا که تعیین این پارامتر دشوار است، سعی می شود بجای آن، پارامترهای دیگری مشخص شود و جایگزین آن گردد در حالی که عملاً نمیتوانند جای آن را بگیرند. یکی از آزمایش های رایج AASHTOT259 است که سطح بتن در معرض محلول کلرید قرار میگیرد و مقدار یون کلرید در سنین خاص و در عمق های خاص اندازه گیری می شود و عمق نفوذ یون کلرید بدست می آید که به کمک آن می توان کیفیت بتن ها را در مقایسه با یکدیگر ارزیابی نمود و می توان بتن ها را نیز از این نظر طبقه بندی کرد. به هر حال نتیجه این آزمایش از جنس نفوذپذیری نیست اما نفوذپذیری را نشان می دهد.

روش دیگر برای تعیین نفوذ سریع یون کلرید (مهاجرت) توسط دستور NTBuild 492 ارائه شده است که AASHTO T277 روش مشابه آن را ارائه کرده است. استاندارد ASTM C1202 روش را برای تعیین سریع نفوذپذیری کلرید در بتن سخت شده ارائه میدهد که در این روش در دو سمت یک قرص بتنی به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت ۵۰ میلیمتر محلول های کلرید سدیم و سود سوزآور با غلظت معین قرار می گیرد و جریان الکتریکی با اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت برقرار می شود و شدت جریان عبوری از بتن اشباع بدست می آید و طی ۶ ساعت، مقدار جریان عبوری از بتن بر حسب کولمب محاسبه می گردد که نشانه مقاومت بتن در برابر این جریان است و به عبارتی به نوعی به مقاومت الکتریکی مربوط میباشد. هرچه این جریان عبوری بیشتر باشد نشانه نفوذپذیری بیشتر بتن به ویژه در برابر یون کلرید است. طبقه بندی بتن ها را می توان طبق ASTM C1202 بصورت زیر دانست.

جدول ۳- نفوذپذیریدر برابر یون کلرید براساس میزان جریان عبوری

ناچیز	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	نفوذپذیری در برابر یون کلر
کمتر از ۱۰۰	۱۰۰ تا ۱۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰	بیشتر از ۴۰۰۰	میزان جریان عبوری (کولومب)

در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در محیط خلیج فارس دریای عمان (نشریه شماره ض ۴۲۸ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن) معیارهای زیر برایشرايط مختلف طبق روش ASTM C1202 ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیرمجاز میزان جریان عبوری در شرايط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

F و E, D	C و B	A	شرايط محیطی
حداکثر ۲۰۰۰	حداکثر ۳۰۰۰	حداکثر ۳۰۰۰	میزان جریان عبوری (کولومب)

به هرحال این آزمایش و نتایج آن محل تردید است. برخیمعتقدند که بهتر است اختلاف پتانسیل را کم کرده و مدت را متناسباً زیاد نمود تادمای بتن و محلول ها حین آزمایش بطور شدید بالا نرود و شرايط واقعی تری برقرارباشد. به هرحال این آزمایش طی یک روز منجر به اخذ نتیجه می شود و این امر بسیارمهم است.

آزمایش های عمق نفوذ آب

از آنجا که آزمایش های نفوذپذیری در برابر آب همراهبا چالش های فراوانی است، در برخی کشورهای اروپایی مانند آلمان آزمایش دیگری انجاممی شد که تحت فشار آب، در زمان معینی، عمق آب نفوذی در بتن بدست می آمد (DIN 1048-5). سپس در EN12390-8 با تغییرات مختصر، این آزمایش با سهولتبیشترا ارائه شد که در آن نمونه بتنی سه روز از سطح زیرین تحت فشار ۰/۵ MPa قرار می گیرد و سپسحداکثر عمق نفوذ آب بدست می آید که پارامتری در جهت ارزیابی نفوذ آب در بتن میباشد. در منابع مختلف طبقه بندی بتن ها در آزمایش DIN1048 آمده است اما هنوز این طبقه بندی برایآزمایش براساس روش EN ارائه نشده است. پراکندگی نتایج آزمون های مختلف یک نوع بتن در این آزمایش زیاد است و چندان قابلاعتقاد نمی باشد. در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیجفارس، معیارهای زیر برای شرايط مختلف محیطی حاکم ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیرمجاز عمق نفوذ آب در شرايط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

F و E, D	C و B	A	شرايط محیطی
حداکثر ۱۰	حداکثر ۳۰	حداکثر ۵۰	عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روز (mm)

به هرحال الزاما در شرايط واقعی، فشار تا این حد وجودندارد اما این آزمایش به نوعی تعیین کننده کیفیت بتن می باشد.

آزمایش های جذب آب

آزمایش های جذب آب به شکل های مختلفی وجود دارد کهمهم ترین آنها عبارتند از:

- جذب آب کوتاه مدت نیم یا یک ساعته (Early Water Absorption)

- جذب آب نهایی (بلند مدت) ۲ روزه یا بیشتر در شرايط عادی یا جوشانده شده (Final Water Absorption)

- جذب آب سطحی اولیه (Initial Surface Water Absorption Test) ISAT

- جذب آب مویینه (Water Sorptivity و Capillary Water Absorption)

هرکدام از این آزمایش ها یک ویژگی خاص از بتن را بهنمایش می گذارد و لازم است از هر آزمایش زمانی استفاده نمود که به واقعیت موجودشباهتی داشته باشد.

آزمایش جذب آب کوتاه مدت

در BS 1881 در سال های گذشته آزمون مکعبی خشک ۱۰۰ میلی لیتری در آب غرق می شود پس از یک ساعت درصد وزنی آب جذب شده بدست می آید که گزارش می شد. در BS 1881 part122 این آزمایش عمدتاً برای قطعات بتنی پیش

ساخته‌پس از مغزه گیری به قطر ۷۵ میلی‌متر انجام می شود که باید دارای طول معینی باشد و نمونه کاملاً خشک شده در آن غرقاب می شود و درصد جذب آب نیم ساعته بدست می آید. این آزمایش کیفیت سطحی بتن مورد نظر را بدست می دهد. در انگلیس کیفیت جداول بتنی و برخی قطعات پیش ساختهها این آزمایش کنترل می شود. برای مثال جذب آب نیم ساعته یک جدول نباید از ۲ درصد بیشتر باشد. در آزمایش های جذب آب کوتاه مدت حساسیتی به شکل و اندازه نمونه وجود دارد و نسبت سطح به حجم اهمیت دارد. در توصیه های CIRIA برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ و غیره، حداکثر جذب آب کوتاه مدت طبق BS 1881 را ۲ درصد طرح نموده است. در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس، معیارهای زیر برای شرایط مختلف محیطی حاکم به روش BS1881 part122 ارائه شده است.

جدول ۶- مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه مدت در شرایط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
درصد جذب آب (%)	حداکثر ۴	حداکثر ۳	حداکثر ۲

آزمایش جذب آب نهایی

هرچند در آزمایش جذب آب کوتاه مدت قدیمی و جدید BS 1881 می توان با تداوم آزمایش تا رسیدن به وزن ثابت، جذب آب نهایی را بدست آورد و حتی با جوشاندن آن در آب به جذب آب نهایی بیشتری دست یافت، اما در این دستور چنین پیش بینی صورت نگرفته است. در ASTM C642 مقدار جذب آب نهایی بدست می آید و می توان چگالی و تخلخل را نیز بدست آورد، حتی جوشاندن آب نیز پیش بینی شده است. در این استاندارد در مورد شکل و اندازه نمونه حساسیتی وجود ندارد اما حداقل جرم و حجم مشخص شده است زیرا به جذب نهایی پرداخته است و این آزمایش عمدتاً برای قطعات پیش ساخته بکار می رود. در استاندارد EN 1340 جذب آب نهایی قطعات پیش ساخته ای مانند جداول بتنی به چشم می خورد که حداقل حجم یا جرم نمونه مطرح شده است. در استانداردهایی همچون ASTM C497 جذب آب لوله های بتنی بدست می آید که دو روش A و B با توجه به نحوه خشک کردن و زمان جوشاندن نمونه در آب دارد. برای مثال در برخی استانداردهای قطعات پیش ساخته در ASTM C76 مانند لوله های بتن مسلح آب و فاضلاب، حداکثر جذب آب نهایی طبق ASTM C497 به میزان ۹ درصد برای روش A و ۸/۵ درصد برای روش B مطرح شده است و از این نظر می توان معیار و طبقه بندی برای کیفیت دوامی بتن ارائه نمود، بویژه اگر قطعه بتنی بصورت غرقاب باشد و آب همواره در مجاورت آن حضور داشته باشد. در استاندارد لوله های بتنی آب و فاضلاب ایران به شماره ۸۹۰۶ از چنین مشخصاتی استفاده شده است. در استاندارد EN 1340 در مواردی که شرایط یخبندان - آب شدگی حادی در برابر نمک های یخزدا وجود ندارد. حداکثر جذب آب نهایی ۶ درصد برای جداول بتنی پیش ساخته ارائه شده است. در برخی مشخصات استاندارد قطعاتی مانند بلوک سیمانی و موزاییک و آجرهای سیمانی به جذب آب نهایی پرداخته شده است.

آزمایش جذب آب سطحی اولیه

این آزمایش عمدتاً در BS1881 part5 پیش بینی شده است. در این آزمایش سعی می شود مقدار جذب آب ریخته شده روی سطح افقی نمونه بتنی یا قسمتی از قطعات پیش ساخته در حالی که ارتفاع آب چندان برای اعمال فشار وجود ندارد و به میزان ۲۰۰ میلی‌متر محدود شده است. در این آزمایش در فواصل زمانی مختلف مقدار آب جذب شده بر حسب گرم یا میلیلیتر بر واحد سطح (m^2) گزارش می شود. طبقه بندی کیفی بتن ها در این آزمایش را می توان بصورت زیر مطرح کرد. در انگلیس از نتایج این آزمایش استفاده می شود اما در آییننامه پایایی بتن ایران در حاشیه خلیج فارس و یا در استانداردهای قطعات پیش ساخته مانند جداول مورد اقبال قرار نگرفته است. به هر حال این آزمایش برای موادی که باعث آب بندی سطحی می شوند می تواند با موفقیت بکار رود و کیفیت سطحی را به نمایش گذارد.

جدول ۷- تقسیمبندی جذب سطحی بتن با معیار جذب سطحی اولیه (mL/m²/s)

میزان جذب	زمان پس از شروع آزمایش			
	۱۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۱ ساعت	۲ ساعت
زیاد	بیشتر از ۰/۵۰	بیشتر از ۰/۳۵	بیشتر از ۰/۲۰	بیشتر از ۰/۱۵
متوسط	۰/۲۵ - ۰/۵۰	۰/۱۷ - ۰/۳۵	۰/۱۰ - ۰/۲۰	۰/۰۷ - ۰/۱۵
کم	کمتر از ۰/۲۵	کمتر از ۰/۱۷	کمتر از ۰/۱۰	کمتر از ۰/۰۷

جذب آب مویینه

یک ساز و کار جذب آب، حرکت آب به صورت نم مویینه روبه بالا می باشد که نیاز به انجام آزمایش خاص و هماهنگ با این ساز و کار احساس میشود. در این آزمایش ها معمولا مقدار آب جذب شده در واحد سطح، ارتفاع نم مویینه و آهنگ جذب آب مویینه تعیین و گزارش می شود که در همهدستورها بصورت یکسان نیست و به برخی از این پارامترها پرداخته می شود. دستور آزمایش RILEM CPC11.2 از جمله دستور آزمایش های قدیمی در این زمینه است که سالها مورد استفاده قرار گرفته است. اخیرا دستور استاندارد ASTM C1585 ارائه شده است که با دقت بیشتری شرایط آزمایش و شکل آزمون را مشخص نموده است. در این آزمایش از یک قرص بتنی به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۵۰ میلیمتر استفاده می شود که بخش تحتانی آن ۱ تا ۳ میلیمتر در آب قرار گرفته است و رطوبت محیط اطراف نمونه نیز کنترل می گردد و در نهایت، آهنگ جذب آب مویینه در بازه های زمانی مختلف بدست می آید. هنوز طبقه بندی خاصی در مورد کیفیت بتن ها توسط این آزمایش مطرح نشده است و آنچه در زیر مشاهده می شود عمدتا مربوط به آزمایش های انجام شده بر اساس دستور RILEM می باشد.

جدول ۸- محدوده پذیرش جذب آب مویینه بتن با دوام

کیفیت بتن	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف
جذب آب (mm/h ^{-0.5})	کمتر از ۰/۱	۰/۱ تا ۰/۱۵	۰/۱۵ تا ۰/۲	۰/۲ تا ۰/۲۵	بیشتر از ۰/۲۵

هرچند ساز و کار برخی خرابی ها در ایران و حتی جنوبکشور مربوط به جذب آب مویینه است، اما در دستورهای استاندارد ایران این آزمایش برای بتن جایگاهی ندارد و طبعا مشخصات استاندارد و محدودیت خاصی نیز مطرح نگردیده است.

آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

سهولت یا سختی عبور جریان الکتریکی از بتن اشباع میتواند نشانه ای از نفوذپذیری آن در برابر آب و به ویژه انتشار و مهاجرت یونی (بهویژه یون کلرید) باشد مخصوصا اگر از آب نمک اشباع گردد.

این آزمایش بین پژوهش گران بسیار معروف و رایج است اما دستور استاندارد خاصی برای آن تدوین نشده است. این آزمایش با استفاده از دو صفحه مسی یا برنجی که بر سطح آزمون بتنی اشباع از آب به کمک خمیر سیمان تازه می چسبند و مقاومت الکتریکی به کمک اعمال یک جریان متناوب با فرکانس مشخص بدست می آید و می توان با داشتن سطح بتنی فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی را بدست آورد. همچنین می توان با چهار الکتروود (روش ونر) و تعبیه آن بر سطح بتن یا در سوراخ خاص و برقراری اتصال و تماس الکتریکی، مقاومت الکتریکی و مقاومت ویژه آن را بدست آورد. این روش برای قطعات بتنی موجود نیز قابل استفاده است، در حالی که روش قبلی فقط برای آزمون های آزمایشگاهی مکعبی، استوانه ای یا منشوری و مکعب مستطیل کاربرد دارد. در راه انجام این آزمایش مشکلات و مباحث خاصی مطرح میشود که عبارتند از:

-میزان رطوبت و اطمینان از اشباع بودن بدلیل تاثیر شدید بر مقاومت الکتریکی بتن

-نوع جریان و فرکانس مصرفی بدلیل تاثیر آن بر نتایج حاصله

-نقش شکل و اندازه نمونه بر نتایج حاصله

-نقش روش آزمایش (الکتروود چهارگانه یا صفحات)

-نقش افزودنی های شیمیایی بر نتایج

-نقش مقاومت الکتریکی سنگدانه های بتن بر نتایج

به هرحال لازم است با محدود کردن تغییرات احتمالی دستور استاندارد واحدی را تدوین کرد و بتن ها را از این نظر مقایسه نمود و طبقه بندی کرد. طبقه بندی زیر که معیاری جهت ارزیابی بتن محسوب می شود، ارائه شده است.

جدول ۹- تقسیم بندی احتمال خوردگی میلگرد براساس آزمایش مقاومت الکتریکی

ناچیز	کم	زیاد	خیلی زیاد	احتمال خوردگی میلگرد
بیش از ۲۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	۵۰ تا ۱۰۰	کمتر از ۵۰	مقاومت ویژه الکتریکی بتن (اهم-متر)

برای افزایش دوام سازه های بتن آرمه ، توصیه می شود موارد زیر در هنگام ساخت رعایت گردد :

۱. شستشوی مصالح سنگی برای کاهش مقدار رس و شیل
۲. وجود عناصر مخرب مانند کلریدها و سولفاتها در مصالح در حد مجاز طبق آئین نامه ها
۳. انتخاب نوع مناسب سیمان و مواد افزودنی معدنی و شیمیایی
۴. استفاده از میلگردهای بدون زنگ یا با زنگ بسیار کم
۵. سرد کردن مصالح مصرفی بتن بخصوص آب مخلوط
۶. کاهش زمان انتقال بتن برای جلوگیری از افت اسلامپ
۷. محافظت و عمل آوری مطلوب

وام بتن به عدم از دست دادن خواص فیزیکی و مهندسی بتن در درازمدت گفته می شود. مصالح با دوام به دلیل کاهش هدر رفت و ضایعات و استفاده بهینه از منابع به محیط زیست کمک می کند. نگهداری و تعمیرات مصالح بدون دوام مناسب باعث از بین رفتن منابع طبیعی و همچنین افزایش آلودگی آب و هوا می گردد.

یک بتن با دوام می بایست در برابر شرایط آب و هوایی مختلف، مواد شیمیایی، و سایش مقاومت لازم را داشته باشد. با توجه به شرایط محیطی و خواص مورد نیاز از بتن، مشخصات دوام هر بتن تعیین می گردد. از فاکتورهایی که دوام بتن را تعیین می کنند، می توان موارد زیر را نام برد:

- مواد تشکیل دهنده بتن
- نسبت مواد تشکیل دهنده به یکدیگر
- فعل و انفعالات بین مواد تشکیل دهنده
- شیوه بتن ریزی
- شیوه عمل آوری (کیورینگ) بتن تازه
- شرایط محیط بهره برداری

در ادامه به بررسی دوام بتن در برخی شرایط محیطی می پردازیم:

رطوبت بالا و باران

به دلیل نبود مواد ارگانیک در بتن، رطوبت معمولاً تاثیر زیادی در زوال بتن ندارد. مگر اینکه رطوبت و آب باران به همراه خود مواد شیمیایی مانند کلر و یا سولفات داشته باشند. رطوبت در حد معمول از بتن عبور نمی کند مگر اینکه درز بین قطعات بتنی به درستی عایق نشده باشد. بازدید سالیانه و ترمیم درز بین قطعات بتنی، پتانسیل عبور رطوبت به داخل ساختمان را کاهش می دهد.

مقاومت در برابر اشعه ماورای بنفش

اشعه ماورای بنفش تاثیری بر زوال بتن ندارد. اگر برای زیبایی، سطح بتن را می خواهید رنگ کنید بهتر است به جای آن از افزودنی رنگی (پیگمنت) هنگام درست کردن بتن تازه استفاده نمایید. رنگ افزودنی که هنگام اختلاط بتن به آن اضافه می شود به مراتب دوام بیشتری نسبت به رنگ معمولی دارد که بعد از سخت شدن بتن روی سطح آن مالیده می شود.

حشرات موذی

حشرات موذی نمی توانند آسیبی به بتن وارد نمایند. به دلیل سختی و پر بودن بتن، این حشرات نمی توانند در بتن نفوذ کنند و یا آن را بخورند.

مقاومت در برابر یخ زدگی و ذوب شدن یخ

این عامل از بین عوامل آب و هوایی بیشترین تاثیر را بر زوال بتن دارد. مخصوصاً زمانی که بتن خیس باشد و مواد شیمیایی یا نمک جهت ذوب زودتر یخ حضور داشته باشند. هنگام یخ زدن آب، حجم آن زیاد می شود و باعث افزایش حجم خمیر سیمان و سنگدانه های درون بتن می شود. در نتیجه بتن ترک می خورد.

در صورتی که شما در مکانی بتن ریزی می کنید که در معرض رطوبت و سرمای زیر صفر خواهد بود، توصیه می شود هنگام اختلاط بتن به آن افزودنی حباب ساز اضافه نمایید. افزودنی حباب ساز باعث تولید حباب های هوای بسیار ریز و یکنواخت در سرتاسر بتن می گردد. در نتیجه هنگامی که آب درون بتن یخ می زند و حجم سیمان و سنگدانه های آن زیاد می شود، حباب های هوا این افزایش حجم را در خود جای میدهند و مانع از افزایش تنش درون بتن می گردند.

همچنین نسبت آب به سیمان بتن نیز می تواند در مقاومت بتن در برابر یخ زدگی تاثیر گذار باشد. بتن با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰,۴ به مراتب دوام بیشتری نسبت به بتن با آب به سیمان بیشتر از ۰,۵ دارد. در نتیجه، بتن با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰,۴ و همچنین ۵ تا ۸ درصد حباب هوای ریز و یکنواخت در سراسر بتن می تواند در برابر چرخه های یخ زدگی و ذوب یخ، دوام بسیار بالایی داشته باشد.

مقاومت در برابر مواد شیمیایی

بتن در برابر بیشتر محیط های طبیعی و تعداد زیادی از مواد شیمیایی مقاوم است. به همین منظور، بتن معمولاً به منظور ساخت مجاری فاضلاب استفاده می شود.

با این وجود، موادی نیز هستند که می توانند باعث زوال بتن گردند مانند سولفات، کلر و مواد اسیدی. در چنین محیط هایی می بایست از بتن با نفوذپذیری پایین و همچنین عایق بندی سطح بتن استفاده نمود.

مقاومت در برابر حمله سولفاتی

مقدار زیاد سولفات در آب و یا خاک می تواند بتن را تخریب نماید. سولفات و ترکیبات آن مانند سولفات کلسیم، سولفات سدیم، و سولفات مگنزیوم می توانند به بتن حمله کنند و با ترکیبات هیدرات درون خمیر سیمان بتن واکنش شیمیایی دهند. این تغییرات شیمیایی به مرور باعث تجزیه بتن می گردد. همچنین نمک سدیم نیز می تواند باعث تخریب بتن شود. ترکیبات ناشی از سولفات و یا نمک در مکانهایی که سیکل رطوبت و خشکی در آنها تکرار می شود، به مراتب بیشتر از مکانهایی است که محیط آن پیوسته مرطوب است. برای محافظت بتن در برابر حمله سولفات می بایست از بتن با نسبت آب به سیمان پایین تر از ۰,۴۵ در شرایط ملایم و ۰,۴ در شرایط شدید استفاده نمود. همچنین می بایست از سیمان مخصوص مقاوم در برابر سولفات استفاده نمود.

بتن در تماس با آب دریا

بتن در تماس با آب دریا در گذشته استفاده شده است و توانسته است برای دهه ها دوام بیاورد. با این وجود، می بایست طرح اختلاط بتن و مواد تشکیل دهنده آن با دقت انتخاب شود. سازه بتنی که در قسمت جزر و مد دریا قرار دارد و یا امواج آب به آن برخورد می کند و چرخه رطوبت و خشکی یا چرخه یخ زدگی و ذوب شدن یخ در آن تکرار می شود بسیار آسیب پذیر تر است. باید از بتن با نفوذپذیری پایین استفاده شود تا از حمله سولفات و کلر موجود در آب دریا جلوگیری شود. سیمان مخصوص مقاوم

در برابر حمله سولفاتی میتواند بسیار کمک نماید. پوشش مناسب روی آرماتور باید رعایت شود و نسبت آب به سیمان باید کمتر از ۰,۴ باشد.

مقاومت در برابر کلر و زنگ زدگی آرماتور فولادی

کلر برای بتن خالی از آرماتور فولادی مشکلی به وجود نمی آورد. در بتن مسلح به واسطه قلیایی بودن محیط بتن، آرماتور در برابر خوردگی محافظت می شود. پی اچ بالای ۱۲,۵ بتن باعث ایجاد یک لایه محافظتی روی آرماتور می شود. ولی کلر موجود در آب دریا و یا مواد ضد یخ باعث از بین رفتن لایه محافظتی می گردد. بعد از بین رفتن لایه محافظتی، فرایند خوردگی فولاد ایجاد می گردد. برای افزایش دوام بتن در برابر حمله کلر می توان از موارد زیر استفاده نمود:

- نسبت آب به سیمان پایین تر از ۰,۴ در طرح اختلاط بتن
- حداقل هفت روز عمل آوری (کیورینگ) بتن در شرایط مرطوب
- افزودنی هایی مانند فوم سیلیکا جهت کاهش نفوذپذیری
- افزایش ضخامت پوشش بتنی روی آرماتور
- افزودنی های جلوگیری کننده از خوردگی فولاد
- آرماتور با پوشش اپوکسی
- عایق بندی سطح بتن
- حفاظت کاتدی

مقاومت در برابر واکنش قلیایی سیلیس

برخی از انواع سیلیس در سنگدانه ها ممکن است با پتاسیم و سدیم موجود در سیمان واکنش داشته باشند. این واکنش ممکن است باعث افزایش حجم شود که در نتیجه آن:

- بتن ممکن است ترک بخورد
- درزها و اتصالات ممکن است بسته شوند و یا کلا تغییر شکل دهند و شکننده شوند
- بخش هایی از سازه جابجا شود
- این واکنش می تواند از طرق زیر کنترل شود:
- انتخاب مناسب سنگدانه ها
- افزودنی هایی مانند خاکستر بادی، سرباره سیمان، و افزودنی های لیتیومی

مقاومت در برابر سایش

بتن در شرایط محیطی عادی مقاومت نسبتاً خوبی در برابر سایش دارد. شرایط محیطی شدید مانند ذرات معلق در آب با سرعت بالا و یا استفاده از زنجیر چرخ و لاستیک فلز دار می تواند دوام بتن را در برابر سایش کاهش دهد. مقاومت در برابر سایش نسبت مستقیم با مقاومت فشاری بتن دارد. در محیط های شدید تحقیقات نشان می دهد که بتن با مقاومت فشاری ۸۴۰ تا ۱۳۳۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقاومت مناسبی در برابر سایش دارد.

