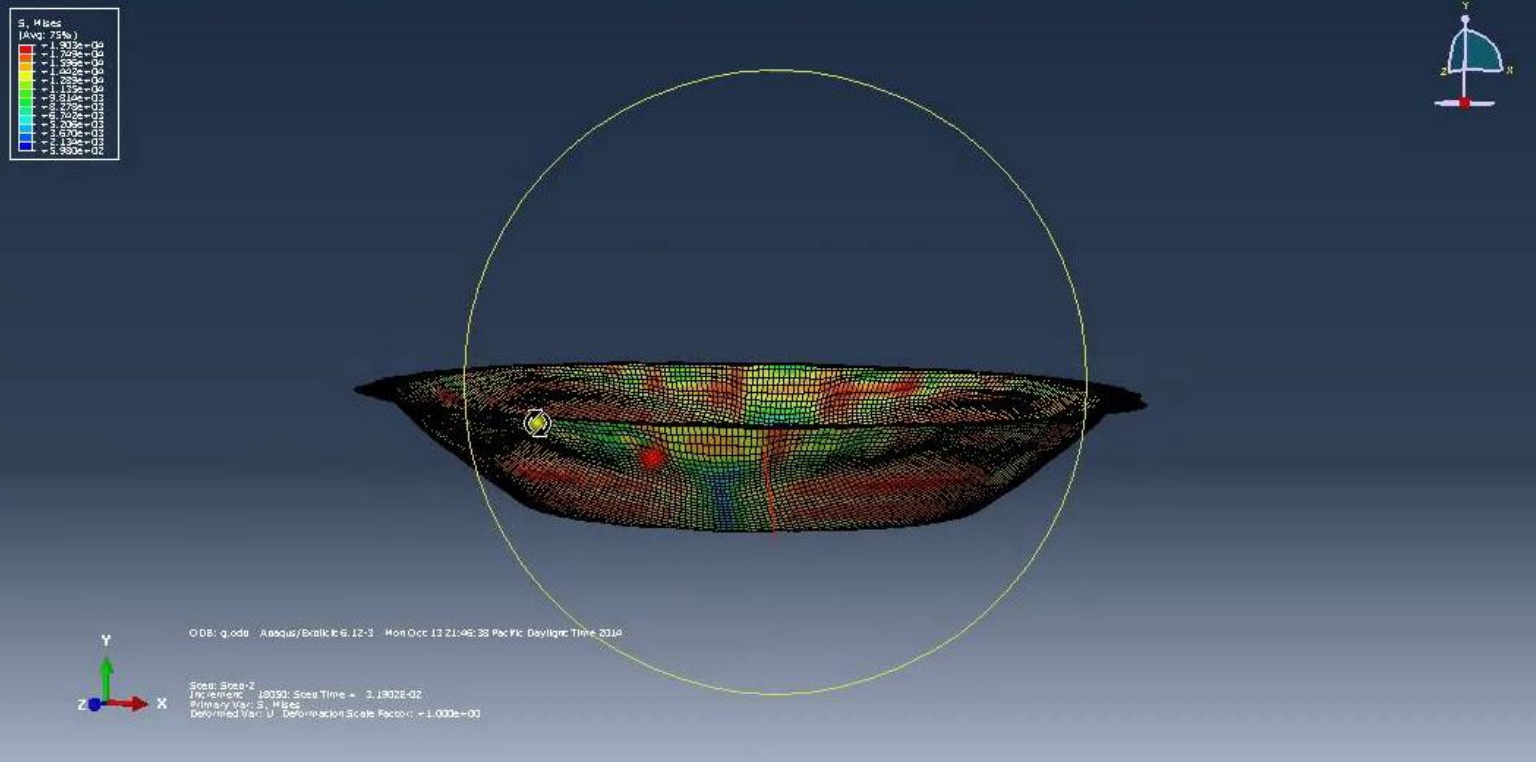


فناوری و کاربردهای شکل دهی انفجاری



نگارش: احسان کوثری نیا

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فناوری و کاربردهای شکل‌دهی انفجاری