دوام بتن

پایایی یا دوام بتن ساخته شده از سیمان پرتلند، به توانایی بتن برای مقابله با عوامل جوی، حملات شیمیایی، سایش، فرسایش و هرگونه فرآیند منجر به تخریب اطلاق می شود. عمر خدمت دهی طولانی ف مترادف با دوام در نظر گرفته می شود. از آنجا که دوام، تحت یک مجموعه شرایط، لزوماً به معنای دوام تحت مجموعه شرایط دیگری نمی باشد، به همین دلیل متداول است که هنگام تعریف دوام، اشاره ای کلی به محیط نیز می شود. برطبق تعریف کمیته ۲۰۱ انستیتوی بتن آمریکا {۲}، دوام بتن با سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقاومت در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و با هر فرایندی که موجب آسیب دیدگی آن بشود. گفته می شود. بنابراین، بتن با دوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت دهی خود را در شرایط اش حفظ

کند. هیچ مصالحی بطور ذاتی بادوام نیست، در نتیجه عوامل محیطی، ریز ساختار مصالح و متعاقب آن، خواص این مصالح با گذشت زمان تغییر می کند. یک ماده، وقتی به انتهای عمر خدمت دهی خود می رسد که خواص آن، تحت شرایط مفروض استفاده از آن، به حدی آسیب دیده باشد که ادامه استفاده از آن، ناایمن یا غیر اقتصادی شناخته شود. در حال حاضر، در طراحی سازه ها، مشخصات دوام مصالح مورد نظر، همانند سائز مشخصات و ویژگی های آن، نظیر، همانند سایر مشخصات و ویژگی های آن، نظیر خواص مکانیکی و هزینه و قیمت اولیه، مورد ارزیابی قرار می گیرد. دوام، علاوه بر ابعاد فنی، از نقطه نظر تاثیرات اقتصادی و اجتماعی آن نیز مد نظر قرار می گیرد. افزایش روز افزون هزینه های تعمیر یا جایگزینی سازه ها، ناشی از خرابی مصالح بخش عمده ای از کل هزینه ساخت و ساز را به خود اختصاص می دهد و لذا لازم است مه به مسئله دوام توجه کافی شود. برای بررسی **دوام بتن** و **سازه های بتنی** باید به نکته توجه شود که اغلب معلومات ما درباره فرآیند های فیزیکی - شیمیایی مسبب آسیب دیدگی بتن از روی تاریخچه خای سازه های واقعی به دست می آید، زیرا شبیه سازی ترکیب اثرات دراز مدتی که معمولاً در واقعیت وجود دارند در آزمایشگاه مشکل می باشد. با این وجود، در عمل بندرت **آسیب دیدگی بتن**، ناشی از یک علت منحصر به فرد است. گاهی، علل فیزیکی و شیمیایی خرابی آن قدر با هم تداخل دارند و موجب تشدید یکدیگر می شوند که اغلب، حتی جدا کردن علت از معلول نیز امکان پذیر نیست. با این توضیحات می توان گفت، **دوام بتن** عبارت است از توانایی و پتانسیل آن برای **مقاومت بیشتر**، چه به لحاظ کمی و چه به لحاظ کیفی، در برابر عواملی که می توانند موجب آسیب رسانی، از بین بردن امکان بهره برداری و یا کاهش بهره برداری و یا کاهش بهره برداری از آن بشوند. به عبارت دیگر، دوام بتن به معنای حفظ و تداوم کیفیت ها و توانایی ها و ویژگی های **بتن** در طی زمان و خارج نشدن این ویژگی ها از محدوده مجاز است.

دوام و پایایی بتن چیست؟

دوام یا پایایی بتن متناظر با سن یا عمر خدمت رسانی آن در شرایط محیطی مشخص به شمار می آید. بدیهی است با تغییر شرایط محیطی حاکم بر بتن، مفهوم دوام بتن تغییر می کند. طبق تعریف ACI 201، دوام بتن حاوی **سیمان پرتلند** به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که به آسیب دیدگی می انجامد، گفته می شود. بنابراین، بتن پایا بتنی است که تا حدود زیادی شکل اولیه و کیفیت و قابلیت خدمت رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ نماید. اکنون لزوم منظور نمودن مشخصات دوامی مصالح مصرفی در سازه ها همانند مشخصات مکانیکی پذیرفته شده است که همراه آن هزینه نیز منظور می گردد. افزایش فزاینده هزینه های **تعمیر و بازسازی سازه های آسیب دیده** ناشی از تخریب مصالح مصرفی، بخش قابل توجهی از هزینه ساخت سازه ها را به خود اختصاص می دهد. برآورد می گردد در کشورهای پیشرفته صنعتی بیش از ۴۰ درصد کل منابع پولی صنعت ساختمان در بخش تعمیر و نگهداری سازه های موجود، و کمتر از ۶۰ درصد آن برای ایجاد سازه های جدید خرج می گردد. این موارد ما را بر آن می دارد که موضوع دوام مصالح مصرفی بویژه بتن را جدی بگیریم. علاوه بر هزینه، موضوع حفظ محیط زیست و آلودگی هوا و خاک و آب کره زمین و حفظ منابع خدادادی طبیعی این کره خاکی، ما را مجبور به با دوام تر ساختن بتن می نماید. سازه هایی همچون رویه های بتنی راه، فرودگاه و پارکینگ ها، بتن های سیلوهای غلات و سیمان و سایر مصالح معدنی، پلهای راه و راه آهن، باراندازها و اسکله های بتنی و پلهای ارتباطی آن، مخازن آب یا نفت و گاز مایع و غیره، جداول بتنی و قطعات نیوجرسی، **قطعات پیش ساخته ای** همانند تراورس و لوله های بتنی آب و فاضلاب، سازه های بتنی فراساحلی، سدهای بتنی و سرریزها، پوشش بتنی پیش ساخته و درجا برای تونل های راه و راه آهن و انتقال آب، سازه های بتنی تصفیه خانه های آب و فاضلاب، سازه های بتنی راکتورهای اتمی و تاسیسات وابسته به آن، کانالهای انتقال آب و آبروهای بتنی، دودکش ها و برج های مخابراتی بتنی، ساختمانها و بناهای مسکونی، تجاری، اداری و آموزشی، فرهنگی و ورزشی، نیروگاه های آبی، گازی و حرارتی، برجهای خنک کن باز و بسته نیروگاه های حرارتی، سازه های مرتبط با صنایع مختلف مانند سیمان، نفت و گاز، فولاد، شیشه و صنایع مختلف کشاورزی و غذایی، ساخت قطعات پیش ساخته غیرمسلح یا مسلح برای حفاظت از موج شکن ها و تاسیسات بندری و غیره از جمله مواردی است که مصرف بتن با دوام و قطعات بتنی با عمر زیاد را می طلبد. هرچند از دیرباز مسئله دوام مصالح ساختمانی اهمیت داشته است اما بعد از جنگ جهانی دوم و بویژه از دهه ۷۰ میلادی به موضوع دوام بتن بیش از پیش پرداخته شده است و مرتباً بر

اهمیت آن افزوده می شود. گستره دوام بتن به مراتب وسیع تر از موضوع مقاومت آن می باشد. تعیین مقاومت بتن به ویژه مقاومت فشاری آن امری است که طی سالیان گذشته به مدت بیش از ۱۰۰ سال به انجام رسیده است و به نظر می رسد حاوی نکات پیچیده ای نباشد، هرچند دارای جزئیات خاصی است و به هرحال در سن خاصی در کوتاه ترین زمان ممکن اندازه گیری می شود. اما در مورد دوام پیچیدگی بیشتری بدلیل ساز و کارهای متفاوت و آزمایش های گوناگون وجود دارد.

طبقه بندی ساز و کار دوام و آزمایش های آن

دوام بتن ابعاد مختلفی دارد.

- پایایی در برابر عوامل فیزیکی (آتش، یخبندان و آب شدگی پی در پی، تبلور نمک ها)
- پایایی در برابر تهاجم شیمیایی (سولفات ها، کربناسیون، تاثیر واکنش قلیایی ها با سنگدانه ها بر بتن)
- پایایی در برابر عوامل مکانیکی (سایش، خلزایی، ضربه)
- تخریب در اثر خوردگی میلگرد

پی بردن به دوام بتن در شرایط مختلف نیاز به قرار گرفتن در این شرایط و طی شدن زمان قابل توجه دارد و معمولاً امکان انجام تحقیق در شرایط واقعی وجود ندارد و یا از حوصله دست اندرکاران خارج است. برای اینکه مشخص شود یک بتن در چنین شرایطی بطور مناسب و مطلوب عمل می کند نیاز به آزمایش هایی کوتاه مدت دارد که در این آزمایش ها عوامل تهاجمی یا اعمالی تشدید می شود (تسریع شده) و یا آزمایش بصورت تسریع نشده و در شرایط معمولی انجام می گردد که در این حالت دوم معیار مقایسه تغییر می کند. گاه برخی آزمایش های کوتاه مدت مرتبط با دوام و در معرض عاملی غیر از عامل مورد نظر مورد استفاده قرار می گیرد و با توجه به تجربیات موجود در پروژه های واقعی و در کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی معیارهایی ارائه می شود.

نمونه ای از آزمایش های کوتاه مدت تسریع شده در برابر عامل تشدید شده مورد نظر، سایش یا آزمایش ASTM C1293 می باشد. نمونه ای از آزمایش تسریع نشده کوتاه مدت در شرایط تشدید نشده را می توان آزمایش یخبندان و آب شدگی دانست. از میان آزمایش های کوتاه مدت مرتبط با دوام که در معرض عامل اصلی مورد نظر قرار نگرفته است می توان آزمایش جذب آب یا جذب آب مویینه را نام برد. شاید بتوان آزمایش های جمع شدگی را نیز مرتبط با دوام دانست. آزمایش های تراوایی (نفوذ پذیری) نیز مرتبط با دوام به حساب می آید.

عوامل مؤثر بر دوام سازه های بتنی در محیط دریایی

خرابی سازه های بتنی مسلح در محیط های دریایی، غالباً بر اثر نفوذ یونهای کلرید از خارج به داخل بتن و رسیدن آن به میزان لازم در سطح میلگردها، خوردگی آنها و ترک و ریختن بتن صورت می پذیرد. با توجه به اینکه دوام بتن مسلح وابستگی به پوشش بتنی روی میلگرد به عنوان محافظ اصلی میلگردها دارد، لذا می توان عوامل تأثیرگذار بر دوام را مشخص تر نمود. این عوامل عمدتاً شامل نوع بتن، ضخامت پوشش بتن روی میلگرد، اجرای بتن و شدت عوامل محیطی است. نوع بتنی که برای حفاظت میلگردها بکار می رود، تأثیر عمده ای بر دوام دارد، زیرا این مصالح تشکیل دهنده است که سرعت نفوذ یونهای مخرب از پوشش بتنی را کنترل می کند. اغلب دستورالعملها و مشخصات، تاکنون، پدیده نفوذ را یک پدیده فیزیکی انگاشته و با کنترل نمودن مقاومت و رده بتن و گاه نفوذ پذیری، دوام را در نظر گرفته اند، در حالی که این پدیده توأم نفوذ و ترکیب و انجام واکنشها را در مخلوطهای مختلف بتنی نشان می دهد و پاره ای از مخلوطها و مواد داخل بتن نظیر پوزولانها قدرت پیوند بیشتر با یونهای کلرید را داشته و مقاومت به نفوذ آنها از سیمانهای معمولی بیشتر است. پوشش بتنی مناسب و کافی و تأمین آن در عمل نیز از عوامل مهمی است که می تواند سبب افزایش دوام بتن در محیطهای خورنده شود. برای ایجاد حفاظت کافی میلگردها در محیط های دریایی و خورنده، ضخامت پوششهای ۵۰ تا ۷۵ میلیمتر در اغلب آیین نامه ها توصیه شده است. ضخامت های کم پوشش حتی با بتن های با کیفیت مناسب می تواند غیر مطمئن بوده و درجه خطر پذیری را افزایش دهد، زیرا ایجاد ترک می تواند راه عبور یونهای مخرب را هموار سازد. همچنین تأمین ضخامت پوشش بیش از ۷۵ میلیمتر بویژه در قطعات خمشی می تواند سبب ایجاد و افزایش عرض ترکها گردد و اغلب تأمین آن نیز عملی نیست. اجرای نامناسب و ضعیف بتن بویژه در ارتباط با ریختن، تراکم و عمل آوری آن می تواند مزایای

طراحی خوب و انتخاب مصالح مناسب را بی اثر سازد و دوام مورد نظر به هیچوجه تأمین نگردد. نتایج عملی اجرای خوب و عمل آوری مناسب در بهبود خواص بتن پوشش و دوام سازه‌های بتنی به اثبات رسیده است. البته پیشنهادهایی در مشخصات فنی و بعضی آیین نامه‌ها برای کنترل مسائل اجرایی فوق در کارگاهها ارائه شده است، ولی هنوز سیستم نظارت کافی حین ساخت و روشهای مناسب کنترل و تطبیق با مشخصات اعمال نمی‌گردد. عدم توانایی در کنترل و تأمین کیفیت مناسب بتن به طور مستمر، در عمل، دلیل بارز ادامه روند خرابیها در سازه‌های بتنی و کاهش دوام آنها می‌باشد. از مسائل مهمی که در طراحی بر اساس دوام یک سازه بتنی باید در نظر گرفته شود، شرایط محیطی است که سازه در آن قرار می‌گیرد. به علت تغییرات این شرایط حتی در مقیاس کوچک و به صورت موضعی خرابی می‌تواند در بعضی از عناصر سازه بتنی با سرعت بیشتری آغاز گردد. جهت فرارگیری و موقعیت سازه و آثار رطوبتی و دما و نیز یونهای مخرب موجود در جو، همگی در خرابی تأثیر دارند. یک عضو سازه‌ای در مناطق ساحلی دریا می‌تواند در حالت‌های کاملاً مغروق، تروخشک، پاشش و محیط خشک کنار ساحل در فواصل مختلف قرار گیرد و در نتیجه قسمتهای مختلف عضو در مقابل خوردگی آب و محیط دریایی واکنشهای مختلف نشان دهند. در خصوص آثار محیطی، سالهاست که در کشورهای مختلف برای تعیین عوامل مؤثر در خرابی و تقسیم بندی نواحی و محیط تحقیقاتی صورت گرفته و در حال حاضر در پاره‌ای از دستورالعملها و آیین نامه‌ها تقسیم بندی فوق بر اساس شدت مسئله زوال و خوردگی در بتن و فولاد انجام گرفته است. در استاندارد اخیر اروپا، بر اساس مکانیزم خرابی و شدت آن در بتن و فولاد موجود در بتن، طبقه بندی محیطی صورت گرفته و بر پایه خوردگی بر اثر یون کلرید به عنوان مهمترین نوع اثر محیطی و خرابی بتن بر اثر پدیده‌های دیگر همچون حملات شیمیایی، تقسیمات انجام شده است. با توجه به گستردگی و تغییرات شرایط محیطی دریایی هنوز یک سیستم تقسیم بندی محیطی جامع و منطقی که بیانگر شدت عوامل محیطی و تأثیر آن بر خوردگی است، لازم است تدوین گردد.

آزمایشهای تعیین دوام

از آنجا که نفوذ یونها و گازها و مایعات از سطح بتن به داخل آن مهمترین مشخصه تعیین دوام سازه‌های بتنی در شرایط مختلف از جمله محیط های دریایی می‌باشد، آزمایشها و روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری این انتقال و نفوذ در بتن ارائه شده است. پیچیدگی آزمایشها، وسائل و دستگاه‌های پیچیده و مدرن، اندازه‌گیریهای مختلف و طولانی بودن آزمایشها، از مشکلات عمده این روشها برای مدل کردن سازوکار نفوذ بوده است. با همه اطلاعات مفیدی که از بعضی از این روشها در آزمایشگاه و در تحقیقات به دست آمده است، در عمل، به علت محدودیتهای نحوه آزمایش، هنوز اکثر آنها جایی باز نکرده‌اند. در اندازه‌گیری نفوذپذیری و تعیین نشانه و ضریب دوام باید آزمایش و یا آزمایشهای پیشنهادی، نظیر آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن، ساده و قابل اجرا در آزمایشگاه و گاه در محل باشد. از خصوصیات دیگر این روشهای آزمایش می‌توان به خواصی چون مربوط بودن آزمایش به مسائل نفوذ یونها و مایعات با پایه تئوریک منطقی، سریع و ساده بودن و عدم نیاز به مهارت‌های خاص، تکرارپذیری و انحراف معیار کم نتایج، آماده سازی حداقل آزمونها قبل از آزمایش و سادگی آن و بالاخره انجام شدن آن در سنین اولیه اشاره نمود. از آزمایشهای پیشنهادی تعیین نفوذ و نفوذپذیری، گروهی به جذب آب و نفوذ آب تحت فشار، گروهی به نفوذ گازها و اکسیژن و گروهی به نفوذ یا هدایت یون کلرید در حالت‌های معمول و تسریع شده اختصاص یافته است. در همه این آزمایشها مشخصه‌های فیزیکی و پارامترهای لازم، اغلب در کوتاه مدت برای اعمال مسئله دوام تعیین می‌گردد. آزمایشهای مستقیم دوام با روشهای تسریع شده و درازمدت قدم بعدی است که می‌تواند به عنوان معیارها و نشانه‌هایی برای تخمین دوام و طراحی بر اساس دوام صورت پذیرد. به علت طولانی بودن زمان خرابیها در بتن، آزمایشهای تسریع شده لازم می‌باشد. معهدا از آنجا که ممکن است سازوکار خرابی در آزمایشهای تسریع شده و دراز مدت در شرایط واقعی تفاوت‌هایی داشته باشند، آزمایشهای دراز مدت نیز ضروری است. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشهای کوتاه مدت و آزمایشهای دراز مدت می‌توان ارتباط بین آنها را برای حالت‌های مختلف تعیین نمود و در طراحیهای بعدی با آزمایشهای کوتاه مدت، معیار دوام را در نظر گرفت.

دستورالعمل اعمال پارامتر دوام در طراحی سازه‌های بتنی مسلح در کوتاه مدت

با توجه به ساخت و سازهای روزافزون در مناطق جنوبی و حاشیه دریای عمان و خلیج فارس و لزوم در نظرگیری دوام بتن، معیارهای زیر در کوتاه مدت لازم الاجراست. این معیارها بر اساس در نظر گرفتن پارامتر مهم نفوذپذیری بتن در مقابل مایعات و یونهای مخرب

بویژه یون کلرید عنوان شده است. از آنجا که پدیده حاکم در این مناطق، نفوذ یون کلرید و خوردگی میلگرد است، اعمال این معیارها می‌تواند افزایش دوام سازه‌های بتنی را به همراه داشته باشد. اساس انتخاب این روشها و معیارهای مربوطه کارهای انجام شده در مناطق جنوبی کشور و نیز پیشنهادهای ارائه شده در مشخصات فنی و دستورالعمل‌های کشورهای با شرایط مشابه و نزدیک آب و هوایی منطقه می‌باشد. باید خاطر نشان ساخت که توصیه‌ها و معیارهای عنوان شده در بخش اول آیین نامه بتن ایران (آبا) و بویژه در قسمت مربوط به “ بتن‌ریزی در مناطق ساحلی حاشیه خلیج فارس و دریای عمان ” مورد استفاده بوده و توصیه و معیارهای پیشنهادی در این روش بدان اضافه می‌گردد. آزمایشهای در نظر گرفته شده در این روش، نسبتاً ساده و در زمان نسبتاً کوتاهی انجام می‌شود. این آزمایشها شامل آزمایش جذب آب بر اساس استاندارد ((BS1881part122,1983)، آزمایش نفوذ آب بر اساس استاندارد ((DIN 1048 part 5, 1991) یا ((BS EN 12390-8: 2000 و آزمایش نفوذ سریع یون کلرید بر اساس استاندارد ((ASTM C1202, 1994) است. محدودیت‌های لازم که لازم است به عنوان مشخصات بتن فوق از نظر نفوذپذیری اعمال گردد، در جدول زیر آمده است.

جدول ۶-۱- مقادیر مجاز آزمایش‌های نفوذپذیری بتن مسلح برای اعمال دوام در شرایط محیطی منطقه (طبق جدول ۳-۱)

محدوده مجاز			آزمایش
شرایط D,E,F	شرایط C,B	شرایط A	
حداکثر ۲ درصد	حداکثر ۳ درصد	حداکثر ۴ درصد	۱- جذب آب نیم‌ساعته (در سن ۲۸ روز) Water absorption test BS 1881, part 122, 1983
حداکثر ۱۰ میلی‌متر	حداکثر ۳۰ میلی‌متر	حد	نفوذ آب (در سن ۲۸ روز) Depth of Penetration of water under pressure BS EN 12390-8: 2000 DIN 1048 , Part 5, 1991
حداکثر ۲۰۰۰ کلمب	حداکثر ۳۰۰۰ کلمب	حداکثر ۳۰۰۰ کلمب	۳- نفوذ کلرید (در سن ۲۸ روز) Rapid chloride penetration test ASTM C 1202, 1994

مدت بکار می‌رود. مسلماً انجام آزمایش‌های فوق در درازمدت قابلیت اعتماد بیشتری دارد. انجام آزمایش‌های شماره ۱ و ۲ (جذب آب و نفوذ آب) برای کلیه پروژه‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان الزامی می‌باشد. آزمایش شماره ۳ (نفوذ کلرید) برای تمام سازه‌های دریایی که در معرض مستقیم آب دریا سایر و سازه‌هایی که تا فاصله ۵۰۰ متر از حاشیه ساحل قرار دارند، اکیداً توصیه می‌گردد.

۴-۶- توصیه طراحی بر اساس دوام در بلند مدت

برای طراحی بر اساس دوام سازه‌های بتنی مسلح در مناطق خورنده بویژه سواحل جنوبی کشور، باید مقاومت در مقابل نفوذ یون کلرید برای پوشش بتنی روی میلگرد به صورت کمی تعیین گردد. این نفوذ عمدتاً در مقابل یون کلرید خواهد بود و آغاز خوردگی زمانی است که یون کلرید به میزان آستانه خوردگی در سطح میلگرد رسیده باشد. در پاره‌ای از طراحی‌ها، زمان ثانویه‌ای که به میزان خوردگی میلگرد و پیشرفت آن تا ترک خوردگی و جدایی بتن از میلگرد، اطلاق می‌شود در نظر گرفته شده است. عمر مفید می‌تواند به زمان اولیه آغاز خوردگی و یا مجموع زمان اولیه و ثانویه ارتباط داده شود. برای پیش بینی و تعیین نفوذ یون کلرید و مشخص کردن میزان آن از قانون دوم فیک استفاده می‌شود:

در این رابطه C_x میزان یون کلرید در عمق x در زمان t ، C_s میزان یون کلرید در سطح بتن، D_c ضریب نفوذ، x عمق از سطح t زمان و erf تابع خطاست. با توجه به تغییرات ضریب نفوذ D_c در کوتاه‌مدت و بلندمدت، لازم است در کاربرد آن مسئله زمان را در نظر گرفت. با اعمال ضریب کاهش D_c مؤثر در معادله فوق می‌توان اثر زمان در تغییرات D_c را در نظر گرفت. برای اعمال روش فوق و تعیین آغاز زمان خوردگی، لازم است مراحل زیر انجام گردد.

الف - طبقه بندی شرایط محیطی

ارزیابی دقیق شرایط محیطی و شدت عوامل مؤثر امری حیاتی است تا بتوان مواد و مصالح و بتن با دوام کافی برای شرایط فوق را مشخص نمود. در دستورالعمل‌های مختلف شرایط محیطی دریایی از دیدگاه اثر بر سازه‌های بتنی به صور مختلف تعریف و مشخص شده است. در یکی از این دسته‌بندی‌ها، ناحیه جزرومدی و پاشش و ناحیه‌ای که کلرید می‌تواند به سطح بتن در منطقه ساحلی برسد، از یکدیگر جدا شده و ناحیه دریایی به چهار بخش ملایم، شدید، خیلی شدید و فوق‌العاده شدید تقسیم‌بندی شده است. برای کمی کردن شرایط محیطی و در معرض بودن سازه می‌توان از تجربیات گذشته و سازه‌های موجود و نیز قضاوت مهندسی بهره جست.

ب- ملزومات حین بهره برداری

قبل از آغاز طراحی، نیازهای بهره‌برداری و سازه‌های بایستی مشخص گردند. نیازهای بهره‌برداری و سازه‌ای می‌تواند شامل عمر مفید لازم برای سازه و احتمال تعمیر و شیوه تعمیر باشد. ملاحظات سازه‌ای نیز شامل نوع و حداقل رده بتن، ضخامت پوشش و محدودیت عرض ترک و پایداری ابعادی نظیر پتانسیل جمع‌شدگی و خزش و خطر ترک خوردگی در بلند مدت می‌شود.

ج- انتخاب مواد و مصالح بتن

برای انتخاب مواد و مصالح و ساخت بتن و تعیین مشخصه آن می‌توان با آزمایش‌هایی کوتاه‌مدت مقاومت پوشش بتنی در مقابل نفوذ یونهای مهاجم را به دست آورد. این آزمایش‌ها می‌تواند شامل آزمایش‌های جذب آب، نفوذ آب و نفوذ و هدایت یون کلرید باشد. نتایج آزمایش‌های نفوذ و هدایت یون کلرید می‌تواند به منظور مقایسه بتن‌ها و یا پیش‌بینی ضرایب نفوذ بلندمدت بتن، در محیط‌های خورنده به کار رود. با بررسی ضرایب نفوذ در شرایط واقعی و بررسی سازه‌های موجود می‌توان ارتباط بین نتایج آزمایش‌های کوتاه مدت و ۲۸ روزه را با نتایج آزمایش‌های بلند مدت، تعیین و بدین ترتیب از ضرایب به دست آمده در بلند مدت، در طراحی‌ها استفاده نمود.

د- پیش‌بینی میزان یون کلرید در سطح

برای تعیین میزان یون کلرید در عمق‌های مختلف بتن، از معادله نفوذ لازم است میزان کلرید در سطح تعیین شود. مقدار کلرید در سطح نیز بستگی به نوع بتن و شرایط محیطی و محل قرارگیری سازه در مجاورت دریا دارد. همچنین میزان کلرید سطحی با زمان دارای تغییراتی است. مقدار کلرید سطحی را می‌توان از روی نمونه‌های آزمایشی در محل و نیز سازه‌های موجود به دست آورد و پس

از اصلاحات لازم برای بتن‌های مختلف در منطقه فوق به کار برد. با مشخص شدن میزان کلرید در سطح Cs و ضریب نفوذ DC می‌توان میزان کلرید در عمق‌های مختلف بتن ((Cx را بدست آورد.
ه- تخمین زمان آغاز خوردگی

با تعیین میزان یون کلرید در سطح میلگردها و رسیدن آن به میزان آستانه خوردگی یا مقدار بحرانی، خوردگی آغاز می‌شود. این میزان برای کلیه بتن‌ها و شرایط محیطی، عدد واحدی نبوده و به عوامل متعددی نظیر نوع و مقدار سیمان و مواد مکمل سیمان، تخلخل و ریز ساختار بتن، دما و رطوبت بتن، سطح فولاد و قلیائیت آب حفره‌ای بستگی دارد. به طور متوسط، فعالیت و آغاز خوردگی در مقادیر حدود ۰/۴ درصد کلرید محلول در آب نسبت به وزن سیمان گزارش شده است و میزان خوردگی بیشتر در مقادیر کلرید بالاتر نیز به دست آمده است. روش فوق به عنوان مدل پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتنی مسلح در معرض یون کلرید در کشورهای مختلف در حال بررسی و یا کاربرد می‌باشد که از جمله روش پیشنهادی تحت نام (Life 365) در آمریکا و کانادا و روش مبتنی بر احتمالات و قابلیت اعتماد در اروپا را می‌توان نام برد. در کشور ما نیز گام‌های اولیه برای ارائه چنین مدل‌هایی براساس یکسری آزمایش‌های واقعی برداشته شده است. برای معتبر نمودن مدل‌های فوق و کاربرد آن در طراحی، لازم است علاوه بر نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی در کوتاه‌مدت، آزمایش روی نمونه‌های در محل در دراز مدت و نیز آزمایش و بررسی سازه‌های بتنی موجود در محل انجام گیرد و نتایج، مقایسه و تجزیه و تحلیل شوند.

دوام بتن

دوام یا پایداری بتن متناظر با سن یا عمر خدمت رسانی آن در شرایط محیطی مشخص تعریف می‌شود. بدیهی است با تغییر شرایط، دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن ACI 201 محیطی حاکم بر بتن، مفهوم دوام بتن تغییر می‌کند. طبق تعریف برای مقابله با عوامل هوازدگی بتن، تهاجم شیمیایی، سایش بتن و یا هر فرآیندی که به آسیب دیدگی می‌انجامد، گفته می‌شود. بنابراین، بتن پایا بتنی است که تا حدود زیادی شکل اولیه و کیفیت و قابلیت خدمت رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ نماید [۱]. برآورد می‌گردد در کشورهای پیشرفته صنعتی بیش از ۴۰ درصد کل منابع پولی صنعت ساختمان در بخش تعمیر و نگهداری سازه‌های موجود، و کمتر از ۶۰ درصد آن برای ایجاد سازه‌های جدید خرج می‌گردد [۲]. این موارد ما را بر آن می‌دارد که موضوع دوام مصالح مصرفی بویژه بتن را جدی بگیریم. علاوه بر هزینه، موضوع حفظ محیط زیست و آلودگی هوا و خاک و آب کره زمین و حفظ منابع خدادادی طبیعی این کره خاکی، ما را مجبور به با دوام تر ساختن بتن می‌نماید

عوامل موثر بر دوام بتن

تأثیر نسبت آب به سیمان بر دوام بتن

۳] اگر درصد آب به سیمان دو برابر گردد، خواهیم داشت [۳

- مقاومت یکروزه به ۵ کاهش می‌یابد
- مقاومت سه روزه به ۴ کاهش می‌یابد
- مقاومت هفت روزه به ۳ کاهش می‌یابد
- مقاومت ۲۸ روزه به ۵ کاهش می‌یابد
- مقاومت درازمدت به ۲ کاهش می‌یابد

تأثیر نسبت آب به سیمان و دوره مراقبت مرطوب در دمای ۲۱ درجه سانتیگراد بر مقاومت فشاری بتن

انجماد - دوام بتن در برابر چرخه های ذوب

بتن به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط ذوب- انجماد مورد صدمه قرار می‌گیرد. این صدمه به علت انبساط آب در قسمت‌های مؤین منجمد شونده و تشکیل یخ می‌باشد. از جمله نتایج انبساط در ریز ترک خوردگی‌ها، افت حاصل در دوام بتن و مدول الاستیسیته می‌باشد. به علاوه چنین بتنی به لحاظ زیبایی به علت شرایط نامطلوبی که در سطح آن پدیدار می‌شود، غیر قابل

قبول است. احتمالاً نفوذ آب و هوا از طریق ریز ترک ها هم می تواند منجر به خوردگی آرماتورها شود. از این منظر، هر کاهش در نسبت آب به سیمان در ارتقاء دوام بتن تحت این شرایط سودمند خواهد بود
دوام بتن در برابر چرخه های ذوب - انجماد

تأثیر دما بر دوام بتن

دمای بتن در زمان ریختن به دو الی سه ساعت اولیه عمر بتن گفته می شود
دمای بتن در زمان مراقبت به دمای بتن پس از ۲ تا ۳ ساعت اولیه تا انتهای دوره مراقبت (۲۸ روز) گفته می شود
اثر ثابت بودن دمای بتن در دوره ریختن و تغییر آن در دوره مراقبتی بر مقاومت

وضعیت مقاومت	دمای بتن در دوره ریختن	دمای بتن در دوره مراقبتی
کمترین مقاومت	۲۱	۴
	۲۱	۱۳
حدود مینا	۲۱	۲۱
بیشترین مقاومت	۲۱	۴۶

بر اساس استاندارد طی طول دوره مراقبتی نباید دمای سطح بتن کمتر از ۴+ درجه سانتیگراد باشد و اگر دمای بتن زیر ۴+ درجه سانتیگراد باشد، با بحران بتن روبرو خواهیم بود و نیز استفاده از ضد یخ بعنوان مواد مضاف منسوخ گردیده است، چرا که فقط از یخ زدن جلوگیری می کند

اثر دمای بالا بر مقاومت در شرایط ثابت بودن دمای بتن در دوره ریختن و مراقبت

دمای بتن در دوره ریختن و مراقبت	۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۴	۲۰	۱۰	۵۷	۷۶
۱۳	۳۰	۵۷	۷۶	۹۶
۲۱	۳۲	۶۲	۸۰	۱۰۰
۴۶	۵۸	۸۲	۹۷	۱۰۵

مطابق جدول فوق هرچه دما حین ریختن و مراقبت بالاتر باشد میزان مقاومت کسب شده توسط بتن بیشتر خواهد بود. بهترین حالت زمانی است که دمای بتن از ۳۵ درجه سانتیگراد بیشتر نگردد. مواردی که در این مقاله بیان شد برخی از دلایل تاثیرگذار بر دوام و مقاومت بتن بوده است. از دیگر موارد می توان به شکل دانه بندی، در معرض مواد مضر قرار گرفتن بتن و نیز دوام بتن سولفاتی اشاره نمود
آزمایش های دوام بتن

در این پست آزمایش های دوام بتن تشریح شده اند. تعداد این آزمایش ها زیاد است اما در این نوشته به بخشی از آزمایش های مربوط به نفوذپذیری و خوردگی آرماتورها اشاره شده است.

شرایط محیطی

دوام بتن فقط تابع ساختار و ریزساختار بتن نیست، بلکه شرایط محیطی نقش مهمی دارد. یک سازه بتنی ممکن است در شرایط معین، عمر مفید دراز مدت داشته باشد اما همان سازه در شرایط دیگر ممکن است از مدت کوتاه سرویس دهی برخوردار باشد. به طور کلی شرایط محیطی به دو گروه ریز محیطی و کلان محیطی تقسیم بندی می شوند. کلان محیطی به این مفهوم است که سازه در چه موقعیت جغرافیایی قرار دارد، برای مثال سازه ای که در ۲۰۰ متری از ساحل قرار دارد.

اما ریز محیطی مربوط به بخش هایی از سازه است که در معرض آن محیط باشد. برای مثال همان سازه که در ۲۰۰ متری خط ساحلی است، بخش هایی دارد که در زیر زمین هستند و احتمالاً در معرض سولفات ها و کلرید ها در خاک و یا آب زیر زمینی هستند. بخش هایی نزدیک زمین هستند که در معرض بالا آمدن نمک های آب زیر زمینی از طریق مکش مویینه و بخش هایی که بالاتر هستند در معرض کربناسیون و کلرید های موجود در هوا قرار دارند.

خوردگی آرماتور

یکی از مهم ترین عوامل آسیب دیدگی محیطی سازه های بتنی، خوردگی آرماتور است که تاکنون بیشترین خسارت را در میان بقیه آسیب ها در دنیا وارد کرده است. عامل اصلی خوردگی آرماتور، کربناسیون و نفوذ کلرید است. خوردگی آرماتور سبب می شود حجم محصول زنگ، بیشتر از فولاد باشد در نتیجه ترک خوردگی و قلوه کن شدن در بتن رخ دهد. افزایش حجم فولاد به نوع محصول زنگ بستگی دارد.

مکانیزم نفوذ کلریدها

مکانیزم نفوذ کلرید تابع شرایط محیطی (ریز محیطی) است که اعضای بتنی در معرض آن قرار دارند. در جدول زیر مکانیزم ها لیست شده است.

شرایط	مثال سازه	مکانیزم اولیه انتقال کلرید
در زیر آب	بخش هایی از سازه که زیر جزر و مد است.	انتشار
	دیوارهای زیر زمین یا روکش های تونل زیر جزر و مد	نفوذپذیری و انتشار
جزر و مد	بخش هایی از سازه که در منطقه جزر و مد قرار دارند.	جذب مویینه و انتشار
پاشیده شدن آب	بخش هایی از سازه که در بالای جزر و مد قرار دارند.	جذب آب، انتشار کربناسیون
ساحلی	سازه های ساحلی	جذب مویینه و کربناسیون

آزمایش های دوام

در جدول زیر بخشی از آزمایش های دوام بتن لیست شده که با کلیک روی عنوان آزمایش به صفحه مربوطه منتقل می شوید.

گروه آزمایش	نوع آزمایش
-------------	------------

<p>پروفیل کلرید، ضریب نفوذپذیری نفوذپذیری کلرید سریع ضریب مهاجرت کلرید</p>	<p>انتشار و نفوذپذیری کلریدها</p>
<p>شناساگر فنل فتالین</p>	<p>کربناسیون</p>
<p>پتانسیل خوردگی مقاومت پلاریسیون خطی گراویمتری خوردگی ماکروپیل مقاومت الکتریکی</p>	<p>خوردگی آرماتور</p>
<p>جذب مویینه نفوذپذیری آب جذب آب</p>	<p>جذب آب نفوذپذیری</p>
<p>تخلخل کل توزیع اندازه نافذ</p>	<p>تخلخل</p>

انتشار و نفوذ پذیری کلرید

انتشار روندی است که ماده از یک محل با غلظت بیشتر به محل دیگری با غلظت کمتر منتقل می شود. این نوع از انتقال در مصالح کاملاً اشباع رخ می دهد. انتشار یون های کلرید در محلول همگن رخ نمی دهد. بتن یک ماتریس متخلخل است که هر دو اجزای محلول و جامد را دارد. بنابراین نرخ انتشار نه تنها توسط ضریب انتشار در یک محلول منافذ، بلکه خصوصیات فیزیکی منافذ مویینه نیز کنترل می شود. از طرف دیگر بخشی از یون های کلرید، پیوند های فیزیکی و شیمیایی با محصولات هیدراتاسیون ایجاد می کنند، بنابراین تمایل به انتشار به سمت جلو تا حدی کاسته می شود. لذا در آزمایش از ضریب انتشار موثر استفاده می شود که به مفهوم ضریب انتشار بتن به صورت کلی است، در غیر این صورت برای آنکه تاثیر این متغیرها در نظر گرفته شود، باید از فرمول استفاده شود.

کربناسیون

یکی از آزمایش های دوام بتن مربوط به کنترل کربناسیون است. کربناسیون، نفوذ دی اکسید کربن به درون بتن است که با وجود آب با هیدروکسید کلسیم ترکیب شده و کربنات کلسیم را تشکیل می دهد. در نتیجه PH بتن از ۱۳ به ۱۰ کاهش می یابد. اگر نفوذ دی اکسید کربن پیشرفت کند و به سطح آرماتور برسد، لایه انفعالی و محافظ سطح میلگردها تخریب و خوردگی آغاز می شود. همچنین دی اکسید کربن با آلومینات سیلیکات کلسیم هیدراته شده واکنش می دهد و ژل C-S-H در معرض کربناسیون قرار می گیرد. ژل به کربنات کلسیم تجزیه می شود. در اثر کربناسیون، ظرفیت پیوند ترکیبات سیمان کاهش می یابد و کلریدهای آزاد افزایش می یابند و خطر خوردگی آرماتور نیز افزایش می یابد.

خوردگی آرماتور

یکی دیگر از آزمایش های دوام بتن تست خوردگی میلگردها هستند. این نوع آزمایش متعدد بوده و به صورت زیر است.

- آزمایش پتانسیل خوردگی یا پتانسیل نیم پیل

- آزمایش مقاومت پلاریسیون خطی

- آزمایش گراویمتری

- آزمایش خوردگی ماکروپیل

- آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش پتانسیل خوردگی، وضعیت میلگرد را از نظر فعال بودن یا فعال نبودن نشان می دهد. آزمایش مقاومت پلاریسیون خطی، برای شدت یا نرخ خوردگی استفاده می شود. این آزمایش نیاز به دستگاه تخصصی دارد اما در صورت موجود نبودن دستگاه می توان از آزمایش خوردگی ماکروپیل استفاده کرد.

تخلخل

برای اندازه گیری تخلخل در بتن از روش اشباع در خلأ طبق جزئیات ارائه شده در **RILEM CPC 113** استفاده می شود. نمونه ها با قطر ۱۰۰ میلی متر و با ضخامت ۵۰ میلی متر در گرمخانه ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می شوند. وزن نمونه ها پس از خارج شدن از گرمخانه و قرار دادن در محیط آزمایشگاه، اندازه گیری می شوند. سپس نمونه ها در ظرف آب تحت خلأ نگه داری می شوند. پس از مدت ۱ ساعت، پمپ خلأ خاموش می شوند تا نمونه ها برای ۱۲ ساعت در ظرف آب باقی بمانند. وزن نمونه ها اندازه گیری می شوند.

پایایی بتن به کارایی و قابلیت مقاومت در برابر هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و فرسایش، یا فرآیندهای مخرب دیگر اطلاق می گردد. در سازه های بتن حجیم مخلوط بتن باید به گونه ای طراحی و اجرا شود که ضمن کسب مقاومت فشاری لازم در سن مورد نظر، کیفیت اولیه سازه در خلال دوره بهره برداری مفید به گونه ای تنزل نیابد که عملیات ترمیم و بازسازی پر هزینه ای را به دنبال داشته باشد. با این حال با توجه به هزینه بر بودن ساخت سازه های بتنی حجیم نظیر سدها و ابنیه وابسته به آنها در مقایسه

با دیگر سازه های بتنی متعارف باید در نظر داشت برای افزایش عمر مفید سازه های بتنی ممکن است اعمال تمامی ملاحظات پایایی برای تمامی سازه ها مورد نیاز نباشد. به همین دلیل در تعیین و الزامات پایایی برای سازه های مختلف بتنی حجیم باید اهمیت، دوره، تواتر بهره برداری و شرایط اقلیمی منطقه طرح مدنظر قرار گیرد.

مطالب خواندنی: بتن حجیم چیست؟

عوامل کاهنده پایایی بتن

یخ زدن و آب شدن

زمانی که بتن مرطوب در معرض دوره های متناوب یخ زدن و آب شدن قرار گیرد، در صورت دارا بود کیفیت مطلوب آسیب کمتری می بیند. برای ارتقای پایایی بتن و مقابله با آثار یخبندان های متناوب رعایت نکات زیر ضروری است:

- تدابیر لازم برای ایجاد حباب های هوا به میزان لازم در بتن اتخاذ گردد.

- مصالح مصرفی در ساخت بتن دارای کیفیت مناسبی باشند.

- نسبت آب به سیمان تا جایی که خدشه ای به عملیات پیش سرمایش بتن وارد نیاید کاهش داده شود.

- روش های مناسب و صحیح در تهیه، انتقال، اجرا، عمل آوری و محافظت بتن به کار بسته شود. وجود رطوبت و آب عاملی تعیین کننده در تخریب بتن در اثر یخبندان های متناوب به شمار می رود، از این رو طراح و مجری تا حد امکان باید از طریق زهکشی و انتخاب جزئیات اجرایی مناسب یا دیگر تدابیر لازم، آب و رطوبت را از سازه بتنی در معرض یخبندان دور نموده و یا مقدار آن را به حداقل ممکن کاهش دهد.

عوامل شیمیایی خورنده

از عوامل مهم در افزایش پایایی بتن در برابر عوامل شیمیایی خورنده اسیدی، افزایش میزان سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان می باشد. عوامل شیمیایی خورنده مطرح در سازه های بتنی حجیم شامل املاح کلریدها، سولفات ها، سولفیت ها و کربنات می باشد. با توجه به ابعاد قابل ملاحظه سازه های بتنی حجیم نظیر سدها، افزایش میزان سیمان مصرفی به دلیل خطر بروز ترک های حرارتی توصیه نمی شود. به عنوان مثال برای کاهش نفوذپذیری بتن های حجیم می توان از مواد افزودنی معدنی با پایه سیلیسی نظیر پوزولان به جای افزودن میزان سیمان استفاده نمود.

سایش و فرسایش

در بعضی موارد سطوح بتن های حجیم سازه های هیدرولیکی مانند سرریزها و حوضچه های آرامش در سدها تحت فرآیند سایش، فرسایش و خلزایی قرار می گیرند که باید با تدابیر مناسب از آن جلوگیری نمود.

خوردگی فولاد و سایر اقلام مدفون در بتن

به طور معمول بتن می تواند انواع فولاد و سایر اقلام مدفون در خود را به علت ایجاد محیطقلیایی با pH بالا در خمیر سیمان در برابر خوردگی محافظت نماید. کارایی این حفاظ به میزان پوشش بتنی روی فولادها، کیفیت بتن، جزئیات اجرایی و میزان یون های کلرید مجاور سطح فولاد در مواد متشکله بتن یا شرایط محیطی اطراف بتن بستگی دارد. در بتن آرمه حجیم به منظور حفاظت آرماتورها در برابر خوردگی، حداکثر یون کلرید قابل حل در آب در بتن سخت شده ۲۸ روزه (ناشی از مواد تشکیل دهنده بتن یعنی آب، سنگدانه ها و مواد افزودنی) نباید از مقادیر مجاز قید شده آیین نامه بتن ایران تجاوز نماید. همچنین مقدار کلرید موجود در بتن آرمه در هر صورت نباید از ۶/۰ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن بیشتر شود.

واکنشقلیایی سنگدانه ها

واکنشقلیایی در بتن عبارت است از واکنش کانیهای مستعد موجود در سنگدانه های مصرفی با املاحقلیایی آزاد موجود در بتن در محیط با رطوبت کافی. منابع تامین موادقلیایی شامل دو منبع درونی و بیرونی می باشند. منبع درونی میتواند شامل کلیه مصالح تشکیل دهنده بتن از جمله سنگدانه ها، سیمان، آب و مواد افزودنی معدنی و شیمیایی باشد. آب یا مایعات حاوی املاحقلیایی در صورتی که زمینه نفوذ آنها به داخل بتن فراهم گردد خود می توانند منبع بیرونی تامینقلیایی ها در بتن تلقی شوند.

این واکنش ها می تواند سبب انبساط مخرب، ترک خوردگی و خرابی بتن گردند. واکنش های قلیایی شناخته شده در بتن شامل نوع سیلیسی و کربناتی می باشند.

ضوابط ویژه برای افزایش پایایی بتن در شرایط مختلف

استفاده از مواد حباب ساز

مواد حباب ساز به طور معمول در بتن حجیم به منظور افزایش مقاومت در برابر یخبندان، افزایش کارایی بتن تازه، افزایش حجم خمیره بتن، کاهش آب مخلوط بتن و در نهایت کاهش نسبت آب به سیمان مورد استفاده قرار می گیرد. میزان مجاز هوا در بتن حجیم به شرح جدول زیر است.

محدودیت نسبت آب به سیمان

نسبت آب به سیمان بتن های حجیمی که در تماس با عوامل شیمیایی خورنده هستند نباید از مقادیر جدول زیر باشد. نسبت های آب به سیمان تمامی بتن های حجیمی که به صورت متناوب یا دائم در تماس با آب دریا قرار می گیرند باید به میزان ۰/۵ از مقادیری که در این جدول نشان داده شده کمتر در نظر گرفته شوند. در هر حال نسبت آب به سیمان نباید از ۴۵/۰ کمتر شود.

تدابیر ویژه برای محیط های سولفاتی و سولفات های موجود در بتن

برای حفاظت بتن حجیم در برابر حمله سولفات ها رعایت موارد زیر توصیه می شود:

– استفاده از سیمان مناسب

– کاهش نسبت آب به سیمان

– استفاده از پوزولان مناسب به میزان موثر

– طرح اختلاط مناسب و تراکم کافی بتن در حین بتن ریزی

– ایجاد حباب های هوا در بتن برای کاهش نسبت آب به سیمان (کاهش نفوذپذیری)

– عمل آوری مناسب و کافی

تدابیر ویژه برای محیط های خورنده

برای جلوگیری از خوردگی آرماتورها و سایر اقلام مدفون در بتن باید نکات زیر رعایت شوند:

– ساخت بتن با نفوذپذیری کم: بتن با نفوذپذیری کم از نفوذ آب و سایر یون های مهاجم جلوگیری نموده و به همین دلیل دارای خاصیت هدایت الکتریکی کمتری هست. بتنی با این ویژگی در مقابل جذب املاح و اثر آنها بر اقلام مدفون در بتن مقاومت کافی داشته و مانع نفوذ اکسیژن می شود. استفاده از دوده سیلیسی یا پوزولان های مناسب دیگر، رعایت نسبت های اختلاط مناسب، اجرا و عمل آوری صحیح نفوذپذیری بتن را تا حد زیادی کاهش می دهد.

– پوشش مناسب روی فولاد

در سازه های بتن آرمه حجیم که در معرض محیط های خورنده یا شرایط محیطی شدید، بسیار شدید و فوق العاده شدید مطابق با تعریف آیین نامه بتن ایران قرار می گیرند حداقل پوشش روی آرماتور به ترتیب ۶۰، ۷۵ و ۹۰ میلیمتر در نظر گرفته می شود.

– زهکشی مناسب

– محدود کردن مقدار یون های کلرید در هر یک از مواد تشکیل دهنده بتن

– دقت در مورد اقلامی که از بتن بیرون می زنند: در محیط های خورنده در صورتی که اقلام مدفون در بتن نظیر میل مهارها، باید از بتن بیرون بزنند لازم است دقت ویژه ای نسبت به انتخاب مصالح مصرفی، نوع محیط خورنده، اجتناب از تماس این نوع اقلام با فلزات غیر مشابه در درون بتن، اجرای دقیق بتن در اطراف قطعه مورد بحث و اجتناب از ایجاد روزنه برای نفوذ عوامل خورنده به بخش های داخلی بتن مبذول شود.

– استفاده از سیستم های محافظ: به علت هزینه های قابل ملاحظه تعمیر خرابی های ناشی از خوردگی در سازه های بتنی حجیم،

استفاده از سیستم های محافظ می تواند مورد نظر قرار گیرد. این سیستم ها می تواند شامل پوشش متراکم بتنی، پوشش اپوکسی و غشاهای ویژه مقاوم در برابر نفوذ آب باشند.

تدابیر ویژه برای پیشگیری یا کاهش خطر وقوع واکنش قلیایی در بتن

– استفاده از سیمان کم قلیا

– محدود نمودن میزان کل قلیایی موجود در بتن

– جایگزینی مواد سیمانی مکمل و افزودنی های معدنی به جای بخشی از سیمان مصرفی

– استفاده از نمک های حاوی لیتیم

– اختلاط مصالح غیر واکنش زا با مصالح واکنش زای موجود

تدابیر ویژه برای کاهش سایش و فرسایش در بتن

– پرهیز از جداسدگی دانه ها در حین بتن ریزی

– اجتناب از آب انداختن سطوح بتن

– انتخاب زمان صحیح برای پرداخت سطوح بتن

– افزایش نسبت سنگدانه به سیمان در مخلوط بتن

– به حداقل رساندن نسبت آب به سیمان بتن های مجاور سطوح

– پرهیز از افزودن آب به سطوح بتنی برای سهولت پرداخت

– انجام ماله کشی سطوح پس از حذف آب های اضافی سطوح

– اجرای روش های صحیح تراکم و عمل آوری بتن

تخریب بتن تحت فعالیت موادی که به طور مضر به مجموعه سیمان تهاجم می کنند، تابعی از **نفوذ پذیری بتن** خواهد بود، که به صورت غیرمستقیم توسط آزمایش ISA قابل اندازه گیری می باشد. برای مخلوط های بتن حاوی سیمان ۲۵۵-۳۰۰ که برای کارایی بتن و مقاومت ۲۸ روزه یکسانی طراحی می شوند، تفاوت محسوسی میان این مخلوطهای عاری از **افزودنی کاهنده آب بتن** با آنهایی که دارای یک عامل **افزودنی کاهنده آب بتن لیگنوسولفوناتی** هستند (تا جایی که به جذب سطح اولیه مربوط است) وجود ندارد. به نظر اندازه گیری مستقیم از اثر مایعات مضر بر روی **دوام بتن** تنها محدود به آب دریا و حمله سولفاتی می باشد. در هر دو حوزه معلوم شده است که هر چه نسبت آب به سیمان پایین تر باشد، **دوام بتن** در برابر مایعات بیشتر خواهد بود و کاربرد یک **افزودنی کاهنده آب بتن مفید خواهد بود**. این امر با کاری **افزودنی کاهنده آب بتن** که در هلند و ژاپن انجام شده مورد تأیید قرار گرفته است و یک نتیجه کلی این شده است که کاهش در نسبت آب به سیمان از ۰/۵ به ۰/۴ کاهش ضخامت پوشش آرماتورها را تا حدود ۵۰ درصد مجاز می سازد.