نگارش: احسان کوثری نیا

حتی پس از پایان جنگ سرد، صنعت هوافضا همچنان یکی از قدرتهای صنعتی پیشرو جامعه جهانی است، به نحو موفقیت آمیزی در بازارهای جهانی رقابت می کند و چند صد هزار نفر را در سرتاسر دنیا مشغول به کار کرده است. یکی از مشکلات اصلی فراروی صنعت هوافضا، توانمندیهای تولیدی است. همچنان که اندازه موتورهای فضاییها افزایش می یابد ابعاد هریک از قطعات موتور نیز بزرگ می شود. این افزایش در ابعاد بدان معنی است که توانمندیهای کلیدی تولیدی نوعاً در خارج از کشور قرار گرفته و تولید برخی از قطعات بزرگ انحصاری است. نیاز به انجام پژوهش درباره فرایندهای شکل دهی برای تولید قطعات در صنایع هسته ای و هوافضا منجر به آن شده که فرآیند شکل دهی انفجاری نیز بار دیگر مورد بررسی قرار گیرد. محدودیت امکان دسترسی به اطلاعات موجود درباره این فرآیند باعث شده که بیش از آنکه پاسخ سوالات به دست آید، پرسشهای دیگری نیز در رابطه با آن مطرح شود.

تمامی فرایندها پس از گذشت زمان، با نسل جدیدی از کاربران مواجه می شوند که مزایا و معایب آن فرآیند را برای کاربردهای خاص مورد ارزیابی قرار می دهند. فرآیندی که امروزه توسط دانشگاہیان و صنعتگران مورد توجه و بررسی مجدد قرار گرفته، شکل دهی انفجاری است. بیش از یکصد سال است که مشخص شده می توان از مواد منفجره به نحو کنترل شده ای در تولید قطعات فلزی با پروفیل مشخص بهره گرفت. شکل مورد نظر محصول نیروی انفجار بوده که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم فلز را تغییر شکل می دهد. شکل دهی انفجاری واژه عامی است که گونه های مختلفی از گستره این فرآیند را دربر می گیرد. اختراعات اولیه مربوط به شکل دهی انفجاری در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم آشکار شد. تعداد فزاینده ای از کاربردهای موفق اقتصادی تا اوایل دهه ۱۹۷۰ با تولید قطعات بزرگ آلومینیومی و فولاد پراستحکام به ثمر رسید. نیاز به انجام پژوهش درباره فرایندهای شکل دهی برای تولید قطعات در صنایع هسته ای و هوافضا منجر به آن شده که فرآیند شکل دهی انفجاری نیز بار دیگر مورد بررسی قرار گیرد. در این کتاب، مروری کلی بر فعالیتهای انجام شده در زمینه شکل دهی انفجاری انجام شده است که دلایل انجام کار، توصیف کاربردهای شکل دهی انفجاری، ملزومات تولیدی آن، متالورژی مربوطه و آخرین دستاوردهای مربوط به توسعه فناوری شکل دهی انفجاری برای ورقها و صفحات فلزی ارایه و بررسی شده است.

این کتاب مشتمل بر پنج فصل می باشد. فصل اول به مقدمه ای درباره انواع روشهای شکل دهی پرسرعت و پیشینه آنها پرداخته شده است. در فصل دوم توصیف فرآیند شکل دهی انفجاری و ملزومات آن مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. در فصل سوم به مباحث تحلیلی و محاسباتی مرتبط با مکانیک شکل دهی

ورقها و شکل‌دهی انفجاری اشاره شده است. فصل چهارم به مباحث مربوط به تحلیل موج ضربه ناشی از انفجار در محیط‌های هوا و آب می‌پردازد. تحلیل موج بلاست انفجار به عنوان یکی از ورودی‌های مهم در تحلیل فرآیند شکل‌دهی انفجاری ضروری است. در فصل پنجم نیز اثرات شکل‌دهی انفجاری بر خواص ماده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ب	صفحه عنوان کتاب
ت	تقدیم
ث	قدردانی
ج	مقدمه
خ	فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه‌ای بر شکل دهی انفجاری

۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- مقدمه‌ای بر روشهای شکل دهی پرسرعت
۴	۱-۲-۱- شکل دهی الکترومغناطیس
۵	۲-۲-۱- شکل دهی الکتروهیدرولیک
۶	۳-۲-۱- شکل دهی انفجاری
۹	۳-۱- تجهیزات و عملیات شکل دهی انفجاری
۹	۱-۳-۱- مواد منفجره
۱۱	۲-۳-۱- آرایشهای تجربی قطعات تولید شده از ورق
۱۲	۳-۳-۱- محیطهای ناقل انرژی و قالبهای شکل دهی
۱۶	۴-۳-۱- محوطه تولید و هزینه‌های مربوطه
۱۷	۵-۳-۱- تولرانسهای قابل حصول
۱۷	۶-۳-۱- خواص مکانیکی فلز پس از شکل دهی انفجاری
۱۸	۱-۶-۳-۱- سختی
۱۹	۲-۶-۳-۱- استحکام
۲۱	۳-۶-۳-۱- چقرمگی شکست
۲۱	۴-۶-۳-۱- رفتار خستگی
۲۲	۷-۳-۱- ریزساختار پس از شکل دهی انفجاری
۲۳	۱-۷-۳-۱- دوقلویی شدن

صفحه	عنوان
۲۴	۱-۳-۷-۲- عیوب نقطه‌ای
۲۴	۱-۳-۷-۳- تاثیر متالورژیکی امواج شوک در فلزات
۲۶	۱-۴- مدله‌ها و مدل‌سازی شکل‌دهی انفجاری
۲۶	۱-۴-۱- مدل‌سازی فیزیکی
۲۸	۱-۵- مروری بر پژوهشهای انجام گرفته

فصل اول

مقدمه‌ای بر انواع روشهای شکل‌دهی
پرسرعت

فصل اول: مقدمه‌ای بر انواع روشهای شکل‌دهی پرسرعت

۱-۱- مقدمه

آغاز بهره‌گیری از مواد منفجره در شکل‌دهی فلزات به اواخر قرن نوزدهم برمی‌گردد، در آن زمان نخستین کاربرد ثبت شده عبارت بوده از حکاکی ورقهای فولادی با ایجاد طرحی بر روی بلوک ماده منفجره یا قراردادن یک استنسیل میان ماده انفجاری و صفحه. به استثنای چند کاربرد محدود، شکل‌دهی انفجاری تا اواسط دهه ۱۹۵۰ و آغاز عصر فضا (که نیازمند شکل‌دهی تعداد کمی از قطعات با شکلهای پیچیده بود) کاربرد چندانی نداشت. قطعات مذکور غالباً بزرگ بوده و از موادی بودند که شکل‌دهی آنها با روشهای معمولی دشوار بود. در این فصل، به معرفی انواع روشهای شکل‌دهی پرسرعت پرداخته شده که سازوکار شکل‌دهی، توصیف کاربردهای آنها و مباحث فنی آنها به صورت کلی بررسی شده و مروری مختصر بر ملزومات تولیدی آنها انجام گرفته است.