دوام بتن سولفاتی

در این حوزه اثرات انواع گوناگون **افزودنی کاهنده آب تن اسید هیدروکسی کربوکسیلیکی** و افزودنی های کاهنده آب تن لیگنوسولفاتی از دیدگاه تأثیر بتن هایی که دارای طرح اختلاط یکسانی باشد مورد مطالعه واقع شده است. اما با نسبت آب به سیمان کمتر در حالتی که مخلوط ها حاوی **افزودنی کاهنده آب تن** باشند. همچنین کار کمی بر روی مخلوط های متناظر با مقدار سیمان پایین تر و با همان نسبت آب به سیمان و همان مقاومت ۲۳ روزه در مورد اختلاط های حاوی **افزودنی کاهنده آب تن** صورت گرفته است مجموعه نتایج برای انواع مختلف **افزودنی کاهنده آب تن** با استفاده از روش آزمایشی که در آن بتن به صورت دوره ای طی چند چرخه در معرض محلول های حاوی سولفات قرار می گیرد تا به یک انبساط مشخص برسد، به همراه کاهش در مدول یانگ (E در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲-۱ کاهش آب توسط عوامل کاهنده آب به عنوان تابعی از کارایی

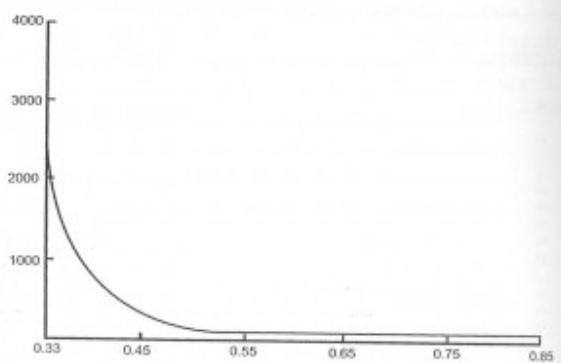
انواع بتن (mm)	درصد کاهش نسبت آب به سیمان
۵۰	۵-۸
۷۵	۸-۱۰
۱۰۰	۱۰-۱۲
۱۵۰	۱۲-۱۵

عموماً مصالحی از نوع **افزودنی کاهنده آب تن** اسید هیدروکسی کربوکسیلیک و لیگنوسولفونات موجب توسعه در مقاومت سولفاتی می شوند. کاری که روسی ها انجام داده اند به این صورت بود که ابتدا یک **افزودنی کاهنده آب تن** نامشخص تهیه و مستقیماً اضافه شد. روش آزمایش عبارت از اندازه گیری فرکانس تشدید نمونه های بتنی پس از دوره های مختلف غوطه ور شدن در یک محلول سدیم سولفات ۵ درصدی بود. متعاقباً فرمولی برای یافتن فاکتور دوام بتن KC ارائه شد. این کار نشان داد که با کاهش مقدار سیمان در حضور **افزودنی کاهنده آب تن**، دوام بتن در حضور محلول های سولفاتی به طور معکوس تحت تأثیر واقع می شود. از این منظر نتیجه این شد که هر دو **افزودنی کاهنده آب تن** لیگنوسولفوناتی و اسید هیدروکسی کربوکسیلیکی می تواند برای کاهش نسبت آب به سیمان اختلاط های بتنی و دوام بتن استفاده شود. این امر در ارتقاء دوام بتن برابر حمله سولفاتی اثر می گذارد. با این وجود وقتی کاهش میزان سیمان در عین ثابت **کارایی بتن** و خصوصیات مقاومتی و دوام بتن صورت می گیرد، باید قبل از استفاده در کاربردهای حساس به سولفات حتماً آزمایش صورت پذیرد.

از دیدگاه اثرات مخرب شناخته شده افزودنی های حاوی کلسیم کلرید و احتمال تأثیر یکسانی که در ترکیب کلسیم وجود دارد، پیشنهاد می شود که **افزودنی کاهنده آب تن تسریع کننده**، در ناحیه هایی که دوام بتن سولفاتی حائز اهمیت می باشد، استفاده نگردد.

دوام بتن در برابر چرخه های ذوب - انجماد

بتن به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط ذوب- انجماد مورد صدمه قرار می گیرد. این صدمه به علت انبساط آب در قسمت های موئین منجمد شونده و تشکیل یخ می باشد. از جمله نتایج انبساط در ریز ترک خوردگی ها، افت حاصل در دوام بتن و مدول الاستیسیته می باشد. به علاوه چنین بتنی به لحاظ زیبایی به علت شرایط نامطلوبی که در سطح آن پدیدار می شود، غیر قابل قبول است. احتمالاً نفوذ آب و هوا از طریق ریز ترک ها هم می تواند منجر به خوردگی آرماتورها شود. از این منظر، هر کاهش در نسبت آب به سیمان در ارتقاء دوام بتن تحت این شرایط سودمند خواهد بود. این مورد در شکل ۴۱.۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴۱.۱ رابطه میان نسبت آب به سیمان و مقاومت ذوب - انجماد

نوع آسیب دیدگی های بتن

پایایی یا دوام بتن در برابر شرایط محیطی انواع مختلفی دارد که از جمله آن ها می توان به پایایی در برابر عوامل فیزیکی (مانند دوره های یخبندان و آب شدگی)، مقاومت در برابر حملات شیمیایی (مانند واکنش سنگدانه های بتن با محیط های

قلیایی(، پایایی در برابر عوامل مکانیکی)مانند سایش و برخورد ضربه) و دوام سازه بتنی در برابر خوردگی میلگردهای مدفون در بتن اشاره نمود.

عوامل موثر در کاهش پایایی بتن

• دوره های متوالی یخ‌بندان و آب‌شدگی

در مناطق سردسیر، برودت هوا باعث یخ زدن مواد مورد استفاده در بتن شده و پس از آن، با گرم‌تر شدن هوا در طول روز، یخ مواد آب می‌شود. در صورت ادامه این روند به صورت متوالی، سنگدانه های بتن دچار خردشدگی شده و از مقاومت آن‌ها به شدت کاسته می‌شود. علاوه بر اینکه روند یخ زدن و آب شدن متوالی اتفاق افتاده بر روی آب موجود در بتن نیز به تخریب سریع‌تر آن کمک می‌کند. برای برطرف کردن این مشکل راه‌حل‌های مختلفی وجود دارد از جمله استفاده از مواد حباب‌زا در طرح اختلاط بتن اولیه که با تولید حباب‌های هوا از میزان انقباض و انبساط پیش آمده در بتن کاسته شده و در نتیجه تاثیر تخریبی را بر بتن کاهش می‌دهد. روش‌های دیگر مورد استفاده در این مورد نیز استفاده از سنگدانه های مناسب با شرایط جوی موجود، استفاده از نسبت آب به سیمان پایین‌تر در طرح اختلاط اولیه بتن و در نظر گرفتن میزان نفوذ هرچه کمتر برای بتن مورد نظر است.

• عوامل شیمیایی خورنده

در ترکیبات خاک املاح و مواد مضرى مانند عوامل شیمیایی خورنده وجود دارند که بسته به نوع خاک درجه خوردگی آن نیز متفاوت است. این در حالیست که آب برخی مناطق نیز به دلیل داشتن مواد شیمیایی خورنده، از جمله سولفات‌ها، در ترکیب خود برای بتن مضر هستند و باید روش‌هایی برای پیش‌گیری از خوردگی بتن در این شرایط اتخاذ گردد. مهمترین نکته در حفاظت از بتن در برابر خوردگی، استفاده از سیمان مقاوم در برابر خوردگی در طرح اختلاط اولیه بتن است. بنا به شرایط محیطی که سازه بتنی قرار است در آن احداث شود، اگر سولفات موجود در محیط در حد متوسط باشد باید از سیمان پرتلند نوع ۲، و اگر سولفات موجود در محیط در حد شدید باشد باید از سیمان پرتلند نوع ۵ استفاده کرد. البته ساخت بتن با نفوذپذیری پایین و استفاده از افزودنی‌های بتن در طرح اختلاط هم در جلوگیری از خوردگی بتن بسیار موثر است.

سایش و فرسایش

معمولا استفاده از بتن برای کف سطوح صنعتی و محیط کارخانه‌ها، با مشکل سایش و در نهایت فرسایش بتن به کار رفته همراه است. مشکل سایش را می‌توان در سازه‌های بتنی مورد استفاده در آب‌های جاری، سدها و سرریزها نیز مشاهده کرد. در این موارد، برخورد آب و شن و ماسه‌هایی که همراه با آب جابجا می‌شوند دلیل بروز سایش در سازه بتنی است. برای مقابله با مشکل سایش و فرسایش در بتن، می‌توان از سنگدانه های با مقاومت بالا و نیز مواد افزودنی ضدسایش در طرح اختلاط اولیه بتن استفاده کرد.

• سنگدانه های واکنش‌زا

به طور کلی، بتن مخلوطی از سیمان، آب و سنگدانه است که در اثر واکنش‌های شیمیایی که در زمان گیرش بین آن‌ها رخ می‌دهد، بتن نهایی حاصل می‌شود. با این حال، مواد شیمیایی موجود در برخی سنگدانه ها ممکن است با مواد قلیایی موجود در سیمان پرتلند مصرفی واکنش داده و موجب افزایش حجم (انبساط) بتن و در نهایت فروپاشی آن شوند. به این مشکل، سرطان بتن گفته می‌شود.

برای جلوگیری از بروز این مشکل، دقت در انتخاب منابع سنگدانه مصرفی، استفاده از سیمان کم قلیا و استفاده از مواد پوزولانی در طرح اختلاط اولیه بتن پیشنهاد می‌شود.

خوردگی آرماتور

در صورتی که آرماتور مدفون در بتن مسلح بدنه سازه، شروع به واکنش با مواد شیمیایی کرده و دچار خوردگی شود، باعث پکیدیگی و قلوه کن شدن سطح بتن می‌گردد. خوردگی آرماتورها به دلیل نفوذ یون کلرید یا گاز دی‌اکسید کربن به درون سازه بتنی و

رسیدن به سطح فولادی آرماتور ایجاد می‌شود که برای جلوگیری از بروز این مشکل، انتخاب کاور مناسب برای میلگرد، استفاده از بتن با نفوذپذیری کم، استفاده از مواد افزودنی مناسب و سایر روش‌های محافظت از نفوذ یون کلرید و گاز دی‌اکسید کربن به بتن می‌توان بهره برد.

پایایی بتن چیست و کارایی آن چیست؟

پایایی بتن به کارایی و قابلیت مقاومت در برابر هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و فرسایش، یا فرآیندهای مخرب دیگر اطلاق می‌گردد. در سازه‌های بتن حجیم مخلوط بتن باید به گونه‌ای طراحی و اجرا شود که ضمن کسب مقاومت فشاری لازم در سن مورد نظر، کیفیت اولیه سازه در خلال دوره بهره‌برداری مفید به گونه‌ای تنزل نیابد که عملیات ترمیم و بازسازی پر هزینه‌ای را به دنبال داشته باشد.

با این حال با توجه به هزینه بر بودن ساخت سازه‌های بتنی حجیم نظیر سدها و ابنیه وابسته به آنها در مقایسه با دیگر سازه‌های بتنی متعارف باید در نظر داشت برای افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی ممکن است اعمال تمامی ملاحظات پایایی برای تمامی سازه‌ها مورد نیاز نباشد. به همین دلیل در تعیین و الزامات پایایی برای سازه‌های مختلف بتنی حجیم باید اهمیت، دوره، تواتر بهره‌برداری و شرایط اقلیمی منطقه طرح مدنظر قرار گیرد.

عوامل کاهنده پایایی بتن

یخ زدن و آب شدن

زمانی که بتن مرطوب در معرض دوره‌های متناوب یخ زدن و آب شدن قرار گیرد، در صورت دارا بودن کیفیت مطلوب آسیب کمتری می‌بیند. برای ارتقای پایایی بتن و مقابله با آثار یخبندان‌های متناوب رعایت نکات زیر ضروری است:

- تدابیر لازم برای ایجاد حباب‌های هوا به میزان لازم در بتن اتخاذ گردد.

- مصالح مصرفی در ساخت بتن دارای کیفیت مناسبی باشند.

- نسبت آب به سیمان تا جایی که خدشه‌ای به عملیات پیش‌سرمایش بتن وارد نیاید کاهش داده شود.

- روش‌های مناسب و صحیح در تهیه، انتقال، اجرا، عمل‌آوری و محافظت بتن به کار بسته شود. وجود رطوبت و آب عاملی تعیین‌کننده در تخریب بتن در اثر یخبندان‌های متناوب به شمار می‌رود، از این رو طراح و مجری تا حد امکان باید از طریق زهکشی و انتخاب جزئیات اجرایی مناسب یا دیگر تدابیر لازم، آب و رطوبت را از سازه بتنی در معرض یخبندان دور نموده و یا مقدار آن را به حداقل ممکن کاهش دهد.

عوامل شیمیایی خورنده

از عوامل مهم در افزایش پایایی بتن در برابر عوامل شیمیایی خورنده اسیدی، افزایش میزان سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان می‌باشد. عوامل شیمیایی خورنده مطرح در سازه‌های بتنی حجیم شامل املاح کلریدها، سولفات‌ها، سولفیت‌ها و کربنات می‌باشد. با توجه به ابعاد قابل ملاحظه سازه‌های بتنی حجیم نظیر سدها، افزایش میزان سیمان مصرفی به دلیل خطر بروز ترک‌های حرارتی توصیه نمی‌شود. به عنوان مثال برای کاهش نفوذپذیری بتن‌های حجیم می‌توان از مواد افزودنی معدنی با پایه سیلیسی نظیر پوزولان به جای افزودن میزان سیمان استفاده نمود.

سایش و فرسایش

در بعضی موارد سطوح بتن‌های حجیم سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریزها و حوضچه‌های آرامش در سدها تحت فرآیند سایش، فرسایش و خلزایی قرار می‌گیرند که باید با تدابیر مناسب از آن جلوگیری نمود.

خوردگی فولاد و سایر اقلام مدفون در بتن

به طور معمول بتن می‌تواند انواع فولاد و سایر اقلام مدفون در خود را به علت ایجاد محیط قلیایی با pH بالا در خمیر سیمان در برابر خوردگی محافظت نماید. کارایی این حفاظ به میزان پوشش بتنی روی فولادها، کیفیت بتن، جزئیات اجرایی و میزان یون‌های کلرید مجاور سطح فولاد در مواد متشکله بتن یا شرایط محیطی اطراف بتن بستگی دارد. در بتن آرمه حجیم به منظور

حفاظت آرماتورها در برابر خوردگی، حداکثر یون کلرید قابل حل در آب در بتن سخت شده ۲۸ روزه (ناشی از مواد تشکیل دهنده بتن یعنی آب، سنگدانه ها و مواد افزودنی) نباید از مقادیر مجاز قید شده آیین نامه بتن ایران تجاوز نماید. همچنین مقدار کلرید موجود در بتن آرمه در هر صورت نباید از ۶/۰ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن بیشتر شود.

واکنش قلیایی سنگدانه ها

واکنش قلیایی در بتن عبارت است از واکنش کانیهای مستعد موجود در سنگدانه های مصرفی با املاح قلیایی آزاد موجود در بتن در محیط با رطوبت کافی. منابع تامین مواد قلیایی شامل دو منبع درونی و بیرونی می باشند. منبع درونی میتواند شامل کلیه مصالح تشکیل دهنده بتن از جمله سنگدانه ها، سیمان، آب و مواد افزودنی معدنی و شیمیایی باشد. آب یا مایعات حاوی املاح قلیایی در صورتی که زمینه نفوذ آنها به داخل بتن فراهم گردد خود می توانند منبع بیرونی تامین قلیایی ها در بتن تلقی شوند. این واکنش ها می تواند سبب انبساط مخرب، ترک خوردگی و خرابی بتن گردند. واکنش های قلیایی شناخته شده در بتن شامل نوع سیلیسی و کربناتی می باشند.

ضوابط ویژه برای افزایش پایایی بتن در شرایط مختلف

استفاده از مواد حباب ساز

مواد حباب ساز به طور معمول در بتن حجیم به منظور افزایش مقاومت در برابر یخبندان، افزایش کارایی بتن تازه، افزایش حجم خمیره بتن، کاهش آب مخلوط بتن و در نهایت کاهش نسبت آب به سیمان مورد استفاده قرار می گیرد. میزان مجاز هوا در بتن حجیم به شرح جدول زیر است.

محدودیت نسبت آب به سیمان

نسبت آب به سیمان بتن های حجیمی که در تماس با عوامل شیمیایی خورنده هستند نباید از مقادیر جدول زیر باشد. نسبت های آب به سیمان تمامی بتن های حجیمی که به صورت متناوب یا دائم در تماس با آب دریا قرار می گیرند باید به میزان ۰/۵/۰ از مقادیری که در این جدول نشان داده شده کمتر در نظر گرفته شوند. در هر حال نسبت آب به سیمان نباید از ۴۵/۰ کمتر شود.

تدابیر ویژه برای محیط های سولفاتی و سولفات های موجود در بتن

برای حفاظت بتن حجیم در برابر حمله سولفات ها رعایت موارد زیر توصیه می شود:

– استفاده از سیمان مناسب

– کاهش نسبت آب به سیمان

– استفاده از پوزولان مناسب به میزان موثر

– طرح اختلاط مناسب و تراکم کافی بتن در حین بتن ریزی

– ایجاد حباب های هوا در بتن برای کاهش نسبت آب به سیمان (کاهش نفوذپذیری)

– عمل آوری مناسب و کافی

تدابیر ویژه برای محیط های خورنده

برای جلوگیری از خوردگی آرماتورها و سایر اقلام مدفون در بتن باید نکات زیر رعایت شوند:

– ساخت بتن با نفوذپذیری کم: بتن با نفوذپذیری کم از نفوذ آب و سایر یون های مهاجم جلوگیری نموده و به همین دلیل دارای خاصیت هدایت الکتریکی کمتری هست. بتنی با این ویژگی در مقابل جذب املاح و اثر آنها بر اقلام مدفون در بتن مقاومت کافی داشته و مانع نفوذ اکسیژن می شود. استفاده از دوده سیلیسی یا پوزولان های مناسب دیگر، رعایت نسبت های اختلاط مناسب، اجرا و عمل آوری صحیح نفوذپذیری بتن را تا حد زیادی کاهش می دهد.

– پوشش مناسب روی فولاد

در سازه های بتن آرمه حجیم که در معرض محیط های خورنده یا شرایط محیطی شدید، بسیار شدید و فوق العاده شدید مطابق با

تعریف آیین نامه بتن ایران قرار می گیرند حداقل پوشش روی آرماتور به ترتیب ۶۰، ۷۵ و ۹۰ میلیمتر در نظر گرفته می شود.

-زهکشی مناسب

-محدود کردن مقدار یون های کلرید در هر یک از مواد تشکیل دهنده بتن

-دقت در مورد اقلامی که از بتن بیرون می زنند: در محیط های خورنده در صورتی که اقلام مدفون در بتن نظیر میل مهارها، باید از بتن بیرون بزنند لازم است دقت ویژه ای نسبت به انتخاب مصالح مصرفی، نوع محیط خورنده، اجتناب از تماس این نوع اقلام با فلزات غیر مشابه در درون بتن، اجرای دقیق بتن در اطراف قطعه مورد بحث و اجتناب از ایجاد روزنه برای نفوذ عوامل خورنده به بخش های داخلی بتن مبدول شود.

-استفاده از سیستم های محافظ: به علت هزینه های قابل ملاحظه تعمیر خرابی های ناشی از خوردگی در سازه های بتنی حجیم، استفاده از سیستم های محافظ می تواند مورد نظر قرار گیرد. این سیستم ها می تواند شامل پوشش متراکم بتنی، پوشش اپوکسی و غشاهای ویژه مقاوم در برابر نفوذ آب باشند.

تدابیر ویژه برای پیشگیری یا کاهش خطر وقوع واکنش قلیایی در بتن

-استفاده از سیمان کم قلیا

-محدود نمودن میزان کل قلیایی موجود در بتن

-جایگزینی مواد سیمانی مکمل و افزودنی های معدنی به جای بخشی از سیمان مصرفی

-استفاده از نمک های حاوی لیتیم

-اختلاط مصالح غیر واکنش زا با مصالح واکنش زای موجود

تدابیر ویژه برای کاهش سایش و فرسایش در بتن

-پرهیز از جداسدگی دانه ها در حین بتن ریزی

-اجتناب از آب انداختن سطوح بتن

-انتخاب زمان صحیح برای پرداخت سطوح بتن

-افزایش نسبت سنگدانه به سیمان در مخلوط بتن

-به حداقل رساندن نسبت آب به سیمان بتن های مجاور سطوح

-پرهیز از افزودن آب به سطوح بتنی برای سهولت پرداخت

-انجام ماله کشی سطوح پس از حذف آب های اضافی سطوح

-اجرای روش های صحیح تراکم و عمل آوری بتن

تعریف دوام بتن:

- منظور از دوام سازه عمر خدمت دهی طولانی آن است.
- بر طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انیستیتوی بتن آمریکا (ACI)، دوام بتن سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقاومت در برابر عوامل هوا زدگی، حمله شیمیایی، سایش، و یا هر فرآیندی که موجب آسیب دیدگی شود، گفته می شود.
- بنابراین، بتن بادوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت دهی خود را در شرایط محیطی حفظ کند.
- هیچ مصالحی ذاتاً با دوام نیست؛ یک ماده وقتی به انتهای عمر خدمت دهی خود می رسد که، خواصش، تحت شرایط مفروض استفاده از آن، به حدی آسیب دیده باشد که ادامه استفاده از مصالح، نایمن یا غیر اقتصادی شناخته شود.
- هزینه های تعمیر و جایگزینی سازه ها، ناشی از خرابی مصالح، بخش عمده ای (تا ۴۰٪) از کل بودجه ساختمان سازی را به خود اختصاص می دهد.

- حفاظت از منابع طبیعی از طریق بادوام تر ساختن مصالح در هر حال یک اقدام زیست محیطی می باشد که برای دوام بتن هم می تواند مفید واقع شود.
- **آب**، عنصر اولیه به وجود آوردن و تخریب کننده بسیاری از مصالح طبیعی و همچنین منشأ اغلب مسایل مربوط به دوام بتن می باشد (عامل تخریب فیزیکی و یا به عنوان وسیله ای برای انتقال یون های مهاجم).
- پدیده های فیزیکی - شیمیایی مرتبط با حرکات آب در اجسام متخلخل را نفوذپذیری جامدات کنترل می کند.
- میزان آسیب دیدگی، تحت تأثیر نوع و غلظت یون های داخل آب و ترکیب شیمیایی جسم است.

اهمیت آب

- بسته به شرایط محیطی و ضخامت قطعه بتنی، به تدریج، اکثر آب قابل تبخیر بتن از بین رفته و منافذ بتن به صورت خالی یا اشباع نشده درمی آیند.
- از آنجا که این آب قابل تبخیر است، لذا قابلیت یخ زدگی دارد و همچنین برای جابه جایی داخلی آزادی دارد.
- **بنابراین بتنی که پس از خشک شدن آب قابل تبخیر نداشته و یا کم داشته باشد و منافذ آن دوباره اشباع نشوند، در مقابل رویداد های مخرب وابسته به آب، آسیب پذیر نخواهد بود.**

نفوذپذیری (Permeability)

- نفوذ پذیری یا هدایت هیدرولیکی خاصیتی است که کنترل کننده نرخ نفوذ یک سیال به داخل یک جسم جامد متخلخل می باشد.
- در خمیر هیدراته شده، اندازه و پیوستگی منافذ در هر نقطه درحین فرآیند هیدراتاسیون، ضریب نفوذپذیری را کنترل خواهد نمود.
- آب مخلوط به طور غیر مستقیم مسئول نفوذپذیری خمیر سیمان هیدراته شده می باشد.
- میزان این آب، در ابتدا نشان دهنده کل فضای خالی است و پس از انجام هیدراتاسیون، این آب نشان دهنده فضای پرنشده پس از مصرف آب است.
- ضریب نفوذپذیری خمیر سیمان تازه در حدود 10^{-4} تا 10^{-5} سانتی متر بر ثانیه می باشد.
- در حین فرآیند هیدراتاسیون به تدریج که تخلخل موینگی کاهش می یابد، ضریب نفوذپذیری نیز کمتر می شود، ولی تناسب مستقیمی بین این دو وجود ندارد.
- علت این امر آن است که در ابتدا، با پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان، حتی مقدار کم کاهش تخلخل موینگی کل، با تقسیم قابل توجه منافذ بزرگ همراه است، بنابراین اندازه و تعداد کانال های جریان در خمیر سیمان به میزان زیادی کاهش میابد.
- به طور متعارف، تخلخل موینگی در حدود ۳۰ درصد، نشان دهنده آن زمانی است که اتصال زنجیری بین منافذ، بقدری پیچ در پیچ و یا قطع شده است که کاهش بیشتر تخلخل خمیر سیمان تاثیر زیادی در ضریب نفوذ پذیری ندارد.

خرابی بتن

در یک تقسیم بندی کلی، عوامل خرابی بتن به دو دسته عوامل فیزیکی و عوامل شیمیایی تقسیم می شوند.

- عوامل فیزیکی
- عوامل شیمیایی

عوامل فیزیکی و شیمیایی

تمایز بین علل فیزیکی و شیمیایی آسیب دیدگی بتن کاملاً اختیاری است و در عمل، این دو اغلب مکمل هم می شوند.

مثلا فرسودگی سطحی و ترک خوردگی، نفوذپذیری بتن را افزایش می دهد که علت اصلی یک یا چند فرآیند آسیب دیدگی شیمیایی می شود و یا ناشی مایعات اسیدی به درون اجزای خمیر سیمان سخت شده، موجب افزایش تخلخل بتن شده و بنابراین مصالح را در برابر سایش و فرسایش، بیشتر آسیب پذیر می سازد.



۱. فرسودگی سطحی یا کاهش جرم

• ناشی از سایش، فرسایش و خلأزایی

سایش (Abrasion)

- ساینده های اصطکاکی خشک، مانند سایش روسازی ها و کف های صنعتی بر اثر عبور و مرور وسایل نقلیه.
- خمیر سیمان مقاومت زیادی در برابر ساینده های ندارد و مخصوصا اگر خمیر سیمان دارای تخلخل زیاد یا مقاومت کم بوده و سنگ دانه ها مقاومت سایشی کمی داشته باشند منجر به خرابی می شود.
- بر طبق رابطه کمیته دوام (ACI) برای تهیه سطوح بتنی مقاوم در مقابل سایش، مقاومت فشاری بتن هیچ گاه نباید کمتر از 28 MPa شود.

فرسایش (Erosion)

- فرسودگی ناشی از عملکرد سایشی مایعات محتوی ذرات جامد معلق در سازه های هیدرولیکی، مانند روکش کانال ها، سرریزها و لوله های انتقال آب یا فاضلاب
- هنگامی که مایعی محتوی ذرات جامد معلق در تماس با بتن است، لغزش یا غلتیدن ذرات باعث فرسایش سطح بتن می گردد.
- میزان فرسایش سطح، به تخلخل یا مقاومت بتن و نیز به مقدار، اندازه، شکل، چگالی، سختی و سرعت ذرات در حال حرکت بستگی دارد.
- وقتی که شرایط فرسایش شدید وجود دارد پیشنهاد شده است که علاوه بر مصرف سنگدانه های سخت، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن باید حداقل 41 MPa باشد.
- همچنین قبل از در معرض محیط مهاجم قرار گرفتن، به طور مناسبی عمل آورده شود.

خلأزایی (Cavitation)

- کاهش جرم ناشی از تشکیل حباب های بخار و گسیختگی متعاقب آن بر اثر تغییر جهت ناگهانی در آب های با جریان سریع
- در سرعت های بیش از ۱۲ متر در ثانیه، جریان غیرخطی ممکن است سبب فرسایش شدید بتن بر اثر خلأ زایی بشود.
- در مقایسه با فرسایش یا سایش، یک بتن قوی ممکن است لزوماً برای جلوگیری از آسیب دیدگی ناشی از خلأ زایی مؤثر نباشد.
- بهترین راه حل برای مواجهه با این شکل از خرابی، از بین بردن علل بوجود آمدن خلأ زایی، مانند ناترازی سطح و یا تغییرات ناگهانی شیب می باشد.

2. ترک خوردگی

- ناشی از گرادیان معمولی دما و رطوبت، فشار های ناشی از تبلور نمک ها در منافذ، بارگذاری سازه ای، و قرارگیری در معرض شرایط دمایی شدید، نظیر یخ زدگی و آتش سوزی

دوام بتن در مقابل فرآیند های آسیب دیدگی

دوام بتن در مقابل فرآیند های آسیب دیدگی که به وسیله واکنش های شیمیایی شروع می شود، به طور کلی اما نه لزوماً متضمن فعل و انفعالات شیمیایی مابین مواد مهاجم موجود در محیط خارجی و اجزا خمیر سیمان می باشد. موارد استثناء:

- واکنش های قلیایی سنگدانه ها
- هیدراتاسیون به تعویق افتاده CaO و MgO متبلور
- خوردگی الکترو شیمیایی فولاد در بتن
- از نظر تئوری، هر محیطی با pH کمتر از ۱۲٫۵ ممکن است مهاجم باشد، زیرا کاهش درجه قلیایی مایع منفذی، نهایتاً منجر به ناپایدار سازی محصولات سیمانی ناشی از هیدراتاسیون می گردد.
- اغلب آب های صنعتی و طبیعی می توانند در زمره گروه مهاجم قرار گیرند.
- میزان حمله شیمیایی به بتن، تابعی از pH مایع مهاجم و نفوذپذیری بتن خواهد بود.

مکانیزم خوردگی آرماتور

خوردگی فولاد به دلیل فرایند الکتروشیمیایی در سطح فولاد در حضور رطوبت و اکسیژن رخ می دهد. چون پتانسیل الکتروشیمیایی در سطح فولاد در نقاط مختلف متفاوت است. نواحی آندی و کاتدی در آن بوجود می آید که توسط الکترولیتی به شکل محلول نمک در سیمان هیدراته شده به هم مرتبط هستند.

خوردگی آرماتور

- دو عامل اصلی که موجب از بین رفتن لایه محافظ آرماتور میباشند عبارتند از **یون کلر و کربناتاسیون**.
موقعی که احتمال دارد خوردگی آرماتور ختمی شود:
- ۱. اگر بتن به اندازه ای نفوذپذیر باشد که کربناتاسیون به بتنی که در تماس با فولاد است برسد.
- ۲. کلریدهای محلول بتوانند تا محل آرماتورها نفوذ کنند.
- ۳. آب و اکسیژن وجود داشته باشند،
خوردگی آرماتور ها حتمی خواهد بود.

تاثیر یون کلر

یونهای کلرید موجود در خمیر سیمانی که آرماتورها را احاطه کرده، با آب ترکیب شده و اکسید کلریدریک را تشکیل می دهند. که باعث می شود لایه نازک محافظ روی فولاد را از بین ببرد.

وقتی که مقادیر زیادی کلرید موجود باشد، بتن تمایل به حفظ رطوبت بیشتری دارد. این امر باعث افزایش احتمال خطر خوردگی فولاد بر اثر کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود. تنها کلریدهای محلول در ارتباط با خوردگی فولاد مؤثر بوده و کلریدهای دیگر در محمولات هیدراتاسیون ثابت می‌باشند.

کنترل خوردگی

یکی از عوامل مهم در دوام بتن، کنترل خوردگی است.

انواع سیمان‌های مفید در محدود نمودن سهولت حرکت و بی‌ثباتی یون‌های کلرید در داخل خمیر سیمان:

۱. سیمان‌های روباره‌ای

۲. سیمان‌های پوزولانی

برای محافظت در برابر خوردگی، حداکثر مقدار مجاز کلرید در بتن نیز در آیین‌نامه‌های ساختمانی مشخص است.

برای بتن‌هایی که در معرض محیط خورنده قرار دارند، آیین‌نامه‌های مختلف شرایط حداقل پوشش بتن را مشخص می‌نمایند.

همچنین در بتن‌های کاملاً غرق شده در آب، خوردگی زیادی وجود ندارد، مگر اینکه هوا وارد آب شود.

تحقیقات نشان داده که در رطوبت نسبی ۷۰٪ تا ۸۰٪، خوردگی حداکثر می‌باشد.

مکانیزم خوردگی آرماتور

شرایط	دسته بندی	شرایط
متوسط	A	سازه‌های رو زمینی که در معرض خطر نفوذ یون کلرید بر اثر وزش بادهای دارای یون‌های نمک نیستند
شدید	B	سازه‌های رو زمینی در نواحی نزدیک به ساحل و در معرض وزش بادهای حاوی یون‌های کلرید
شدید	C	قسمتهایی از سازه که در تماس با خاک است و بالای ناحیه موبینگگی خاک واقع شده است (به علت فشار کم آب یا وجود سیستم زهکشی خطر نفوذ شدید آب از سطح به داخل بتن وجود ندارد) و یا قسمت‌هایی که دائماً در زیر آب دریا واقع اند
بسیار شدید	D	(قسمت‌هایی از سازه که در تماس با خاک مهاجم است و در زیر سطح آب زیر زمین یوابع شده است) آب‌براحتی می‌تواند از سطح به داخل نفوذ پیدا کند
فوق‌العاده شدید	E	(سازه‌های دریایی) دارای قسمت‌هایی در ناحیه جزر و مدی و ناحیه پاشش
فوق‌العاده شدید	F	سازه‌های نگه‌دارنده ای‌آب و تصفیه‌خانه فاضلاب

کنترل ترک خوردگی

لایه ضد آب یا روکش مخلوط غیر قابل نفوذ بر روی بتن برای دوام بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شاخص مخلوط‌های بتنی مورد استفاده در روکش عبارت‌اند از:

۱. اسلامپ کم

۲. نسبت آب به سیمان خیلی کم (با فوق‌روان‌کننده)

۳. مقدار زیاد سیمان

ملات‌های سیمان پرتلند دارای امولسیون‌های پلیمری (لاتکس) نیز نفوذ ناپذیری خوبی از خود نشان می‌دهند.

اندود کردن میلگرد‌های مسلح جزء روش‌های نسبتاً پرهزینه‌تر برای جلوگیری از خوردگی است.

اندود‌های حفاظتی برای فولاد مسلح‌کننده از دو نوع هستند:

- اندودهای آندی (مانند فولاد پوشیده شده با روی)

- اندودهای راه‌بند (مانند فولاد با اندود اپوکسی)

عملکرد دراز مدت میلگردهای اندود شده با اپوکسی در بسیاری از کشورها تحت بررسی جدی می باشد. روش های **حفاظت کاتدی** نیز از روش های پرهزینه کنترل خوردگی است. این روش شامل جلوگیری جریان در پیل خوردگی با استفاده از آند های قربانی شونده می باشد. هر دو روش با نتایج نامشخص به صورت وسیع مورد استفاده قرار گرفته اند. نیترات و نیتريت کلسیم و نیتريت سدیم، خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید را تا حدی به تأخیر می اندازد.

آزمایش خوردگی برای دوام بتن

یکی از انواع متفاوت آزمایش **های بتنی**، آزمایش خوردگی می باشد.

- آزمایش تعیین پتانسیل خوردگی مطابق روش نیم پیل انجام می شود تا دوام بتن را در برابر خوردگی بسنجد.
- اختلاف ولتاژ بین آرماتور و یک الکتروود مبنا توسط یک ولت متر اندازه گیری می شود.
- الکتروود مبنا معمولاً از جنس مس - سولفات مس است.
- پتانسیل ثبت شده به عنوان نشانه ای از احتمال وقوع خوردگی در نظر گرفته می شود.

۱ - آزمایش **مقاومت الکتریکی**

۲ - آزمایش جذب موئینگی آب

۳ - آزمایش جذب حجمی آب

۴ - آزمایش (RCMT نفوذ یون کلراید)

۵ - آزمایش (RCPT نفوذ یون کلراید)

۶ - آزمایش کاهش وزن در محیط های اسیدی

۷ - آزمایش کاهش **مقاومت** در محیط های اسیدی

۸ - آزمایش کربناتاسیون (عمق نفوذ گاز کربنیک)

۹ - آزمایش توامان حمله کلرایدی و گاز کربنیک

۱۰ - سیکل های ذوب و یخ شدن

۱۱ - آزمایش اندازه گیری مقدار یون کلراید نفوذ کرده از طریق پودرگیری

۱۲ - آزمایش اندازه گیری مقدار یون سولفات نفوذ کرده از طریق پودرگیری

۱۳ - آزمایش سایش و فرسایش سطح **بتن**

۱۴ - آزمایش میزان حباب هوا و اندازه حفرات

۱۵ - آزمایش های سنجش میزان خوردگی **میلگرد** ها

۱۶ - آزمایش های تشخیص واکنش های قلیایی - سیلیسی (پتروگرافی)

۱۷ - آزمایش های تشخیص واکنش های قلیایی - کربناتی (پتروگرافی)

آزمایش های دوام سازه های بتنی

ارزیابی دوام بتن (آزمایش ها و معیارها)

ابتدا به اهمیت دوام وسیع تدریجی بها دادن به مسئله دوام پرداخته شده است و ضمن اشاره به بررسی دوام ازدیدگاه های مختلف، نیاز به انجام آزمایش های دوام مطرح گردیده است. همچنین سعی شده است این آزمایش ها از جهت بررسی مستقیم یا غیرمستقیم دوام بتن طبقه بندی گردد و مشکلات آزمایش های دوام و ارتباط آن با واقعیت طرح شود. در بخش دیگر به برخی آزمایش های رایج و معروف موجود پرداخته شده است. همچنین کمبود برخی آزمایش ها مطرح گردیده است. به هر حال پس از ذکر آزمایش ها و شرح

مختصر آنها به معیارهای طبقه بندی بتن و ارزیابی دوام اشاره شده است و به سهولت آزمایش ها و استناد به آنها توجه گردیده است. در پایان به انجام برخی تحقیقات در زمینه آزمایش های پایایی بتن در جنوب کشور جهت مقایسه نتایج حاصله برای تجدیدنظر در آیین نامه پایایی کشور و همچنین نگارش استانداردها و مشخصات فنی قطعات بتنی و آیین نامه ها اشاره شده است.

بتن، دوام، آزمایش، ارزیابی، معیار پذیرش

دوام یا پایایی بتن متناظر با سن یا عمر خدمت رسانی آندر شرایط محیطی مشخص به شمار می آید. بدیهی است با تغییر شرایط محیطی حاکم بر بتن، مفهوم دوام بتن تغییر می کند. طبق تعریف ACI 201، دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هواز دگی، تهاجم شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که به آسیب دیدگی می انجامد، گفته می شود. بنابراین، بتن پایا بتنیاست که تا حدود زیادی شکل اولیه و کیفیت و قابلیت خدمت رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ نماید [۱]. اکنون لزوم منظور نمودن مشخصات دوامی مصالح مصرفی در سازه ها همانند مشخصات مکانیکی پذیرفته شده است که همراه آن هزینه نیز منظور می گردد. افزایش فرایند هزینه های تعمیر و بازسازی سازه های آسیب دیده ناشی از تخریب مصالح مصرفی، بخش قابل توجهی از هزینه ساخت سازه ها را به خود اختصاص می دهد [۲]. برآوردی گردد در کشورهای پیشرفته صنعتی بیش از ۴۰ درصد کل منابع پولی صنعت ساختمان در بخش تعمیر و نگهداری سازه های موجود، و کمتر از ۶۰ درصد آن برای ایجاد سازه های جدید خرج می گردد [۲]. این موارد ما را بر آن می دارد که موضوع دوام مصالح مصرفی بویژه بتن را جدی بگیریم. علاوه بر هزینه، موضوع حفظ محیط زیست و آلودگی هوا و خاک و آب کره زمین و حفظ منابع خدادادی طبیعی این کره خاکی، ما را مجبور به با دوام تر ساختن بتن می نماید. سازه هایی همچون رویه های بتنی راه، فرودگاه و پارکینگ ها، بتن های سیلوهای غلات و سیمان و سایر مصالح معدنی، پلهای راه و راه آهن، باراندازها و اسکله های بتنی و پلهای ارتباطی آن، مخازن آب یا نفت و گاز مایع و غیره، جداول بتنی و قطعات نیوجرسی، قطعات پیش ساخته ای همانند تراورس و لوله های بتنی آب و فاضلاب، سازه های بتنی فراساحلی، سدهای بتنی و سرریزها، پوشش بتنی پیش ساخته و درجا برای تونل های راه و راه آهن و انتقال آب، سازه های بتنی تصفیه خانه های آب و فاضلاب، سازه های بتنی راکتورهای اتمی و تاسیسات وابسته به آن، کانالهای انتقال آب و آبروهای بتنی، دودکش ها و برج های مخابراتی بتنی، ساختمانها و بناهای مسکونی، تجاری، اداری و آموزشی، فرهنگی و ورزشی، نیروگاه های آبی، گازی و حرارتی، برجهای خنک کن باز و بسته نیروگاه های حرارتی، سازه های مرتبط با صنایع مختلف مانند سیمان، نفت و گاز، فولاد، شیشه و صنایع مختلف کشاورزی و غذایی، ساخت قطعات پیش ساخته غیر مسلح یا مسلح برای حفاظت از موج شکن ها و تاسیسات بندری و غیره از جمله مواردی است که مصرف بتن با دوام و قطعات بتنی با عمر زیاد را می طلبد. هرچند نیاز دیرباز مسئله دوام مصالح ساختمانی اهمیت داشته است اما بعد از جنگ جهانی دوم و بویژه از دهه ۷۰ میلادی به موضوع دوام بتن بیش از پیش پرداخته شده است و مرتباً بر اهمیت آن افزوده می شود. گستره دوام بتن به مراتب وسیع تر از موضوع مقاومت آن می باشد. تعیین مقاومت بتن به ویژه مقاومت فشاری آن امری است که طی سالیان گذشته به مدت بیش از ۱۰۰ سال به انجام رسیده است و به نظر می رسد حاوی نکات پیچیده ای نباشد، هرچند دارای جزئیات خاصی است و بهر حال در سن خاصی در کوتاه ترین زمان ممکن اندازه گیری می شود. اما در مورد دوام پیچیدگی بیشتری بدلیل سازه ها و کارهای متفاوت و آزمایش های گوناگون وجود دارد [۳].

طبقه بندی سازه و کار دوام و آزمایش های آن

دوام بتن دوام بتن ابعاد مختلفی دارد [۲]:

- پایایی در برابر عوامل فیزیکی (آتش، یخبندان و آب شدگی در پی، تبلور نمک ها)
- پایایی در برابر تهاجم شیمیایی (سولفات ها، کربناسیون، تاثیر واکنش قلیایی ها با سنگدانه ها بر بتن)
- پایایی در برابر عوامل مکانیکی (سایش، خللازی)
- تخریب در اثر خوردگی میلگرد

پی بردن به دوام بتن در شرایط مختلف نیاز به قرار گرفتن در این شرایط و طی شدن زمان قابل توجه دارد و معمولاً امکان انجام تحقیق در شرایط واقعی وجود ندارد و یا از حوصله دست اندرکاران خارج است. برای اینکه مشخص شود یک بتن در چنین شرایطی بطور مناسب و مطلوب عمل میکند نیاز به آزمایش هایی کوتاه مدت دارد که در این آزمایش ها عوامل تهاجمی یا اعمالی تشدید می شود (تسریع شده) و یا آزمایش بصورت تسریع نشده و در شرایط معمولی انجام می گردد که در این حالت دوم معیار مقایسه تغییر می کند. گاه برخی آزمایش های کوتاه مدت مرتبط با دوام و در معرض عاملی غیر از عامل مورد نظر مورد استفاده قرار می گیرد و با توجه به تجربیات موجود در پروژه های واقعی و در کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی معیارهایی ارائه می شود. نمونه ای از آزمایش های کوتاه مدت تسریع شده در برابر عامل تشدید شده مورد نظر، سایش یا آزمایش ASTM C1293 می باشد. نمونه ای از آزمایش تسریع نشده کوتاه مدت در شرایط تشدید نشده را می توان آزمایش یخبندان و آب شدگی دانست. از میان آزمایش های کوتاه مدت مرتبط با دوام که در معرض عامل اصلی مورد نظر قرار نگرفته است می توان آزمایش جذب آب یا جذب آب مویینه را نام برد. شاید بتوان آزمایش های جمع شدگی را نیز مرتبط با دوام دانست. آزمایشهای تراوایی (نفوذپذیری) نیز مرتبط با دوام به حساب می آید.

ارزیابی کیفیت بتن از نظر دوام و معیارهای آن

ارزیابی دوام از طریق انجام آزمایش هایی بر روی بتن سخت شده در سنین کم و گاه در سن موجود صورت می گیرد. برای این کار نیاز به معیارها و ملاک هایی می باشد. در زیر به برخی از آزمایش های ارزیابی بتن و معیارهای آن اشاره می شود.

آزمایش های یخ زدن و آب شدن

این آزمایش ها به دو صورت در استانداردها وجود دارد:

- یخبندان و آب شدگی پی در پی در حالت اشباع در آب یا هوا و کنترل کاهش وزن، کاهش مقاومت، افزایش حجم و کاهش مدول ارتجاعی دینامیکی مانند ASTM C666 [۴]

- یخبندان و آب شدگی پی در پی در مجاورت آب نمک یا نمک های یخ زدا و کنترل پوسته شدن سطح بتن و کاهش وزن آن مانند ASTM C1262 [۵]، ASTM C672 [۶] و EN1340 [۷]

به هر حال این آزمایش ها عمدتاً در سنین کم ۲۸ تا ۹۰ روزه بر روی بتن ها در آزمایشگاه انجام می شود و مدت زمان زیادی بطول می انجامد. امروزه در آزمایش های یخبندان در حالت اشباع مانند ASTM C666 از پارامتر کاهش مدول ارتجاعی دینامیکی استفاده می شود. پس از تعداد معینی سیکل یخبندان، درصد مدول ارتجاعی دینامیکی اولیه بدست می آید. حداقل درصد قابل قبول مدول ارتجاعی دینامیکی اولیه، یک ملاک یا ضابطه تلقی می شود. مثلاً بتنی با دوامتلقی می گردد که پس از ۳۰۰ سیکل یخبندان و آب شدگی مکرر، حداقل ۶۰ و یا ۸۰ درصد مدول ارتجاعی دینامیکی را دارا باشد [۴].

در مواردی تعداد سیکل های یخبندانی را که مدول ارتجاعی دینامیکی را به ۶۰ درصد مقدار اولیه می رساند مشخص می گردد. بدیهی است در این حالت باید حداقل تعداد سیکل های یخبندان مورد نظر به عنوان یک معیار اعلام گردد [۴].

در آزمایش های یخبندان و آب شدگی پی در پی در معرض مواد یخ زدا معمولاً درصد وزن بتن پوسته شده پس از تعداد معینی سیکل یخبندان بدست می آید. با محدود کردن میزان مواد پوسته شده، معیاری ارائه می گردد. به عنوان مثال ASTM C1372 [۸] پس از ۱۰۰ سیکل خاص یخبندان در آزمایش ASTM C1262 [۵] نباید از ۱ درصد وزن اولیه بیشتر شود.

هر چند در این آزمایش نیز می توان تعداد سیکل یخبندان برای دستیابی به درصد خاصی از پوسته شدن را به عنوان یک معیار برگزید، اما این امر سابقه چندانی ندارد. برای مثال در EN1340 برای جداول بتنی پیش ساخته مقدار مواد پوسته شده نباید از 1 kg/m^3 پس از ۲۸ سیکل خاص یخبندان در حالی که محلول نمک طعام ۳ درصد بر روی آن ریخته شده است، بیشتر باشد [۷].

در ASTM C672 معمولاً پس از ۵۰ سیکل یخبندان خاص در معرض مواد یخ زدا (محلول کلرید کلسیم ۴ درصد) که روی قطعه ریخته می شود و درجه تخریب سطح پس از ۵، ۱۰، ۲۵، ۱۵ و ۵۰ سیکل گزارش می شود که معیار درجه تخریب ارائه می شود [۶].

به هر حال باید دانست که در همه انواع آزمایش یخبندان آب شدگی مکرر در برابر آب یا نمک های یخ زدا، شرایط آزمایش با واقعیت موجود تطابق ندارد اما به ناچار از این آزمایش ها و معیارهای ارزیابی آن استفاده می شود.

در ASTM C1262 که برای قطعات پیش ساخته بتنی و برخی قطعات بنایی بکار می رود آب یا نمک ۳ درصد (بسته به نیاز) در مجاورت قسمت تحتانی قطعه ریخته می شود و معمولاً سیکل های خاص یخبندان اعمال می گردد و درصد کاهش وزن بدست می آید. با توجه به معیار خاص کاهش وزن در برابر تعداد خاصی سیکل یخبندان کیفیت دوامی قطعه کنترل می شود [۵].

آزمایش تبلور نمک ها

برای بررسی تاثیر تبلور نمک ها بر دوام بتن، آزمایش خاصی پیش بینی نشده است، هر چند عامل مهمی در مناطق نیمه خشک و خشک در تخریب سطح بتن ها محسوب می شود بویژه اگر املاح قابل توجهی در بتن و یا آب و خاک وجود داشته باشد [۲].

آزمایش دوام در برابر سولفات ها

برای بررسی دوام بتن در برابر سولفات ها آزمایش استاندارد خاصی در ASTM و EN مشاهده نمی شود. همچنین روشن است که معیار خاصی نیز وجود ندارد. پس از سالهای طولانی که از تشخیص خرابی بتن در اثر حمل سولفات ها گذشته است هنوز آزمایش خاص و معیار دوام بتن در برابر حمله سولفات ها و یا در برابر سولفات خاصی ارائه نشده است [۸].

سعی می شود با استفاده از سیمان مناسب، محدودیت نسبت آب به سیمان و یا عیار سیمان و یا استفاده از افزودنی های خاصی مانند پوزولان ها و سرباره ها و یا حباب زرا و مواد آب بند کننده، دوام بتن را بالا برده اما نحوه تشخیص این افزایش دوام روشن نیست [۱]. سعی شده است آزمایش هایی بر روی سیمان یا ملات در محلول سولفات دار انجام گردد و انبساط آنها اندازه گیری شود و با تعیین معیارهایی، کیفیت سیمان از نظر مقابله با حمله سولفات ها مشخص گردد [۹ و ۱۰].

آزمایش هایی برای نفوذ و انتشار سولفات در بتن پیشبینی شده است اما هنوز استاندارد نشده است. با این حال نفوذ سولفات در بتن دقیقاً نمی تواند دوام بتن در برابر سولفات ها را به نمایش گذارد [۱۱ و ۱۲].