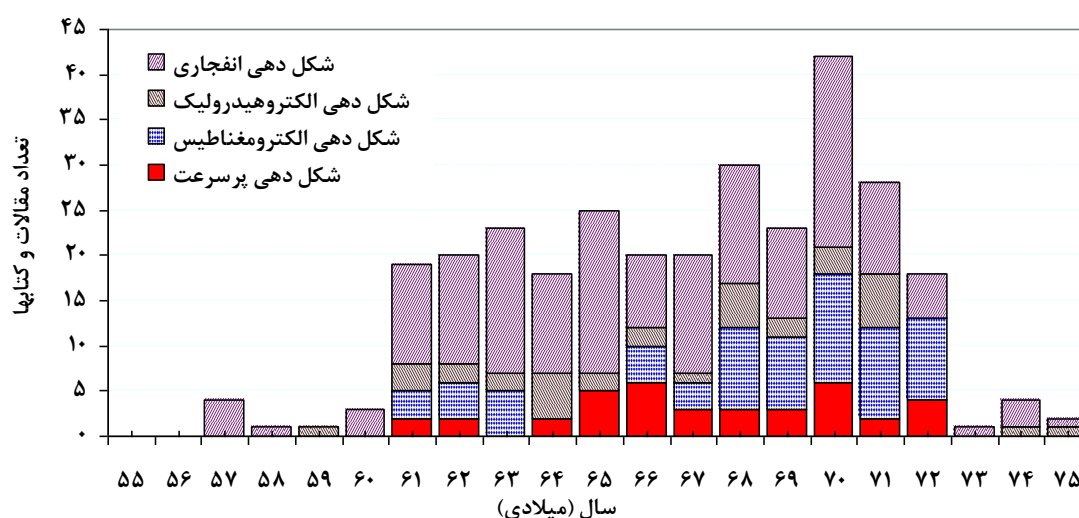
۱-۲- پیشینه شکل‌دهی پرسرعت

بیش از یکصد سال است که مشخص شده که از مواد منفجره می‌توان برای تغییر شکل فلزات بهره گرفت. گزارش شده که نخستین کاربرد مواد انفجاری در شکل‌دهی اتساعی فلزات توسط دانیل آدامسون در منچستر (بریتانیا) در ۱۸۷۸ انجام گرفته است. در روش آدامسون، از شکل‌دهی آزاد برای دستیابی به استحکام در صفحات بویلرها بهره گرفته شد. بعدها، والتر کلاود جانسون از کنت (بریتانیا) شکل‌دهی فلز بر روی قالب با استفاده از مواد انفجاری را توسعه داد. نتیجه این پژوهش، ارایه ثبت اختراع به شماره ۲۱۸۴۰ بریتانیا در ۲۳ سپتامبر ۱۸۹۸ جهت انبساط انفجاری لوله‌های فلزی برای ساخت بدنه دوجرخه شد. مدت کوتاهی بعد، در ۹ نوامبر ۱۹۰۹ اختراع شماره ۹۳۹,۷۰۲ برای شکل‌دهی انفجاری ورقهای فلزی در ایالات متحده ثبت شد. در اوایل دهه ۱۹۵۰، اختراع جانسون در شرکت مور آمریکا برای تولید قابهای پنکه‌های بزرگ استفاده شد که منجر به کاهش ۱۵ درصدی هزینه‌ها نسبت به روشهای متداول مکانیکی شد. در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود که تعداد انتشارات درباره شکل‌دهی انفجاری از ۱۹۶۱ به آرامی افزایش یافته و از ۱۹۷۲ به نحو چشمگیری کاهش یافته است. شکل ۱-۱ نشان می‌دهد که اگرچه شکل‌دهی انفجاری فرآیند غالب بوده، گونه‌های متعددی از آن با منابع انرژی مختلف مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته است. تخلیه خازن، نوعاً در آب، یا شکل‌دهی الکتروهیدرولیک (EHF)^۱ یکی از انواع آن به شمار می‌رود. روش دیگر، استفاده از میدان الکترومغناطیس یا شکل‌دهی الکترومغناطیس است (EMF)^۲. هر سه فرآیند شکل‌دهی

^۱ Electro-Hydraulic Forming

^۲ Electromagnetic Forming

الکترومغناطیس، الکتروهیدرولیک و انفجاری امروزه به صورت تجاری در دسترس بوده و در مواردی نیز با یکدیگر رقابت می‌کنند. پیش از بیان اینکه چه نوع فرآیندی به عنوان شکل‌دهی انفجاری شناخته می‌شود، توصیف مختصری از فرآیندهای شکل‌دهی الکترومغناطیس و الکتروهیدرولیک ارائه می‌شود.



شکل ۱-۱ گزارشهای پژوهشی مربوط به شکل‌دهی انفجاری در طول زمان

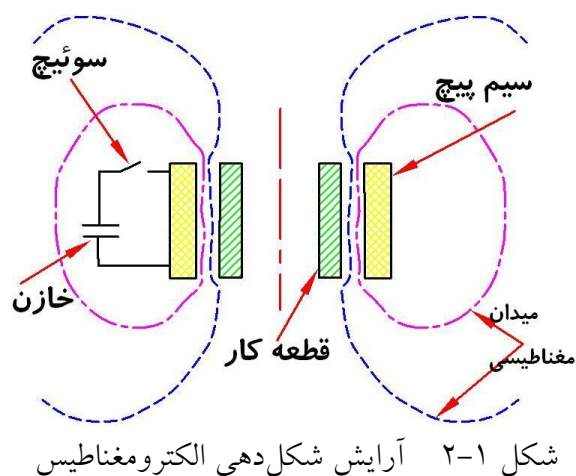
۳-۱- شکل‌دهی الکترومغناطیس

شکل‌دهی الکترومغناطیس (EMF) نوعی فرآیند شکل‌دهی سریع است که از چگالی انرژی یک پالس میدان مغناطیسی برای شکل‌دهی قطعات از فلزات با رسانایی الکتریکی بالا مانند آلومینیوم بهره می‌گیرد. از دیدگاه سازه‌های سبک وزن نوین، فرآیندهای شکل‌دهی خاص مانند شکل‌دهی الکترومغناطیس برای این گونه مواد اهمیت می‌یابد. برای درک بهتر سازوکار فرآیند و پیش‌بینی آن، باید از کوپل مدل‌های مکانیکی و الکترومغناطیسی، ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته و آزمایشهای تجربی با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های سریع قطعه بهره گرفت.