آزمایش کربناسیون

آزمایش ساده و معمول تعیین عمق کربناسیون تا چندی پیش صرفاً بر اساس دستورالعمل RILEM CPC18 انجام می گردید [۱۳] که EN نیز به تازگی دستورالعمل استاندارد را مشابه RILEM ارائه کرده است [۱۴]. در این آزمایش عمق بتن کربناته شده با محلول فنل فتالین به عنوان یک معرف اندازه گیری میشود. معمولاً این آزمایش بر روی بتن سخت شده در شرایط محیطی واقعی اندازه گیری میشود که می توان تحت شرایطی نفوذ CO₂ را تسریع نمود [۱۳]. به هر حال هنوز معیار خاصی برای قدرت مقابله با کربناسیون و عمق نفوذ آن ارائه نشده است. هر چند می توان میزان نفوذپذیری گاز CO₂ در بتن را اندازه گیری نمود. می توان با اندازه گیری pH پودر بتن پروفیل pH در برابر عمق راسم کرد و عمق کربناسیون را مشخص نمود [۱۵].

آزمایش انبساط ناشی از واکنش قلیایی ها با سنگدانه های بتن

معمولاً بیشتر آزمایش ها در این زمینه بر روی ملات میباشد و یا شرایط خاصی همچون تشدید شرایط حاکم و یا افزایش قلیایی ها در ملات و یا محیط نگهداری را دارا می باشد. طبق استاندارد ASTM C1293 و تعدادی از استانداردهای کانادایی، انبساط بتن در شرایطی نزدیک به واقع اما در دمای ۳۸ یا ۶۰ درجه با رطوبت ۱۰۰ درصد را در زمانی طولانی تر از ۶ ماه و یا یک سال و بیشتر بدست می آورند [۱۶]. معیارهایی همچون انبساط ۰/۰۴ درصد پس از سه ماه در ۶۰ درجه سانتیگراد و یا پس از یک سال در ۳۸ درجه سانتیگراد ارائه شده است. به هر حال در این آزمایش انبساط بالقوه بتن بدست می آید [۱۷، ۱۸ و ۱۹].

برای سنگدانه کربناتی از ASTM C1105 استفاده می شود و معیارهایی برای آن ارائه شده است [۱۷ و ۲۰].

آزمایش های سایش

در استاندارد ASTM برای بتن چهار آزمایش سایش ارائه شده است و برای برخی قطعات بتنی نیز از این آزمایش ها و یا آزمایش های دیگری استفاده می شود.

ASTM C944- برای سایش بتنی ملات (روش سمباده چرخان) [۲۱]

ASTM C418- برای سایش بتن (روش ماسه پاشی) [۲۲]

ASTM C779- برای سایش سطوح افقی بتنی (سه روش صفحه مدور سمباده ای چرخان، چرخ استوانه ای دندانه دار،

بلبرینگ چرخان) [۲۳]

ASTM C1138- برای سایش بتن (روش زیر آب) [۲۴]

به نظر می رسد در آزمایش های سایش دقت زیادی شده است تا نزدیکی بیشتری با واقعیت موجود داشته باشد که تنوع آزمایش ها را سبب گشته است.

در موارد مختلف برای هر نوع قطعه یا سطح در هر پروژیهی کاربرد خاص، معیاری ارائه می شود که نشانه دوام بتن در برابر سایش است. در برخی استانداردهای دیگر آزمایش سایش چرخ عریض و آزمایش سایش Bohme پیش بینی شده است. برای مثال در استاندارد جداول بتنی (EN 1340) این دو آزمایش پیش بینی شده است و معیار خاصی در هر مورد ارائه شده است [۷].

جدول ۱- تقسیم بندی کیفیت سایشی جداول بتنی طبق EN 1340 [۷]

رده از نظر سایش*	نتیجه آزمایش سایش چرخ پهن (حداکثر)	نتیجه آزمایش سایش Bohme (حداکثر)
متوسط	۲۳ میلی متر	کمتر از $20000\text{mm}^3/5000\text{mm}^2$
خوب	۲۰ میلی متر	کمتر از $18000\text{mm}^3/5000\text{mm}^2$

* در مورد رده ضعیف هیچ ضابطه ای ارائه نمی شود.

آزمایش های نفوذ پذیری

آزمایش های نفوذ پذیری بتن در برابر آب و گازهای مختلف حتی برخی سیال های خاص دیگر انجام می شود.

آزمایش های نفوذ پذیری در برابر آب

آزمایش های نفوذ پذیری بتن در برابر آب از گذشته دور بر اساس رابطه دارسی انجام می شده است. ارتش آمریکا و USBR آزمایش هایی را برای تعیین ضریب نفوذ پذیری بتن در برابر آب ارائه کرده اند که بسیار مشکل است. در روش ارتش آمریکا (CRD-C48) فشار حدود ۱۴ اتمسفر و در روش USBR4913 فشار ۲۸/۵ اتمسفر بکار می رود [۲۵ و ۲۶]. در این آزمایش ها مقدار k با بعد L/T بدست می آید. در هر پروژیهی مقدار حداکثر k مشخص می شود و لازم است بتن مورد نظر این خواسته را برآورد کند. بتن هایی که در حال حاضر برای پروژه های آبی ساخته می شود دارای نفوذ پذیری پایینی است و عملاً انجام این آزمایش و تعیین k بصورت مستقیم غیر ممکن گشته است. بدین دلیلی سعی شده است با اندازه گیری عمق نفوذ آب در این آزمایش و با استفاده از یک سری روابط تجربی بر اساس فرضیات مختلف، از عمق نفوذ مقدار k را بدست آورد که نتایج آن قابل اعتماد نمی باشد.

جدول ۲- تقسیم بندی کیفیت نفوذناپذیری بتن بر اساس ضریب نفوذ پذیری آب [۲۷]

کیفیت نفوذناپذیری بتن	خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
ضریب نفوذ پذیری (m/s)	بیشتر از 10^{-6}	10^{-6} تا 10^{-7}	10^{-7} تا 10^{-8}	10^{-8} تا 10^{-9}	10^{-9} تا 10^{-10}	کمتر از 10^{-10}

همچنین روش های درجا و آزمایشگاهی معروف دیگری نیز وجود دارند که به جای ارائه ضریب نفوذ پذیری، شاخص های نفوذ پذیری را بدست می دهند. از جمله این آزمایش ها می توان به آزمایش فیگ (Figg) و یا آزمایش Autoclam اشاره کرد. این آزمایش ها در ایران رایج نیست و ممکن است به ندرت در کارهای تحقیقاتی استفاده شده باشد. به هر حال محققین بر اساس این آزمایش ها معیارها و طبقه بندی هایی را برای کیفیت بتن ارائه کرده اند.

آزمایش های نفوذ پذیری در برابر گاز

آزمایش های نفوذپذیری با گاز به ویژه اکسیژن روش های مختلفی دارد که معروف ترین آن مربوط به روش CemBureau (انجمن سیمان اروپا) می باشد که در RILEM و استاندارد ایتالیا (UNI) نیز آورده شده است [۲۸ و ۲۹]. در این روش، نمونه قرصی شکل بتنی در محفظه‌ای با تیوبدورگیر تحت فشار قرار گرفته و در فشارهای مختلف اعمالی، دبی عبوری گاز بدست آمده و با رابطه اصلاح شده داری برای سیال تراکم پذیر، ضریب نفوذپذیری محاسبه می‌گردد. نتیجه این روش آزمایش به درصد رطوبت نمونه بتنی بسیار وابسته می باشد. به همین دلیل، در روش پیشنهادی این آزمایش، دو رژیم نمونه کاملا خشک و با درصد رطوبت مشخص، پیشنهاد شده است [۲۸ و ۲۹].

معیار میزان نفوذپذیری در برابر اکسیژن در مشخصات فنیداده می شود اما تلاش شده است بتن ها از این نظر تقسیم بندی شوند که در زیر دیده می شود.

جدول ۳- تقسیم بندی کیفیت بتن بر اساس نفوذپذیری بتن در برابر اکسیژن به روش CemBureau (نمونه خشک) [۳۰]

کیفیت	عالی	خیلی خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف
ضریب نفوذپذیری (m^2 ۱۰-۱۶)	کمتر از ۰/۱	۰/۱ - ۰/۵	۰/۵ - ۲/۵	۲/۵ - ۱۲/۵	بیشتر از ۱۲/۵

در منطقه خلیج فارس با توجه به آیین نامه پایایی بتن، برای شرایط E و F کیفیت عالی و برای B و C خیلی خوب و برای شرایط A حالت کیفی متوسط پیشنهاد می شود. هرچند ممکن است با بکارگیری چنین بتن هایی در عمل به نتیجه چندان خوبی هم دست نیافت.

آزمایش های نفوذپذیری در برابر یون کلرید (آزمایش های انتشار یون کلرید)

کامل ترین راه برای تعیین ضریب انتشار یون کلرید در بتن طبق روش جدید ASTM C1556 [۳۱] که مشابه روش NTBuild 443 [۳۲] است، می باشد. در این روش بتن سخت شده در محلول نمک طعام با غلظت معین قرار می گیرد و در سن مورد نظر پس از خشک کردن آن، با تعیین یون کلرید در اعماق مختلف، با توجه به قانون فیک (Fick) ضریب انتشار یون کلرید بدست می آید که بعد آن L^2/T است.

برای بتن هر پروژه می توان ضریب انتشار خاصی را در نظر گرفت. بتن ها از این نظر به ویژه در شرایط رویارویی با یون کلرید تقسیم بندی میشوند که در زیر مشاهده می گردد.

جدول ۴- تقسیم بندی نفوذپذیری بتن بر اساس ضریب انتشار یون کلرید [۳۳]

طبقه بندی نفوذپذیری	شدید	متوسط	کم	ناچیز
ضریب انتشار یون کلرید (m^2/s ۱۰-۱۲)	بیشتر از ۵	۱ تا ۵	۰/۲ تا ۱	کمتر از ۰/۲
ضریب انتشار یون کلرید ($mm^2/Year$)*	بیشتر از ۱۵	۳ تا ۱۵	۰/۶ تا ۳	کمتر از ۰/۶

* اعداد ذکر شده دقیقا با ردیف فوق یکسان نیست.

یکی از پارامترهای منحصر بفردی که می توان به کمک آن بهره گیری از اطلاعات و فرضیات دیگر در هر سنی غلظت یون کلرید پیش بینی نمود در هر عمقی به چه میزان است، ضریب انتشار یون کلر می باشد و بر این اساس زمان رسیدن غلظت یون کلرید در مجاورت میلگرد به حد آستانه تعیین می گردد که زمان شروع خوردگی رامشخص می کند [۳۴].

معمولا از آنجا که تعیین این پارامتر دشوار است، سعی می شود بجای آن، پارامترهای دیگری مشخص شود و جایگزین آن گردد در حالی که عملا نمیتوانند جای آن را بگیرند. یکی از آزمایش های رایج AASHTOT259 است که سطح بتن در معرض محلول کلرید قرار میگیرد و مقدار یون کلرید در سنین خاص و در عمق های خاص اندازه گیری می شود و عمق نفوذ یون کلرید بدست می آید که به کمک آن می توان کیفیت بتن ها را در مقایسه با یکدیگر ارزیابی نمود و می توان بتن ها را نیز از این نظر طبقه بندی کرد. به هر حال نتیجه این آزمایش از جنس نفوذپذیری نیست اما نفوذپذیری را نشان می دهد [۳۵].

روش دیگر برای تعیین نفوذ سریع یون کلرید (مهاجرت) توسط دستور NTBuild 492 [۳۶] ارائه شده است که AASHTO T277 [۳۷] روش مشابه آن را ارائه کرده است. استاندارد ASTM C1202 روش را برای تعیین سریع نفوذپذیری کلرید در بتن سخت شده ارائه می دهد که در این روش در دو سمت یک قرص بتنی کاملاً اشباع شده در خلا به قطر حدود ۱۰۰ میلیمتر ضخامت ۵۰ میلیمتر محلول های کلرید سدیم و سود سوزآور با غلظت معین قرار می گیرد و جریان الکتریکی با اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت برقرار می شود و شدت جریان عبوری از بتن اشباع بدست می آید و طی ۶ ساعت، مقدار جریان عبوری از بتن برحسب کولمب محاسبه می گردد که نشانه مقاومت بتن در برابر این جریان است و به عبارتی به نوعی به مقاومت الکتریکی مربوط می باشد. هرچه این جریان عبوری بیشتر باشد نشانه نفوذپذیری بیشتر بتن به ویژه در برابر یون کلرید است. طبقه بندی بتن ها را می توان طبق ASTM C1202 بصورت زیر دانست [۳۸].

جدول ۵- نفوذپذیری در برابر یون کلرید براساس میزان جریان عبوری

نفوذپذیری در برابر یون کلر	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	ناچیز
بیشتر از ۴۰۰۰	۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۱۰۰ تا ۱۰۰۰	کمتر از ۱۰۰	

در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در محیط خلیج فارس دریای عمان (نشریه شماره ض ۴۲۸ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن) معیارهای زیر برای شرایط مختلف طبق روش ASTM C1202 ارائه شده است [۳۴].

جدول ۶- مقادیر مجاز میزان جریان عبوری در شرایط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
میزان جریان عبوری (کولومب)	حداکثر ۳۰۰۰	حداکثر ۳۰۰۰	حداکثر ۲۰۰۰

بهتر است در آینده با تجدید نظر در طبقه بندی موجود برای برخی رده های مورد نظر مانند E یا F شرط سخت گیرانه تری مانند ۱۲۰۰ یا ۱۰۰۰ کولومب منظور شود. در عوض برای شرایط محیطی A حداکثر ۴۰۰۰ کولومب نیز پذیرفته گردد. به هر حال این آزمایش و نتایج آن محل تردید است. برخی معتقدند که بهتر است اختلاف پتانسیل را کم کرده و مدت را متناسباً زیاد نمود تا دامای بتن و محلول ها حین آزمایش بطور شدید بالا نرود و شرایط واقعی تری برقرار باشد [۳۹]. ظاهراً قرار است تغییری در یکی از محلول ها نیز در دستور کار قرار گیرد. به هر حال این آزمایش طی یک روز منجر به اخذ نتیجه می شود و این امر بسیار مهم است.

آزمایش های عمق نفوذ آب

از آنجا که آزمایش های نفوذپذیری در برابر آب همراه چالش های فراوانی است، در برخی کشورهای اروپایی مانند آلمان آزمایش دیگری انجام می شد که تحت فشار آب، در زمان معینی، عمق آب نفوذی در بتن بدست می آمد (DIN 1048-5) [۴۰]. سپس در EN12390-8 با تغییرات مختصر، این آزمایش با سهولت بیشتر ارائه شد که در آن نمونه بتنی سه روز از سطح زیرین تحت فشار ۰/۵ MPa (۵ بار) قرار می گیرد و سپس حداکثر عمق نفوذ آب بدست می آید که پارامتری در جهت ارزیابی نفوذ آب در بتن می باشد [۴۱]. در منابع مختلف طبقه بندی بتن ها در آزمایش DIN 1048 آمده است اما هنوز این طبقه بندی برای آزمایش براساس روش EN ارائه نشده است. پراکندگی نتایج آزمون های مختلف یک نوع بتن در این آزمایش زیاد است و چندان قابل اعتماد نمی باشد [۳۳].

در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس، معیارهای زیر برای شرایط مختلف محیطی حاکم ارائه شده است [۳۴].

جدول ۷- مقادیر مجاز عمق نفوذ آب در شرایط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
-------------	---	-------	----------

عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روز (mm)	حداکثر ۵۰	حداکثر ۳۰	حداکثر ۱۰
-------------------------------	-----------	-----------	-----------

دستیابی به حداکثر عمق نفوذ آب ۱۰ میلیمتر عملاً بسیار مشکل است و با ضوابط دیگر انطباق مناسبی ندارد و تجدیدنظر در معیار آن ضروری به نظر می رسد. شاید حداکثر عمق نفوذ آب برای طبقه D را بتوان ۲۰ میلیمتر و برای E و F حداکثر ۱۰ یا ۱۵ میلیمتر منظور نمود.

به هرحال الزاما در شرایط واقعی، فشار تا این حد وجود ندارد اما این آزمایش به نوعی تعیین کننده کیفیت بتن می باشد.

آزمایش های جذب آب

آزمایش های جذب آب به شکل های مختلفی وجود دارد که مهم ترین آنها عبارتند از:

- جذب آب کوتاه مدت نیم ساعته (Early Water Absorption)

- جذب آب نهایی (بلند مدت) ۲ روزه یا بیشتر در شرایط عادی یا جوشانده شده (Final Water Absorption)

- جذب آب سطحی اولیه (ISAT Initial Surface Water Absorption Test)

- جذب آب مویینه (Capillary Water Absorption و Water Sorptivity)

هر کدام از این آزمایش ها یک ویژگی خاص از بتن را به نمایش می گذارد و لازم است از هر آزمایش زمانی استفاده نمود که به واقعیت موجود شباهتی داشته باشد [۴۲].

آزمایش جذب آب کوتاه مدت

در BS 1881 در سال های گذشته آزمون مکعبی خشک ۱۰۰ میلی لیتری در آب غرق می شود پس از یک ساعت درصد وزنی آب جذب شده بدست می آید که گزارش می شد. در BS 1881 part 122 این آزمایش عمدتاً برای قطعات بتنی پیش ساخته پس از مغزه گیری به قطر ۷۵ میلیمتر انجام می شود که باید دارای طول معینی باشد و نمونه کاملاً خشک شده در آون، غرقاب می شود و درصد جذب آب نیم ساعته بدست می آید [۴۳]. این آزمایش کیفیت سطحی بتن مورد نظر را بدست می دهد.

در انگلیس کیفیت جداول بتنی و برخی قطعات پیش ساخته با این آزمایش کنترل می شود. برای مثال جذب آب نیم ساعته یک جدول نباید از ۲ درصد بیشتر باشد [۴۴]. در آزمایش های جذب آب کوتاه مدت حساسیتی در مورد شکل و اندازه نمونه وجود دارد و نسبت سطح به حجم اهمیت پیدا می کند. در استاندارد BS 1881 ضرایب تصحیح خاصی پیش بینی شده است تا در صورت تغییر قطر و طول نمونه نسبت به قطر و طول استاندارد، بتوان نتایج تصحیح شده را محاسبه نمود [۴۳].

در توصیه های CIRIA برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ و غیره، حداکثر جذب آب کوتاه مدت طبق BS 1881 را ۲ درصد مطرح نموده است [۴۵].

در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس، معیارهای زیر برای شرایط مختلف محیطی حاکم با روش BS 1881 part 122 ارائه شده است [۳۴].

جدول ۸- مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه مدت در شرایط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
درصد جذب آب (%)	حداکثر ۴	حداکثر ۳	حداکثر ۲

به نظر می رسد لازم است با تجدید نظر در مورد شرایط E و F مقدار حداکثر جذب آب نیم ساعته را به ۱/۵ درصد محدود کرد.

آزمایش جذب آب نهایی

هر چند در آزمایش جذب آب کوتاه مدت قدیمی و جدید BS 1881 می توان با تداوم آزمایش تا رسیدن به وزن ثابت، جذب آب نهایی را بدست آورد و حتی با جوشاندن آن در آب به جذب آب نهایی بیشتری دست یافت، اما در این دستور چنین پیش بینی هایی صورت نگرفته است. در ASTM C642 مقدار جذب آب نهایی بدست می آید و می توان چگالی و تخلخل را نیز بدست آورد، حتی جوشاندن نمونه در آب نیز پیش بینی شده است. در این استاندارد در مورد شکل و اندازه نمونه حساسیتی وجود ندارد اما حداقل جرم و حجم مشخص شده است زیرا به موضوع جذب آب نهایی پرداخته است. این آزمایش عمدتاً برای قطعات پیش ساخته کار می رود

[۴۶]. در استاندارد EN 1340 جذب آب نهایی قطعات پیش ساخته ای مانند جداول بتنی به چشم می خورد که حداقل برای حجم یا جرم نمونه مطرح شده است [۷]. در استانداردهایی همچون ASTM C497، مقدار جذب آبلوله های بتنی بدست می آید که دو روش A و B با توجه به نحوه خشک کردن و زمان جوشاندن نمونه در آب دارد [۴۷]. برای مثال در برخی استانداردهای قطعات پیش ساخته در ASTM C76 مانند لوله های بتن مسلح آب و فاضلاب، حداکثر جذب آب نهایی طبق ASTM C497 به میزان ۹ درصد برای روش A و ۸/۵ درصد برای روش B مطرح شده است [۴۸] و از این نظر می توان معیار و طبقه بندی برای کیفیت دوامی بتن ارائه نمود، بویژه اگر قطعیه بتنی بصورت غرقاب باشد و آب همواره در مجاورت آن حضور داشته باشد. در استاندارد لوله های بتنی آب و فاضلاب ایران به شماره ۸۹۰۶ از چنین مشخصاتی استفاده شده است [۴۹]. در استاندارد EN 1340 در مواردی که شرایط یخبندان و آب شدگی حادی در برابر نمک های یخزدا وجود ندارد. حداکثر جذب آب نهایی ۶ درصد برای جداول بتنی پیش ساخته ارائه شده است [۷]. به نظر می رسد برای بتن های با دوام، حداکثر جذب آب نهایی بتن بهتر است به ۶ درصد و برای حالت جوشانده شده به ۵/۵ درصد محدود شود. برای مناطق حاشیه خلیج فارس بتن های مورد نظر در شرایط محیطی طبقه بندی شده در آییننامه پایایی بتن پیشنهادی، مقدار جذب آب نهایی زیر توسط اینجانب پیشنهاد می شود.

جدول ۹- مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه مدت در شرایط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی

شرایط محیطی	A	B و C	D	E و F
حداکثر درصد جذب آب نهایی (%)	۶	۵	۴	۳/۵
حداکثر جذب آب نهایی جوشانده (%)	۷	۵/۵	۴/۵	۴

در برخی مشخصات استاندارد قطعاتی مانند بلوک سیمانی و موزاییک و آجرهای سیمانی به جذب آب نهایی پرداخته شده است [۵۰، ۵۱ و ۵۲].

آزمایش جذب آب سطحی اولیه

این آزمایش عمدتاً در BS1881 part208 پیش بینی شده است. در این آزمایش سعی می شود مقدار جذب آب ریخته شده روی سطح افقی نمونه بتنی یا قسمتی از قطعات پیش ساخته در حالیکه ارتفاع آب چندان برای اعمال فشار وجود ندارد و به میزان ۲۰۰ میلیمتر محدود شده است، بدست آید. در این آزمایش در فواصل زمانی مختلف مقدار آب جذب شده بر حسب گرم یا میلی لیتر بر واحد سطح (m^2) گزارش می شود [۵۳].

طبقه بندی کیفی بتن ها در این آزمایش را می توان بصورت زیر مطرح کرد. در انگلیس از نتایج این آزمایش استفاده می شود اما در آییننامه پایایی بتن ایران در حاشیه خلیج فارس و یا در استانداردهای قطعات پیش ساخته مانند جداول مورد اقبال قرار نگرفته است. به هر حال این آزمایش برای موادی که باعث آب بندی سطحی می شوند می تواند با موفقیت بکار رود و کیفیت سطحی را به نمایش گذارد [۴۲].

جدول ۱۰- تقسیم بندی جذب سطحی بتن با معیار جذب سطحی اولیه ($mL/m^2/s$)

میزان جذب	زمان پس از شروع آزمایش				جذب تجمعی در ساعت (mL/m^2)
	۱۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۱ ساعت	۲ ساعت	
زیاد	بیشتر از ۰/۵۰	بیشتر از ۰/۳۵	بیشتر از ۰/۲۰	بیشتر از ۰/۱۵	بیشتر از ۲۰۰۰
متوسط	۰/۲۵ - ۰/۵۰	۰/۱۷ - ۰/۳۵	۰/۱۰ - ۰/۲۰	۰/۰۷ - ۰/۱۵	۱۰۰۰ - ۲۰۰۰
کم	کمتر از ۰/۲۵	کمتر از ۰/۱۷	کمتر از ۰/۱۰	کمتر از ۰/۰۷	کمتر از ۱۰۰۰

به نظر می رسد در محیط خلیج فارس بویژه در شرایط D، E و F، میزان جذب باید در حد کم و یا در حدی به مراتب کمتر از آن باشد.

جذب آب مویینه

یک ساز و کار جذب آب، حرکت آب به صورت نم مویینه روبه بالا می باشد که نیاز به انجام آزمایش خاص و هماهنگ با این ساز و کار احساس میشود.

در این آزمایش ها معمولا مقدار آب جذب شده در واحد سطح، ارتفاع نم مویینه و آهنگ جذب آب مویینه تعیین و گزارش می شود که در همهدستورها بصورت یکسان نیست و در هر دستور به برخی از این پارامترها پرداخته می شود.

دستور آزمایش RILEM CPC11.2 از جمله دستورهای آزمایش قدیمی در این زمینه است که سالها مورد استفاده قرار گرفته است [۵۴]. اخیرا دستور استاندارد ASTM C1585 ارائه شده است که با دقت بیشتری شرایط آزمایش و شکل آزمون را مشخص نموده است [۵۵]. در این آزمایش از یک قرص بتنیبه قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۵۰ میلیمتر استفاده می شود که بخش تحتانی آن به میزان ۱ تا ۳ میلیمتر در آب قرار گرفته است و رطوبت محیط اطراف نمونه نیز کنترل می گردد در نهایت، آهنگ جذب آب مویینه در بازه های زمانی مختلف بدست می آید.

لازم به ذکر است که در این استاندارد دو مقدار آهنگ جذب آب اولیه و ثانویه بدست می آید که معمولا نرخ جذب آب ثانویه به مراتب کمتر از نرخ جذب آب اولیه است. در حالیکه در روش RILEM فقط یک نرخ جذب آب بدست می آید. نگاه ASTM به نرخ جذب آب از RILEM منطقی تر به نظر می رسد و اشکال موجود در روش RILEM و مشکلات برازش یک خط بر چهار نقطه موجود در این روش را حل نموده است. ضمن اینکه تعداد نقاط رسم شده در صفحه مختصات را بهمقدار قابل توجهی افزایش داده است و با برازش دو خط به دو مجموعه از این نقاط، برخورد واقع بینانه تری داشته است.