از اواخر دهه ۱۹۵۰ از پالس میدان مغناطیسی قوی برای فرآیندهای شکل‌دهی سریع مواد با رسانایی الکتریکی بالا استفاده شده است. در سال ۱۹۵۹ اختراع فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس توسط هاروی و برور ثبت شد. با گذشت زمان و به دلیل انتظارات بالای مهندسين تولید از این فرآیند، فعالیتهای تئوری و تجربی زیادی بر روی آن انجام شد. اما به تدریج از این فعالیتها کاسته شد چرا که برخی از این انتظارات بیش از حد، برآورده نشد، خصوصاً از دیدگاه صرفه اقتصادی، شکل‌دهی الکترومغناطیس نتوانست با روشهای متداول شکل‌دهی رقابت کند.

در خصوص سازه‌های سبک، به ویژه در زمینه مهندسی خودرو و هوافضا، شکل‌دهی موادی چون آلایزهای آلومینیوم و منیزیم اهمیت پیدا کرده است. این امر می‌تواند یکی از دلایل توجه دوباره امروز صنعت به فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس باشد. دلایل دیگر را می‌توان مربوط به پیشرفتهای جدید در توسعه تجهیزات فرآیند و امکانات نوین در درک و پیش بینی بهتر فرآیند با استفاده از روش المان محدود دانست. در کاربردهای صنعتی، روش شکل‌دهی الکترومغناطیس با روشهای شکل‌دهی متداول رقابت نمی‌کند، بلکه به عنوان مکملی برای آنها استفاده شده تا طراحی فرآیند به نحو بهینه‌ای انجام شود.

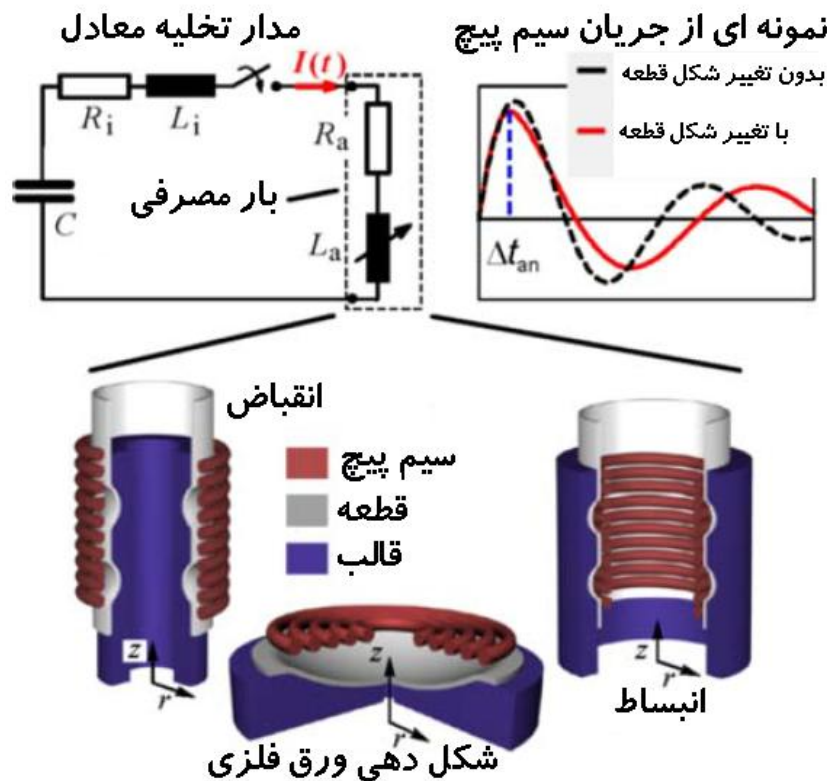
شکل‌دهی الکترومغناطیس وابسته به خواص الکتریکی ماده قطعه کار است. نوعاً مقاومت ویژه الکتریکی جنس قطعه باید کمتر از $15 \mu\Omega cm$ باشد. مواد مناسب برای این منظور عبارتند از مس، آلومینیوم، فولاد کم کربن، برنج، اغلب فلزات گرانبها و فولاد ضدزنگ. برای انجام شکل‌دهی، انرژی خازن در سیم پیچ دربرگیرنده قطعه تخلیه می‌شود (شکل ۱-۲). جریان گذرنده از سیم پیچ، یک میدان مغناطیسی ایجاد کرده که قدرت آن متناسب با شدت جریان است (قانون بیوت). میدان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف سیم پیچ نیز به نوبه خود در قطعه یک جریان الکتریکی تولید کرده و این جریان یک میدان مغناطیسی حول قطعه تشکیل می‌دهد. دو میدان مغناطیسی یکدیگر را دفع کرده و نیروی مربوطه سبب تغییر شکل ورق می‌شود. این سیستم یک فرآیند شکل‌دهی غیر تماسی بوده و لذا نیازی به اعمال روانکار ندارد. فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس غالباً به عنوان یک روش مونتاژ و معمولاً به همراه روشهای دیگر به کار می‌رود. در یک نمونه از کاربرد این روش در صنعت خودروسازی، شرکتهای کرایسلر، فورد و جنرال موتورز تحت پوشش جامعه پژوهشهای خودرو ایالات متحده، روکشهای آلومینیومی درب خودرو را به روش ترکیبی از پرسکاری معمولی به همراه شکل‌دهی الکترومغناطیس تولید نمودند.



۱-۳-۱- توصیف فرآیند و فشار مغناطیسی اعمالی

سیستم شکل‌دهی الکترومغناطیس عمدتاً تشکیل شده است از یک منبع تغذیه پالسی، یک سیم‌پیچ قابل تعویض به عنوان ابزار، و قطعه کار. همانگونه که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، اجزای هسته به عنوان یک مدار رزونانس معادل عبارتند از منبع ذخیره انرژی با ظرفیت خازن C ، کلید آمپر بالا و سیستم انرژی القایی (با مقاومت R_i و اندوکتانس L_i) و بار مصرفی که شامل قطعه و سیم‌پیچ ابزار با مقاومت R_a و اندوکتانس L_a است. نحوه آرایش قطعه و سیم‌پیچ ابزار نوع فرآیند را مشخص می‌کند:

قطعات لوله‌ای شکل را می‌توان با تعبیه سیم‌پیچ ابزار در بیرون قطعه منقبض و یا با قرار دادن سیم‌پیچ ابزار درون قطعه، آنرا منبسط کرد. ورقهای فلزی را نیز می‌توان با سیم‌پیچهای ابزار مسطح شکل داد.



شکل ۱-۳ مدار معادل سیستمهای شکل‌دهی الکترومغناطیس و انواع فرآیند

با تخلیه خازن، بسته شدن ناگهانی سویچ فشار قوی باعث ایجاد جریان نوسانی میراشده $I(t)$ در سیم‌پیچ ابزار می‌شود. طبق قانون لنز، میدان مغناطیس پالسی شکل ایجاد شده $H(t)$ جریان الکتریکی ثانویه‌ای در قطعه القا کرده که جهت آن خلاف جهت سیم‌پیچ ابزار است. به دلیل اثر پوسته‌ای، میدان مغناطیسی بسته به هدایت الکتریکی قطعه κ ، ضخامت آن s_0 و فرکانس جریان f به جداره قطعه نفوذ می‌کند. در مدت زمان خاصی میدان مغناطیسی محدود به شکاف میان قطعه کار و سیم‌پیچ ابزار

می‌شود. چگالی انرژی میدان مغناطیسی معادل فشار مغناطیسی $p(t)$ است که به صورت اختلاف فشار میان چگالی انرژی در شکاف و چگالی انرژی نفوذ کرده درون جداره قطعه عمل می‌کند:

$$p(t) = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot (H_{gap}^2(t) - H_{diff}^2(t)) \quad (1-1)$$