هنوز طبقه بندی خاصی در مورد کیفیت بتن ها با کاربرد این آزمایش مطرح نشده است و آنچه در زیر مشاهده می شود عمدتا مربوط به آزمایش های انجام شده بر اساس دستور RILEM می باشد [۵۶].

جدول ۱۱- محدوده پذیرش جذب آب مویینه بتن با دوام

کیفیت بتن	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف
جذب آب ($\text{mm/h}^{-0.5}$)	کمتر از ۰/۱	۰/۱ تا ۰/۱۵	۰/۱۵ تا ۰/۲	۰/۲ تا ۰/۲۵	بیشتر از ۰/۲۵

هرچند ساز و کار برخی خرابی ها در ایران و حتی جنوب کشور مربوط به جذب آب مویینه است، اما در دستورهای استاندارد ایران این آزمایش برای بتن جایگاهی ندارد و طبعا مشخصات استاندارد و محدودیت خاصی نیز مطرح نگردیده است. به هر حال به نظر می رسد برای شرایط E و F، کیفیت عالی و یا بهتر از آن، برای شرایط D کیفیت خیلی خوب یا عالی، برای B و C حالت خوب یا خیلی خوب و برای رده A، کیفیت خوب یا متوسط کاربرد دارد.

آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

سهولت یا سختی عبور جریان الکتریکی از بتن اشباع میتواند نشانه ای از نفوذپذیری آن در برابر آب و به ویژه انتشار و مهاجرت یونی (به ویژه یون کلرید) باشد مخصوصا اگر با آب نمک اشباع گردد. این آزمایش بین پژوهشگران بسیار معروف و رایج است اما دستور استاندارد خاصی برای آن تدوین نشده است. این آزمایش با استفاده از دو صفحه مسی یا برنجی که بر سطح آزمون بتنی اشباع از آب به کمک خمیر سیمان تازه می چسبند و مقاومت الکتریکی به کمک اعمال یک جریان متناوب با فرکانس مشخص بدست می آید. می توان با داشتن سطح بتنی فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی را بدست آورد. همچنین می توان با چهار الکتروود (روش ونر) و تعبیه آن بر سطح بتن یا در سوراخ خاص و برقراری اتصال و تماس الکتریکی، مقاومت الکتریکی و مقاومت ویژه آن را بدست آورد. این روش برای قطعات بتنی موجود نیز قابل استفاده است، در حالی که روش قبلی فقط برای آزمون های آزمایشگاهی مکهبی، استوانه ای یا منشوری و مکعب مستطیل کاربرد دارد. در صورتی که نخواهیم مقاومت ویژه الکتریکی را بدست آوریم از دو الکتروود استفاده کرد که به عمق معین و فاصله معینی از یکدیگر در بتن فرو می رود و بصورت مقایسه ای می توان مقاومت الکتریکی بتن را در بین دو الکتروود بدست آورد. در راه انجام این آزمایش مشکلات و مباحث خاصی مطرح میشود که عبارتند از:

- میزان رطوبت و اطمینان از اشباع بودن بدلیل تاثیر شدید رطوبت بر مقاومت الکتریکی بتن
- نوع جریان و فرکانس مصرفی بدلیل تاثیر آن بر نتایج حاصله
- نقش شکل و اندازه نمونه بر نتایج حاصله
- نقش روش آزمایش (الکتروود چهارگانه یا صفحات)
- نقش افزودنی های شیمیایی در تغییر نتایج
- نقش مقاومت الکتریکی سنگدانه های بتن در تغییر نتایج
- نقش هدایت الکتریکی الکترولیت موجود در منافذ به علت املاح محلول در آن
- نقش دما در مقاومت الکتریکی

به هرحال لازم است با محدود کردن تغییرات احتمالی، دستور استاندارد واحدی را تدوین کرد و بتن ها را از این نظر مقایسه نمود و طبقه بندی کرد. ظاهرا کمیته ای در ASTM مشغول به تدوین چنین دستوالعملی می باشد [۱۵، ۵۷، ۵۸ و ۵۹].
طبقه بندی زیر که معیاری جهت ارزیابی بتن محسوب میشود، ارائه شده است [۳۹].
جدول ۱۲- تقسیم بندی احتمال خوردگی میلگرد براساس آزمایش مقاومت الکتریکی

ناچیز	کم	زیاد	خیلی زیاد	احتمال خوردگی میلگرد
بیش از ۲۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	۵۰ تا ۱۰۰	کمتر از ۵۰	مقاومت ویژه الکتریکی بتن (اهم-متر)

با پیشنهاد طبقه بندی زیر، به نظر می رسد برای شرایط D، E و F از کیفیت عالی، برای شرایط B و C از کیفیت خوب و یا خیلی خوب و برای شرایط A کیفیت متوسط بکار گرفته شود.

جدول ۱۳- تقسیم بندی پیشنهادی کیفیت بتن بر اساس آزمایش مقاومت الکتریکی

خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی	کیفیت بتن
کمتر از ۵۰	۷۵ تا ۵۰	۱۰۰ تا ۷۵	۱۵۰ تا ۱۰۰	۲۰۰ تا ۱۵۰	بیش از ۲۰۰	مقاومت ویژه الکتریکی بتن (اهم-متر)

لازم به ذکر است اشباع کردن بتن در آب یا آب نمک باغلظت های معین، به شدت بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن اثر می گذارد و وجود نمک محلول در منافذ بتن، مقاومت ویژه الکتریکی آن را به مقدار قابل توجهی کاهش می دهد. به هرحال مقادیر مندرج در جداول فوق، برای حالت اشباع در آب قابل شرب صادق می باشد.

اعداد جداول فوق ارتباط تنگاتنگی با مقادیر طبقه بندیهای مندرج در جدول ۵ (نفوذپذیری در برابر یون کلرید بر اساس جریان عبوری) دارد اما بدست آوردن یک رابطه کلی بین آنها به سهولت مقدور نمی باشد، مگر اینکه در رابطه بایک بتن مشخص، رابطه خاصی بدست آید.

آزمایش های تغییر حجم و ساختار بتن

لازم به ذکر است که آزمایش هایی در مورد جمع شدگی و انبساط بتن وجود دارد که به دوام مربوط می شود. برخی از اشکال دوام دارای آزمایش استاندارد معتبر نمی باشد. در آزمایش استاندارد ASTM C827 [۶۰] تغییرات حجمی اولیه بتن تازه مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین در سالهای اخیر در ارتباط با تعیین زمان ترک خوردگی خمیری مقیدبتن که در معرض تبخیر خاصی قرار می گیرد دو آزمایش ASTM C1579 [۶۱] و ASTM C1581 [۶۲] پیشنهاد شده است که اولی برای بتن الیافی و دومی برای بتن معمولی کاربرد دارد و عمدتا بتن ها از نظر این زمان ترک خوردگی میتوانند با یکدیگر مقایسه شوند اما ضابطه خاصی برای مناسب بودن بتن ها در منابع ارائه نشده است. در مورد بتن سخت شده صرفا آزمایش ASTM C490 [۶۳] به چشم می خورد که می تواند جمع شدگی بتن سخت شده را به نمایش گذارد. همچنین برخی آزمایش ها مانند پتروگرافی بتن ASTM C856 [۶۴] به بررسی مشکلات موجود در بتن و دوام آن می پردازد که جنبه کمی خاصی ندارد. همچنین امروزه آزمایش هایی با استفاده از

میکروسکوپ الکترونی در ارتباط با بررسی کیفی انجام می شود که عمدتاً براساس روش روبشی (SEM) استوار است. بهتازگی دستورالعمل راهنمای استاندارد برای آزمایش SEM بتن سخت شده در ASTM C1723 [۶۵] ارائه شده است.

آزمایش نیم پیل (پتانسیل خوردگی)

این آزمایش به طور مستقیم کیفیت بتن را از نظر دوامبه نمایش نمی گذارد اما در آزمایشگاه می توان با ساخت نمونه هایی با بتن های متفاوت و نگهداری بتن در شرایط مشابه، پتانسیل خوردگی میلگردها را بدست آورد که بهنوعی می تواند نمایانگر کیفیت بتن مصرفی هر کدام از نمونه ها بصورت مقایسه ای باشد.

دستور استاندارد ASTM C876 [۶۶] برای تعیین پتانسیل خوردگی میلگردهای قطعات بتنی سازه ها در کارگاه (در محل) ارائه شده است مشروط بر اینکه میلگرد بتن دارای پوشش خاصی مانند اپوکسی یا روی نباشد. با این حال می توان در آزمایشگاه نیز این آزمایش را با تغییراتی انجام داد. برای این منظور از یک ولت متر و یک الکترواستفاده می شود و قطب مثبت مدار به الکتروود و قطب منفی به میلگرد متصل می شود وولتاژ (اختلاف پتانسیل) بین میلگرد و سطح بتن تعیین می گردد. معمولاً محل تماس الکتروود با سطح بتن به خوبی با مواد مرطوب کننده، مرطوب می شود تا اتصال برقرار گردد. در این آزمایش طبق دستور استاندارد از الکتروود مس- سولفات مس استفاده میشود، اما می توان از الکتروود کالومل اشباع یا الکتروود نقره- کلرید نقره نیز استفاده کرد و نتایج بدست آمده را طبق استاندارد ASTM G3 [۶۷] تبدیل نمود.

در کارگاه با ایجاد شبکه ای به فواصل ۰/۵ تا یک متر بر روی سطح بتن، اندازه گیری ها انجام می شود و خطوط تراز هم پتانسیل رسم می گردد. نتیجه آزمایش نمایانگر وجود فعالیت های خوردگی میلگردها در هنگام آزمایش می باشد. در ASTM C876 زمانی که از الکتروود مس- سولفات مس استفاده می شود، احتمال وجود فعالیت خوردگی بصورت زیر مطرح شده است [۶۶].

جدول ۱۴- احتمال فعالیت خوردگی میلگردها بر اساس الکتروود مس- سولفات مس در آزمایش نیم پیل

احتمال فعالیت خوردگی میلگرد	کمتر از ۱۰ درصد	۵۰ درصد	بیش از ۹۰ درصد
اختلاف پتانسیل خوردگی (میلی ولت)	بزرگتر از -۲۰۰	-۳۵۰ تا -۲۰۰	کمتر از -۳۵۰

باید توجه داشت که با انجام این آزمایش نمی توان مستقیماً شدت خوردگی میلگرد و یا میزان خوردگی آن را تعیین نمود. بر اساس نتیجه آزمایش پتانسیل خوردگی، نمی توان در کارگاه در مورد کیفیت بتن ها از نظر نفوذپذیری در برابر یون کلرید یا CO₂ به راحتی اظهار نظر نمود. در آزمایشگاه معمولاً میلگردی را درون بتن به نحوی قرار می دهند که ضخامت بتن روی آن دقیقاً مشخص یکنسان باشد. در صورتی که میلگردها کاملاً مدفون در بتن باشد، باید سیمی را به آن وصل کرد و به بیرون انتقال داد. در صورتی که سر میلگرد بیرون از بتن باشد باید قسمت بیرونی و بخشی از قسمت درونی آن را (به میزان بیش از کاور) با اپوکسی پوشاند. معمولاً نمونه های استوانه ای تهیه شده را تا دو سوم ارتفاع درون آب نمک قرار داده در زمان های مختلف اختلاف پتانسیل قرائت می شود. هنوز دستور استاندارد غلظت آب نمک، نحوه تهیه نمونه، سن قرارگیری در آب نمک و غیره را مشخص نکرده است و پژوهشگران روش مشابهی را برای بتن های مختلف بکار می برند. در صورتی که میلگرد نمونه بتنی کاملاً مدفون باشد می توان آن را کاملاً درون آب نمک غرقاب کرد [۱۵ و ۵۹].

آزمایش شدت خوردگی میلگردها

شدت خوردگی میلگردها معمولاً به صورت $\mu A/cm^2$ و یا $\mu m/Year$ بیان می گردد. آزمایش شدت خوردگی میلگردها در واقع آهنگ خوردگی میلگردها را در زمان آزمایش و در شرایط موجود حاکم بر آن نشان می دهد و در اصل برحسب میکرو آمپر بر هر سانتی متر مربع از سطح میلگرد بیان می شود. هر $\mu A/cm^2$ در واقع معادل ۱/۶ میکرومتر خوردگی در سطح میلگرد در هر سال می باشد که بر اساس تجربیات موجود این تبدیل انجام می گردد. امروزه این آزمایش در آزمایشگاه و همچنین در کارگاه انجام می شود که در آزمایشگاه از دستور استاندارد ASTM G5 [۶۸] استفاده می گردد. اما دستورالعمل استاندارد برای کارگاه وجود ندارد. اندازه گیری شدت خوردگی میلگردها به روش پتانسیو استاتیکی یا پتانسیو دینامیک انجام می شود که روش پتانسیو استاتیک کاربرد

بیشتری در مورد خوردگی میلگردهای بتن دارد. در این آزمایش علاوه بر اندازه گیری اختلاف پتانسیل (نیم پیل)، مقاومت الکتریکی بتن موجود در نزدیکی میلگرد اندازه گیری می شود و براساس این اندازه گیری ها، شدت خوردگی میلگردها بدست می آید. نتیجه این آزمایش اطلاعات خاصی را در مورد کیفیت بتن بدست نمی دهد هرچند نفوذپذیری بتن و کم بودن مقاومت الکتریکی آن می تواند به افزایش شدت خوردگی منجر شود. در پژوهش های آزمایشگاهی، نمونه های شبیه به نمونه های نیم پیل تهیه و در شرایط یکسان در آب نمک نگهداری می گردد و در صورتی که میلگردها یکسان باشد، زیاد بودن شدت خوردگی نشانه بی کیفیتی بتن اطراف آن خواهد بود. دستگاه مورد استفاده و رایج در تعیین شدت خوردگی میلگردها در کارگاه موسوم به گالوپالس است. شدت خوردگی میلگردها با روش گالوپالس دارای طبقه بندی زیر می باشد [۶۹].

جدول ۱۵- طبقه بندی شدت خوردگی میلگرد بر اساس روش گالوپالس

میزان شدت خوردگی	ناچیز	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
شدت خوردگی میلگرد ($\mu\text{m}/\text{Year}$)	کمتر از ۶	۶ تا ۲۳	۲۳ تا ۵۸	۵۸ تا ۱۷۴	بیش از ۱۷۴
شدت جریان خوردگی میلگرد در سطح ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	کمتر از ۰/۵	۰/۵ تا ۲	۲ تا ۵	۵ تا ۱۵	بیش از ۱۵

یکی از آزمایش های آزمایشگاهی شدت خوردگی که به آزمایش ماکروپیل شدت خوردگی موسوم است، آزمایشی است که با اقتباس از دستور استاندارد ASTM G109 [۷۰] انجام می گردد. این آزمایش در اصل برای تعیین اثر مواد افزودنی بر خوردگی میلگردها تدوین شده است اما با تغییر در نوع بتنی که استفاده می شود می توان مقایسه ای بین بتن ها داشت بدون اینکه افزودنی خاصی در آن بکار رود.

در این آزمایش یک مکعب مستطیل ساخته می شود که در بالا یک میلگرد و در پایین دو میلگرد قرار می گیرد. در بالای نمونه یک حوضچه نصبی شود که در آن محلول آب نمک با غلظت خاصی می ریزند و بین میلگردهای پایین و بالای مقاومت نصب می گردد. محلول آب نمک در دوره های خاصی تخلیه و پر می شود و با اندازه گیری اختلاف ولتاژ، مقدار شدت جریان الکتریکی بدست می آید و در یک بازه زمانی، کل جریان عبوری بدست می آید که هر چه بیشتر باشد شدت خوردگی میلگردها بیشتر است. البته مقدار شدت جریان بر واحد سطح میلگرد نیز تعیین می شود [۵۹ و ۷۱].

پیشنهاد بکارگیری دوام مشخصه و دوام هدف طرح مخلوط بتن

همانگونه که برای مشخص کردن سطح مقاومتی بتن بکار گرفته شده در یک پروژه از واژه مقاومت مشخصه و یا حداقل مقاومت استفاده میشود، قاعدتا هنگامی که سطح دوام مشخصی مدنظر طراح پروژه باشد لازم است از واژه دوام مشخصه و یا ذکر نوع دوام و کیفیت بتن استفاده گردد، مثلا جذب آب مشخصه یا مقاومت ویژه الکتریکی مشخصه بکار رود. بدیهی است که دوام مشخصه نیز مانند مقاومت مشخصه یک مقدار احتمالاتی است که به سطح کیفی بتن از نظر دوام گفته می شود که ۹۵ درصد بتن ها از آن بهتر می باشند. همانگونه که در طرح مخلوط بتن با استفاده از مقاومت مشخصه مقدار مقاومت میانگین طرح مخلوط (مقاومت هدف طرح) محاسبه می شود و در این محاسبه، انحراف معیار مقاومتی و یا حاشیه امنیت مقاومتی با توجه به سطح کیفیت تولید بتن بکار می رود، در اینجا نیز باید از واژه دوام هدف طرح مخلوط بهره گیریشود و لازم است در آینده در آیین نامه های بتن و روش های طرح اختلاط بتن، جایگاه ویژه ای برای این تعاریف در نظر گرفته شود و بر این اساس پس از ساخت مخلوط های آزمون، دستیابی به این اهداف بررسی گردد و در صورت عدم توفیق در دستیابی به این اهداف، تغییر و اصلاح متناسبی در طرح اعمال شود. توصیه می شود کاهش ۵ درصدی در دوام هدف طرح مخلوط بتواند پذیرفته شود و نیاز به تغییر طرح مخلوط نداشته باشیم.

پیشنهاد بکارگیری مفاهیم ارزیابی و پذیرش بتن بر اساس دوام

در همه آیین نامه های موجود دنیا پذیرش بتن از نظر مقاومتی و انطباق بر رده مورد نظر یا مقاومت مشخصه دارای ضوابط آماری خاصی می باشد. مثلا گفته می شود اولاً باید تواتر یا فرکانس خاصی در نمونه گیری برقرار باشد و ثانياً میانگین نتایج هر سه نمونه

متوالی کمتر از مقاومت مشخصه و یا حتی کمتر از مقاومت مشخصه به اضافه مقدار خاصی نباشد و هر کدام از نتایج نمونه ها نیز کمتر از مقاومت مشخصه منهای مقدار خاصی باشد تا پذیرش بتن یک پروژه انجام شود.

مسئله دوام، هم سطح و هم تراز با مقاومتنگاه شود باید چنین ضوابطی نیز برای پذیرش بتن از نظر انطباق با دوام مشخصه تدوین گردد. همچنین واضح است که ضوابطی از نظر تواتر و فرکانس نمونه برداری باید موجود باشد. بنابراین در پروژه های مهم لازم است آزمایشگاه محلی به وسایل و تجهیزات خاص برای انجام آزمایش های دوام مورد نظر مجهز گردد و همانند گزارش مقاومت نمونه های بتن، پارامترهای دوام مورد نظر را گزارش کند تا کیفیت بتن ها رصد گردد و پذیرش یا عدم پذیرش در دستور کار قرار گیرد. در حال حاضر پیشنهاد می شود که شکل موجود در بررسی انطباق با مقاومت مشخصه، با تغییر برخی موارد جزئی، برای بررسی انطباق با دوام مشخصه بکار گرفته شود زیرا مفاهیم آماری آنها یکسان به نظر می رسد.

پیشنهاد تدوین ضوابط و روش بررسی بتن کم دوام

همانگونه که در همه آیین نامه های معتبر دنیا بخشیتحت عنوان بررسی بتن کم مقاومت وجود دارد و می توان بتن کم مقاومت را از نظر تامین مقاومت سازه یا ظرفیت باربری سازه پذیرفت، لازم است ضوابطی را تدوین نمود که براساس آن بتوان بتن های کم دوام را مورد بررسی قرار داد و به قبول یا رد آنها اقدام کرد. به هر حال ممکن است در این رابطه شباهت مسئله دوام با مقاومت چندان زیاد نباشد، اما روال کار می تواند با الهام از بررسی بتن کم مقاومت تدوین گردد. بررسیهای تحلیلی، مغزه گیری و انجام آزمایش دوام و بکارگیری یک ضابطه پذیرش از جمله این موارد است اما ممکن است از مواردی همچون بارگذاری نتوان الگوبرداری نمود. با اینحال اقدامات مقتضی دیگر مانند بکارگیری مواد پوششی بر سطح بتن و یا اتخاذ تدابیر برای با دوام تر کردن بتن یا قطعه و سازه بتنی می تواند شبیه به اقدامات مقتضی برای پذیرش بتن کم مقاومت سازه ای باشد.

واقعیت های موجود در ایران و جهان درباره دوام بتن

با توجه به آنچه گذشت روشن شد که مسئله دوام امروزه تدریج از اهمیت زیادی برخوردار گشته است، اما هنوز مهندسين و طراحان مختلف در ایران و جهان در ارتباط با مسئله دوام پختگی لازم را کسب ننموده اند. همه پی در پیاز دوام دم می زند اما معمولاً در مشخصات فنی پروژه ها اشاره چندانى به دوام وارزبایى آن و ارائه معیارهایی برای کنترل نمی شود بجز آنکه محدودیت های خاصی را در ارتباط با نسبت آب به سیمان، حداقل و حداکثر عیار سیمان یا نوع سیمان مصرفی مطرح می کنند، بدون اینکه مشخص باشد با رعایت این موارد بتن در چه سطحی از کیفیت مرتباً دوام قرار می گیرد و آیا نیازهای پروژه مرتفع خواهد شد یا خیر؟

به نظر می رسد هنوز آمادگی لازم برای انجام آزمایشهای کنترلی دوام در ایران و دنیا بوجود نیامده است، هرچند در بخشنامه ای از سازمان مدیریت و برنامه ریزی برای حاشیه خلیج فارس چنین امری الزامی اعلام شده است. اما واقعیت آن است که این آزمایش ها را صرفاً در هنگام تهیه طرح مخلوط بتن می توان به انجام رسانید و فرصت کافی و امکانات وافی برای انجام آنها بصورت یک آزمایش کنترلیمستمر، همچون تعیین مقاومت فشاری بتن، بر روی بتن های تولیدی در کارگاه وجود ندارد.

همچنین امروزه ضوابط خاصی برای پذیرش بتن از نقطه نظر دوام در ایران و جهان بوجود نیامده است و در استاندارد اروپا و آیین نامه ACI نیز هنوز چنین مواردی به چشم نمی خورد.

راهکارهایی برای خروج از بن بست

برای خروج از بن بست موجود علاوه بر آنچه در بخشنامه سازمان مدیریت برای حاشیه خلیج فارس دیده می شود لازم است تواتر نمونه برداری و ضوابط پذیرش منطبق با واقعیت ها و شرایط موجود عنوان گردد. ضمناً موضوع دوام فقط منحصر به حاشیه خلیج فارس و خوردگی میلگردها و نفوذ یون کلرید نیست، و وجوه مختلف دیگری نیز مطرح است، که در آیین نامه های مختلف باید این موارد پیش بینی شود. همچنین نمی توان انتظار داشت چنین مواردی بزودی نهادینه شود، مگر اینکه این آزمایشها به شدت ساده و سریع باشند که مسلماً دقت آنها در تعیین کیفیت بتن نیز تحت تاثیر این سرعت و سادگی قرار می گیرد.

به اعتقاد نویسنده، اگر بتوان مشکلات آزمایش تعیینمقاومت ویژه الکتریکی را برطرف و آن را استاندارد نمود، می توان از آن به عنوان یک آزمایش کنترلی سریع و ساده و غیر مخرب بهره گرفت. همچنین آزمایش جذب آب کوتاه مدت صرفنظر از مشکل خشک کردن و مغزه گیری، آزمایش سریع و ساده ای محسوب می شود.

آموزش جدی موضوع دوام در دروس تکنولوژی بتن و اجرا در دوره های آکادمیک و حین کار، راهکاری پایه ای برای دریدن این پوسته مزاحم محسوب میشود.

پیشنهادی برای نگارش مشخصات دوامی بتن

طراح پروژه باید در مشخصات فنی خصوصی پروژه، مشخصات بتن از نظر دوام را به صراحت قید نماید. همانگونه که مقاومت مشخصه یا رده بتن تصریح می گردد لازم است در مورد اعلام دوام مشخصه حتی با ذکر سن بتن و دستورالعمل آزمایش مورد نظر اقدام گردد. به چنین موردی در ISO 22965-1 [۷۲] و ISIRI 2284-1 [۷۳] به صراحت اشاره شده است.

بدیهی است با توجه به شرایط حاکم بر پروژه و محیط مورد نظر باید پارامتر یا پارامترهای خاصی مطرح شود و بهتر است برای هر نوع خواست دوامی، صرفاً یک پارامتر مناسب و در راستای تامین دوام اعلام گردد. ذکر چند پارامتر برای یک هدف ممکن است باعث سردرگمی شود و به عبارتی احتمال دارد که از نقطه نظر اعمال یک پارامتر، بتن مناسب باشد اما دستیابی به پارامتر دیگر مقدور نباشد و گرفتاری در پی داشته باشد. برای مثال اگر برای کاهش و کنترل نفوذ یون کلرید در بتن، آزمایش RCPT مقاومت الکتریکی، جذب آب نیم ساعته، جذب آب نهایی، عمق نفوذ آب و غیره منظور شود جالب خواهد بود و بهتر است صرفاً RCPT یا مقاومت الکتریکی مطرح گردد. دلیل این امر را می توان نزدیکی ساز و کار آزمایش ها با نفوذ یون کلرید در بتن دانست. هر چند ممکن است برای کاهش و کنترل جذب آب یا نفوذ آب در بتن، آزمایش های جذب آب یا عمق نفوذ آب یا جذب آبمویینه یا جذب آب سطحی اولیه توصیه شود. به هر حال در همه موارد لازم است آزمایشی کار رود که با ساز و کار حاکم بر پروژه و خرابی مورد نظر سازگاری بهتری داشته باشد.