برخلاف فرآیند انقباض لوله، که در آن میدان مغناطیسی H_{gap} مستقیماً جریان سیم‌پیچ تعیین می‌شود، میدان مغناطیسی در فرآیندهای انبساط لوله و شکل‌دهی ورق با جریان القا شده در قطعه مشخص می‌شود. سازوکار فرآیند تنها زمانی رخ می‌دهد که قطعه کار هادی جریان الکتریکی در مجاورت نزدیک سیم‌پیچ ابزار قرار گیرد. به این ترتیب جریان تخلیه عمدتاً در ناحیه‌ای از سیم‌پیچ جریان می‌یابد که نزدیک قطعه کار قرار دارد و در اثر آن جریان مختلف الجهتی در قطعه القا خواهد شد به گونه‌ای که چگالی انرژی میدان مغناطیسی در شکاف میان سیم‌پیچ ابزار و قطعه منجر به تغییر شکل قطعه می‌شود.

اگر تنش حاصل از فشار اعمالی به قطعه از تنش تسلیم آن فراتر رود، تغییر شکل دینامیک آغاز می‌شود، که باعث تغییر اندوکتانس بار مصرفی L_a در مدار تخلیه می‌شود. به این ترتیب تغییر شکل قطعه کار را بر تغییرات جریان تخلیه تاثیر می‌گذارد که نمونه‌ای از آن در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

۱-۳-۲- شناسایی پارامترهای مهم فرآیند

۱-۳-۲-۱- تاثیر پالس فشار با چشم پوشی از تغییر شکل قطعه

طبق رابطه (۱-۱)، زمانی که میدان مغناطیسی کاملاً محفوظ (شیلد) شود (یعنی H_{diff} صفر شود) و انرژی شارژ خازنها به موثرترین نحو به محل مورد نظر منتقل شود، بازدهی فرآیند بیشترین مقدار خواهد بود. تاثیر پارامترهای مهم فرآیند در آرایش ساده شده انقباض لوله که در آن سیم‌پیچ، یک سولنوئید با طول بی‌نهایت فرض شده، آشکار می‌شود. در این حالت میدان مغناطیسی درون سیم‌پیچ با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$H_0(t) = \frac{n \cdot I(t)}{l_c} \quad (2-1)$$

که وابسته به جریان سیم‌پیچ $I(t)$ و تعداد حلقه‌ها بر واحد طول سیم‌پیچ n/l_c است. علاوه بر آن رفتار محافظ (شیلد) یک لوله فلزی درون یک میدان مغناطیسی طولی یکنواخت و سینوسی به این صورت بیان می‌شود

$$H_{diff}(t) = \frac{H_0(t)}{\cosh\left(\frac{1+i}{\delta_s} \cdot s_0\right) + \frac{1+i}{2\delta_s} \cdot r_{i,tube} \cdot \sinh\left(\frac{1+i}{\delta_s} \cdot s_0\right)} \quad (3-1)$$

که در آن ضخامت پوسته وابسته به جریان از رابطه زیر به دست می آید،

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot K}} \quad (4-1)$$

$r_{i,tube}$ شعاع داخلی لوله و s_0 ضخامت جداره است.

اگر از برهم کنش میان تغییر شکل قطعه و میدان مغناطیسی صرف نظر شود (مقدار اندوکتانس L_a ثابت باشد)، محاسبه میدان مغناطیسی ایمپالسی یک مساله خطی است و می تواند در حوزه فرکانس با استفاده از تبدیلات فوریه ایمپالس جریان محاسبه شده یا اندازه گیری شده تحلیل شود. از این تحلیل هارمونیک می توان نتیجه گرفت انطباق خواص هندسی و الکتریکی با فرکانس جریان تخلیه می تواند بازدهی فرآیند را با به حداقل رساندن میدان مغناطیسی نفوذ کننده بهبود بخشد. در جدول ۱-۱ موارد مربوط به این بهینه سازی آورده شده است.

باید اشاره کرد که موارد مطرح شده در جدول ۱-۱ نه تنها برای فرآیند انقباض لوله، بلکه برای تمامی انواع دیگر فرآیند صادق است. این امر را می توان با شبیه سازیهای المان محدود برای تعیین میدان مغناطیسی با در نظر گرفتن رفتار زمانی جریان القا شده در قطعه کار نشان داد.

جدول ۱-۱ پارامترهای مهم فرآیند که بر رفتار محافظ (شیلد) قطعه تاثیر می گذارد.