لازم به ذکر است هنوز رابطه مشخصی بین پارامترهای دوام مطرح نشده است و شاید بین بسیاری از آنها نتوان رابطه ای را در آینده نیز برقرار نمود. بنابراین نباید تصور شود که با در نظر گرفتن یک دوام مشخصه، می توان همه انواع دوام را تحت پوشش قرار داد و یا برای یک نوع دوام نباید تصور شود ارائه چند مورد دوام مشخصه مطلوب تر است.

اقدامات مهم انجام شده در ایران در زمینه دوام بتن

از اواخر دهه ۶۰ هجری اقدامات پراکنده ای در مورد پژوهش مرتبط با دوام در ایران انجام شده است. اساتید دانشگاهی در برخی دانشگاه هایکشور و در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن کارهای درخور توجهی را ارائه کردند. استادگرانقدر آقای دکتر رضانیانپور در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و دانشگاه امیرکبیراز اواخر دهه ۶۰ فعالیت هایی را در ارتباط با دوام از جمله کربناسیون، نفوذ یونکلرید و خوردگی میلگردها و غیره داشته اند که بسیار مهم و ذیقیمت بوده است و درسال گذشته به پاس این فعالیت ها، موسسه ACI از ایشان بصورت رسمی در یکی از کنفرانس ها در اسپانیا قدردانینمود.

از جمله افرادی که بحث دوام بتن بویژه در موضوع نفوذ مواد زیان آور و کلریدها و خوردگی میلگردها در ایران مدیون ایشان می باشد، استادوالامقام آقای دکتر قدوسی می باشد که از اواسط دهه هفتاد تحقیقات خود را حول محور دوام با تاکید بر آزمایش های الکتریکی همچون نیم پیل، شدت خوردگی و مقاومت الکتریکی در دانشگاه علم و صنعت و مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن شروع کرد. ایشان برای اولین بار در ابتدای دهه ۸۰ مبتکر برگزاری مسابقات مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن در دانشگاه علم و صنعت بودند که بعدها توسط انجمن بتن ایران در راستای ترویج مفاهیم دوام، این مسابقات با شکل اصلاح یافته هر سال برگزار گردید.

در ارتباط با یخ زدن و آب شدن، فعالیت هایی توسط دکتر نیلی در دانشگاه بوعلی سینا و پژوهش هایی در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهرانو مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است. همچنین آقای دکتر باقری در دانشگاه خواجه نصیرالدینطوسی و آقای دکتر فامیلی در دانشگاه علم و صنعت در مورد دوام تحقیقاتی را به انجام رسانیده اند. همواره در برخی دانشگاه های دیگر نیز جسته و گریخته پژوهش هایپراکنده و غیر منسجمی صورت می گیرد. در سالهای ۸۳ و ۸۴ برای اولین بار سعی شد حرکت هایجدی

و خاصی بویژه در مورد دوام بتن و سازه ها در حاشیه خلیج فارس به انجام رسد. سازمان مدیریت و برنامه ریزی با همکاری مرحوم دکتر قالیبافیان و جناب آقای دکتر رمضانپور اولین نوشته الزام آور را تحت عنوان بخشنامه معیارهای پذیرش بتن برمبنای پایایی به شماره ۱۰۱-۳۴۲۲۹ مورخ ۱۳۸۳/۳/۴ برای پروژه های عمرانی دولتی احداثی در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان [۷۴] منتشر نمود که اقدام مهمی در این رابطه به شمار می رود. ضمن تماس با جناب آقای دکتر رمضانپور به کاستی ها و مشکلات این بخشنامه اشاره گردید و بحث هایی در مورد کتاب (نشریه) ارزشمند شماره ۳۹۶ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن با عنوان توصیه هایی برای پایایی بتن در سواحل جنوبی کشور [۷۵] که با هدایت و پشتکار ایشان و همکارانشان در سال ۱۳۸۳ منتشر شده بود مطرح شد و مقرر گشت کمیته ای مرکب از متخصصین در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تشکیل گردد و توصیه های نشریه مزبور بصورت تفصیلی و اصلاح شده منتشر شود که بعداً نام آیین نامه پیشنهادی برای آن انتخاب گشت. با برگزاری جلسات مکرر و بحث در مورد پیش نویس ها، بالاخره برای اولین بار چنین متنی تهیه و در سال ۱۳۸۴ به شماره ض ۴۲۸ تحت عنوان آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان [۳۴] منتشر گردید. در نگارش این متن سعی گردید بخشنامه سازمان مدیریت نقض نشود و از مطالبی که موسسه CIRIA برای بتن در مناطق عربی تدوین کرده بود استفاده گردد کما اینکه در بخشنامه مزبور نیز از یکی از جداول این نشریه اقتباس شده بود. لازم به ذکر است از حدود سال ۱۳۸۰ انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران به سرپرستی و هدایت آقای دکتر قالیبافیان و مدیریت جدید ویر توان آقای دکتر شکرچی زاده، یک مجموعه از کارهای تحقیقاتی را با کمک تعدادی از دانشجویان دوره های کارشناسی ارشد عمران تحت عناوین مختلف پایان نامه های دانشجویی آغاز کرد که هدف آن تدوین و ارائه نرم افزاری بومی بر اساس نرم افزار Life365 موسسه ACI برای حاشیه خلیج فارس بود و سازمان مدیریت و برنامه ریزی نیز باتوجه به قرارداد منعقد از آن پشتیبانی می نمود. این کار تحقیقاتی که نگارنده همافکار همکاری در انجام آن را داشته است، سر منشا تحولات جدی در این زمینه به حساب می آید زیرا از هدفمندی خاصی برخوردار بود و در انجام این تحقیقات از همه پژوهشهای قبلی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که با هدایت عزیزانی همچون دکتر رمضانپور، دکتر قدوسی، دکتر باقری و دکتر پرهیزگار انجام شده بود، بهره گیری شد. صرف نظر از میزان موفقیتی که در انستیتو مصالح ساختمانی حاصل شد اصل این اقدام بسیار مهم بود هرچند انستیتو به موفقیت های زیادی نیز دست یافت اما کنار کشیدن سازمان مدیریت و برنامه ریزی از حدود سال ۱۳۸۴ لطمه شدیدی به این اهداف وارد نمود و آن را ناقص و ابتر باقی گذارد. با این حال انستیتو با حمیت و غیرت خاص سعی نمود که آن را به هر ترتیب دنبال نماید. به تازگی انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران مدل های احتمالاتی خوردگی را مورد تحقیق قرار داده است و سعی می کند همانگونه که در Life 365 تحولاتی رخ می دهد، نرم افزار DuraPGulf را به روز کند و اطلاعات جدیدتری را به آن بیفزاید. در سال ۱۳۸۶ با توجه به انجام آزمایش های مختلف در آزمایشگاه های تحقیقاتی و خدماتی در ارتباط با دوام بتن در حاشیه خلیج فارس، پیشنهادی در مورد مطالعه کاربرد نتایج نفوذپذیری گاز اکسیژن در بتن در این منطقه و ارائه ضابطه و معیار خاص در این مورد توسط انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران مطرح شد. به دنبال پیشنهاد انستیتو به مرکز تحقیقات و تعریف این تحقیق، در جلسه ای با حضور بسیاری از اساتید، قرار شد یک مطالعه جامع در زمینه آزمایش های دوام مرتبط با منطقه خلیج فارس انجام شود که در مرحله اول آزمایش های مختلفی بر روی بتن های محدود و خاصی توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و برخیزانندگان ها انجام شود تا ارتباط این نتایج با یکدیگر بررسی گردد. این تحقیق برای اولین بار به عنوان یک مرحله از تحقیقات جامع و با کمک چند مرکز پژوهشی در سال ۱۳۸۷ کلید خورد که امید است در سال ۱۳۸۹ پرونده آن بسته شود.

دانشگاه تهران (انستیتو مصالح ساختمانی)، دانشگاه امیر کبیر (مرکز تحقیقات تکنولوژی بتن و دوام)، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشگاه بوعلی سینا و برخی اساتید و مشاورین مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن در این تحقیق همکاری نزدیکی با مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن داشتند که در نوع خود اولین پروژه مشترک تحقیقاتی در این زمینه می باشد [۷۶].

با انجام این تحقیق امید است بتوان در مورد انتخاب آزمایش های موثر و کارا در زمینه دوام بتن در محیط خلیج فارس و همچنین انتخاب معیارهای جدید یا تصحیح و بازنگری معیارهای قبلی اقدام نمود و تغییراتی را در آیین نامه پیشنهادی پایایی بتن در این مناطق بوجود آورد و این امر نیز در نوع خود برای اولین بار اتفاق می افتد که در تدوین یک آیین نامه از تحقیقات مفصل داخلی بهره گیری

شود، هرچند در تدوین آیین نامه پایایی اولیه و نشریه شماره ک ۳۹۶ (توصیه هاییدر مورد پایایی بتن در سواحل جنوبی کشور) از چنین تجربیاتی در سطح محدودتر استفاده شده بود. لازم به ذکر است به موازات این تحقیق، پروژه هایدیگری در زمینه خوردگی و دوام و تهیه مدل های دوام در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تعریف شده است که برخی از آنها کلید خورده است و برخی دیگر در آینده شروع خواهد شد که امید است سرانجام خوبی را در پی داشته باشد. همچنین در تامین دوام جداول بتنی و با تبیین مشکلات موجود در اوائل دهه ۸۰، همه دست اندرکاران اذعان داشتند که نیاز به تدوین مشخصات فنی برای پذیرش جداول بتنی بویژه از نقطه نظر دوام وجود دارد و باید به دنبال چنینموردی بود. به هرحال مسئولین شهرداری تهران یک سفارش شفاهی (بدون عقد قرارداد) در این زمینه را به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن دادند و در سال ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ جلساتی در مرکز برای تدوین دستورالعملی در مورد جداول بتنی پیش ساخته برگزار گردید که منجر به تدوین نشریه شماره ض ۵۱۷ تحت عنوان ضابطه ساخت جداول بتنی در سال ۱۳۸۸ [۷۷] شد. در این نشریه از استانداردهای EN 1340 [۷] و EN 206 [۷۸] استفاده شده، اما این نشریه در عمل لازم الاجرا نشده است. در سال ۱۳۸۷ بنا به سفارش سازمان مهندسی و عمران شهرتهران، راهنمای تولید و مشخصات فنی و ضوابط پذیرش جداول پیش ساخته بتنی توسطنگارنده و با همکاری دکتر رضایی نوشته شد، که در سال ۱۳۸۸ منتشر گردید. در ایننشریه که تحت شماره EDO 201 [۷۹] منتشر شده است از EN 206 [۷۸]، EN 1340 [۷] و نشریه منتشر نشده (تا آن تاریخ) ضابطه ساخت جداول بتنی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن [۷۷] استفاده شد و برخی تجربیات شخصی نیز در تدوین آن بکار رفته است. خوشبختانه در اوائل سال ۱۳۸۹ بکارگیری آن در شهرداری تهران الزامی شد، امید است با استفاده صحیح از آن مسئله دوام جداول بتنی حل شود. در سال ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ تدوین استاندارد ملی مشخصات جداولبتنی پیش ساخته انجام شد که قرار است در سال ۱۳۸۹ منتشر گردد و با انتشار آن گام مثبت دیگری در بالا بردن دوام این جداول برداشته خواهد شد. در این استاندارد نیز EN 1340 [۷] مورد استفاده قرار گرفت و مواردی به آن اضافه شد که در پیوست اطلاعاتی آن (غیر الزامی) آورده شده است.

تدوین استاندارد ملی شماره ۸۹۰۶ لوله های بتنی مسلح برای جمع آوری آب باران و فاضلاب [۴۹] بر اساس ASTM C76 [۴۸] در سال ۱۳۸۵ نیز گام دیگری در مشخص کردن ضوابط عملکردی بتن های این لوله ها محسوب می شود. امید است در آیین نامه بتن ایران، مقررات ملی ساختمان، مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی، مشخصات فنی عمومی راه، مشخصات فنی عمومی آبیاری و زهکشی، مشخصات فنی عمومی سد و سازه های آبی و غیره ضوابط عملکردی دوام بر اساس آزمایش های دوام وارد شود و باب جدیدی در این راه گشوده گردد.

جمع بندی، نتیجه گیری نهایی و پیشنهادها

در مجموع با توجه به موارد مطروحه در این نوشته میتوان نکات زیر را به عنوان جمع بندی و نتیجه گیری به همراه پیشنهادها ذکر کرد:

- امروزه نمی توان به ضوابط شکلی دوام مانند محدودیتنسبت آب به سیمان و غیره دلخوش کرد و لازم است ضوابط عملکردی مستقیم یا غیر مستقیمدر ارتباط با دوام را مطرح نمود.
- برای مشخص کردن دوام بتن ها آزمایش هایی را باید بر روی بتن انجام داد. این آزمایش ها گاه بطور مستقیم مرتبط با دوام است و گاه بصورتغیر مستقیم به دوام بتن مربوط می شود. مسلماً آزمایش های نوع اول همواره ارجح است.
- برای دوام بتن بسته به شرایط حاکم و ساز و کارخرابی، آزمایش های متفاوتی وجود دارد. آزمایشی را می توان در دستور کار قرار داد که به ساز و کار خرابی نزدیک تر باشد.
- پس از انجام آزمایش های مورد نظر، معیار یا ضابطهخاصی باید ارائه شود. این ضوابط و معیارها بر اساس پژوهش ها و تجربیات قبلی ارائه می شود. با انجام تحقیقات بیشتر و بررسی بتن ها در شرایط محیطی واقعی می توانانتظار داشت که این معیارها دستخوش تغییراتی شود.
- طرح ضوابط عملکردی بتن هنوز در دنیا و ایران رایج نشده است اما مدتی است ارائه این معیارها در دستور کار قرار گرفته است.

- آزمایش هایی که معمولاً بطور مستقیم کیفیت بتن را از نظر دوام نشان می دهد گاه طولانی مدت یا گران قیمت است و نمی توان از آنها به عنوان یک آزمایش کنترلی استفاده نمود.
- بکارگیری آزمایش هایی که بطور غیر مستقیم کیفیت بتن از نظر دوام را به نمایش می گذارد وقتی رایج می شود که در اسرع وقت و با هزینه کمو ترجیحاً بصورت غیر مخرب انجام شود.
- دوام مشخصه مانند مقاومت باید جایگاه خود را در مشخصات فنی پروژه ها پیدا کند. در طرح مخلوط بتن باید دوام هدف با توجه به دوام مشخصه و شرایط ساخت بتن در کارگاه مدنظر قرار گیرد.
- در آیین نامه ها و مشخصات فنی پروژه ها تواتر نمونه برداری، نحوه ارزیابی و ضوابط پذیرش بتن از نظر دوام همچون مقاومت فشاری باید روشنو تبیین گردد.
- در آیین نامه و مشخصات فنی پروژه ها، بخشی تحت عنوان بررسی بتن کم دوام مانند بتن کم مقاومت باید اضافه شود.
- برای برخی ساز و کارهای خرابی هنوز آزمایش استاندارد مستقیم یا غیر مستقیم تدوین نشده است که از جمله می توان حمله سولفات هاو تبلور نمک ها را ذکر کرد.
- اقدام هایی در بررسی دوام بتن ها در کشور انجام شده یا در حال انجام است. تدوین آیین نامه هایی مانند پایایی بتن در حاشیه خلیج فارسو ضوابط و مشخصات جداول بتنی پیش ساخته از جمله اقدامات مهم است که طلیعه داراقدامات دیگر خواهد بود.
- ضوابط و معیارهای دوام ممکن است در سال های آینده با توجه به تجربیات و مشاهدات رفتار بتن از نظر دوام دستخوش تغییراتی شود.
- تجربه نشان می دهد که کارهای گروهی و غیر پراکنده در کشور می تواند دستاوردهای مهم و اثرگذاری را به دنبال داشته باشد.
- راه درازی در پیش است تا به مسئله دوام در عمل مانند مقاومت نگریسته شود و به حرف اکتفا نگردد.

منابع و مراجع

- 1- ACI Committee 201 (2001), "Guide to Durable Concrete(ACI 201.1R)", American Concrete Institute, Farmington, Hills, Mich., 41pp.
- ۲- مهتاپ، کومار، مترجم رضانیانپور، علی اکبر و همکاران (۱۳۸۳)، "ریز ساختار، خواصو اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتیامیرکبیر، تهران، ایران.
- ۳- نویل، آدام، مترجم فامیلی، هرمز (۱۳۷۸)، "خواصبتن"، بازنگری چهارم، ابوریحان بیرونی، تهران، ایران.
- 4- ASTM (2003), "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing", ASTM C 666, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 5- ASTM (2005), "Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units", ASTM C 1262, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-05.
- 6- ASTM (2003), "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals", ASTM C 672, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 7- EN 1340 (2003), "Concrete kerb units - Requirements and test methods"
- 8- ASTM (2005), "Standard Specification for Segmental Retaining Wall Units", ASTM C 1372, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-05.
- 9- ASTM (2002), "Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate", ASTM C 452, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-01.
- 10- ASTM (2004), "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", ASTM C 1012, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-01.

- 11- Xu, A., Shayan, A., Baburamani, P., (1998), "Test Methods for Sulfate Resistance of Concrete and Mechanism of Sulfate Attack: State-of-the-Art Review", ARRB Transport Research Ltd., Review Report 5
- 12- Ferraris, C. F., Stutzman, P. E., Snyder, K.A., (2006), "Sulfate Resistance of Concrete: A New Approach, R&D Serial No.2486", PCA, Skokie, Illinois, USA
- 13- RILEM Committee CPC18 (1988), "Measurement for Hardened Concrete Carbonated Depth", TC14-CPC.
- 14- EN 14630 (2006), "Products and systems for the protection and repair of concrete"
- ۱۵- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۷۸)، "نشریه شماره ک-۲۸۳: فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس- جلد اول: آسایشناسی بتن و ارزیابی آن"، چاپ اول، تهران، ایران.
- 16- ASTM (2003), "Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction", ASTM C 1293, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 17- ACI Committee 221 (1998), "State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity (ACI 221.1R)", American Concrete Institute, Farmington, Hills, Mich., 31 pp.
- 18- ASTM (2003), "Standard Specification for Concrete Aggregates, Appendix", ASTM C 33, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- ۱۹- استاندارد ملی ایران ۳۰۲ (۱۳۸۱)، "سنگدانه های بتن - ویژگیها"، تجدیدنظر دوم، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
- 20- ASTM (2003), "Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction", ASTM C 1105, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 21- ASTM (2000), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method", ASTM C 944, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 22- ASTM (2000), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting", ASTM C 418, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 23- ASTM (2000), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces", ASTM C 779, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 24- ASTM (2000), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)", ASTM C 1138, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 25- US Army (1992), "Standard Test Method for Water Permeability of Concrete", CRD-C 48
- 26- USBR test designation 4913(1992), "Procedure for determining water permeability of concrete", United States Bureau of Reclamation
- 27- Gomez, A.M., Costa, J.O., Albertini, H., Aguiar, J.E., (2003) "Permeability of Concrete: A Study Intended for the in situ Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques", NonDestructive Testing in Civil Engineering, International Symposium (NDT CE 2003)
- 28- Kollek, J.J. (1989), "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the CemBureau method- arecommendation", Materials and Structures, 22:225-230.
- 29- RILEM TC 116-PCD, "Recommendations of TC 116-PCD: Tests for gas permeability of concrete; A. Preconditioning of concrete test specimens for the measurement of gas permeability and capillary absorption of water; B. Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM - CEMBUREAU method", Material and Structures, 32:174-179.
- 30- Torrent, R. (1999), "The Gas-Permeability of High-Performance Concretes: Site and Laboratory Tests", ACI SP-186, paper 17:291-308

- 31- ASTM (2003), "Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion", ASTM C 1556, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol.04-02.
- 32- NT BUILD 443 (1995), "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration", NORDTEST Method
- 33- Concrete Society (2008), "Technical Report No.31-Permeability Testing of Site Concrete", CCIP, UK.
- ۳۴- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴)، "نشریه شماره ض-۴۲۸: آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)"، چاپ اول، تهران، ایران.
- 35- AASHTO T259 (2002), "Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC
- 36- NT BUILD 492 (1999), "Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from non Steady State Migration Experiments", NORDTEST Method
- 37- AASHTO T277 (2005), "Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC
- 38- ASTM (2003), "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM C 1202, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 39- ACI Committee 222 (2001), "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R)", American Concrete Institute, Farmington, Hills, Mich., 41 pp.
- 40- DIN 1048-5 (1991), "Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould)", Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany
- 41- EN 12390-8(2000), "Testing Hardened Concrete - Part 8: Depth of Penetration of Water Under Pressure", European Committee for Standardization.
- ۴۲- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۷)، "نشریه شماره ض-۵۰۴: توصیه هایی برای تعمیر سازه های بتنی در سواحل جنوبی ایران"، چاپ اول، تهران، ایران.
- 43- BS 1881, Part 122 (1983), "Testing concrete – Part 122: Method for Determination of Water Absorption", British Standard, London, England
- 44- BS 7263, Part 1 (2001), "Precast concrete flags, kerbs, channels, edgings and quadrants. Precast, unreinforced concrete paving flags and complementary fittings. Requirements and test methods", British Standard, London, England
- 45- Walker, M., (2002), "Guide to the Construction of Reinforced Concrete in the Arabian Peninsula (C577)", CIRIA and Concrete Society, UK
- 46- ASTM (2000), "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", ASTM C 642, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.
- 47- ASTM (2003), "Standard Test Methods for Concrete Pipe, Manhole Sections, or Tile", ASTM C 497, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-05.
- 48- ASTM (2003), "Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe", ASTM C 76, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-05.
- ۴۹- استاندارد ملی ایران ۸۹۰۶ (۱۳۸۵)، "لوله های بتنی مسلح، برای جمع آوری آب باران و فاضلاب- ویژگیها"، چاپ اول، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

۵۰- استاندارد ملی ایران ۱-۷۰ (۱۳۸۷)، "بلوک سیمانی توخالی- قسمت اول: ویژگی‌ها"، تجدیدنظر دوم، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

۵۱- استاندارد ملی ایران ۷۵۵ (۱۳۸۳)، "موزایک- ویژگی‌ها و روش‌های آزمون"، چاپاول، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

۵۲- استاندارد ملی ایران ۷۷۸۲ (۱۳۸۳)، "بلوک‌های سیمانی سبک غیر باربر- ویژگی‌ها"، چاپ اول، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

53- BS 1881, Part 208 (1996), "Testing concrete – Part 122: Recommendations for the Determination of the Initial Surface Absorption of Concrete", British Standard, London, England

54- RILEM Committee CPC11.2 (1982), "Absorption of water of concrete by capillarity".

55- ASTM (2004), "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes", ASTM C1585, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

56- Branco, F.A., de Brito, J., (2003), "Handbook of Concrete Bridge Management", ASCE, USA.

۵۷- شکرچی زاده، محمد، جوادیان، علیرضا، حاجیبابایی، امیر (۱۳۸۵)، "پارامترهای مهم در مقاومت الکتریکی بتن و روش‌های اندازه گیری مقاومت"، مجله انجمن بتن ایران، شماره ۲۳، صفحه ۲۰ تا ۲۶

58- ASTM (2006), "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method", ASTM G57, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 03-02.

۵۹- تدین، محسن (۱۳۸۱)، "بررسی وارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پرمقاومت با مصالح موجود در ایران"، رساله دکتری در رشته مهندسی عمران-سازه، دانشگاه علمو صنعت ایران، تهران، ایران.

60- ASTM (2001), "Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures", ASTM C827, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

61- ASTM (2006), "Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)", ASTM C1579, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

62- ASTM (2004), "Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage", ASTM C1581, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

63- ASTM (2000), "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete", ASTM C490, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

64- ASTM (2004), "Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete", ASTM C856, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

65- ASTM (2010), "Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy", ASTM C1723, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 04-02.

66- ASTM (2009), "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", ASTM C876, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 03-02.

67- ASTM (1989), "Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing", ASTM G3, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 03-02.

68- ASTM (1994), "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements", ASTM G5, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 03-02.

69- Germann Instruments (2009), "GulvaPulse Instruction and Maintenance Manual", Denmark.

70- ASTM (2007), "Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments", ASTM G109, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, vol. 03-02.

۷۱- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۳)، "نشریه شماره ک-۳۷۰: فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس - جلد دوم: روشها و توصیه ها برای افزایش عمر مفید سازه های بتنی"، چاپ اول، تهران، ایران.

72- ISO (2007), "Concrete - Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier", ISO 22965-1, Geneva, Switzerland.

۷۳- استاندارد ملی ایران ۱۲۲۸۴-۱ (۱۳۸۸)، "بتن- قسمت ۱- راهنمای نگارش مشخصات فنی"، چاپ اول، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

۷۴- امور فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۳)، "معیارهای پذیرش بتن بر مبنای پایایی"، بخشنامه شماره ۳۴۲۲۹-۱۰۱، ایران

۷۵- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۳)، "نشریه شماره ک-۳۹۶: توصیه هایی برای پایایی بتن در سواحل جنوبی کشور"، چاپ اول، تهران، ایران.

۷۶- تدین، محمدحسین (۱۳۸۸)، "بررسی ضریب نفوذپذیری گاز در بتن و مقایسه آن با سایر پارامترهای دوام برای ارزیابی کیفی بتن سازه های دریایی"، پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-سازه های دریایی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۷۷- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۸)، "نشریه شماره ض-۵۱۷: ضاب ارزیابی دوام بتن (آزمایش ها و معیارها)