تاثیر بر فشار اعمالی با کاهش میدان مغناطیسی نافذ	
ضرب هدایت الکتریکی K	هرچه ضریب هدایت الکتریکی قطعه بالاتر باشد محافظت (شیلد) میدان مغناطیسی بهتر شده و بالتبع اختلاف فشار بالاتر خواهد بود.
ضخامت جداره s_0	ضخامت بیشتر به این معنا است که میدان مغناطیسی آرامتر در جداره قطعه نفوذ می کند.
فرکانس جریان تخلیه f	فرکانس بالاتر می تواند ضریب هدایت الکتریکی پایین یا ضخامت اندک جداره را جبران کند.

شناسایی آن دسته از پارامترهای فرآیند که بر انتقال کارآمد انرژی شارژ به فشار بیشینه با میدان مغناطیسی H_{gap} موثراند وابسته به پارامترهای مدار معادل (شکل ۱-۱) است. برای دستیابی به بازدهی بالا باید از یک مولد پالس با القای اندک برای ایجاد جریان در سیم پیچ ابزار بهره گرفت. به علاوه، تعداد حلقه ها n و طول سیم پیچ l_c بر قدرت میدان موثر بوده که اثر آنها بر بهینه سازی پارامترهای R_a و L_a ظاهر می شود. چنانچه از تغییر شکل قطعه کار جلوگیری شود، انرژی تخلیه متناسب با شدت میدان بوده و فشار بیشینه و مقدار بهینه خواص سیم پیچ را می توان تعیین کرد.

با مراجعه مجدد به فرآیند انقباض لوله، میدان مغناطیسی در شکاف را می‌توان به این صورت تعیین کرد:

$$H_{gap}(t, z) = H_0(t) \cdot k_H(z) = \frac{n \cdot I(t)}{l_C} \cdot k_H(z) \quad (5-1)$$

بنابراین، حداکثر شدت میدان مغناطیسی ممکن H_0 مقدار مرجع مناسبی برای میدان مغناطیسی شکاف بوده و می‌تواند با تابع k_H که بیانگر توزیع میدان در شکاف میان سیم‌پیچ و قطعه با احتساب ابعاد واقعی است مشخص شود. این ضریب توزیع، تابعی است که وابسته به شکاف میان سیم‌پیچ و قطعه a (شامل نیمی از عمق پوسته در سیم‌پیچ و قطعه) و طول سیم‌پیچ ابزار است. تمامی این پارامترها، همانگونه که در جدول ۱-۲ آورده شده، تاثیر خاصی بر مدار معادل سیستم شکل‌دهی الکترومغناطیس و بالتبع، شدت میدان مغناطیسی دارد.

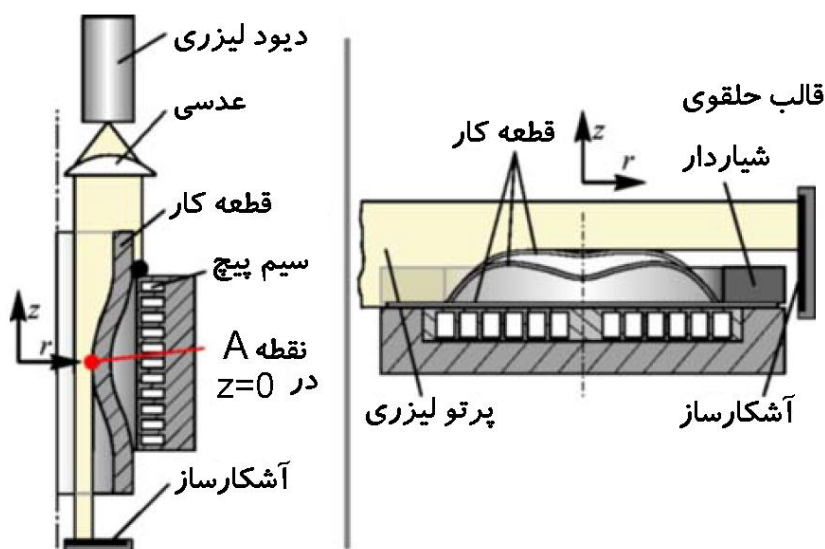
جدول ۱-۲ پارامترهای مهم فرآیند که بر مقدار فرافشار مغناطیسی تاثیر می‌گذارند.

تاثیر بازدهی انتقال انرژی بر فرافشار ناشی از میدان مغناطیسی در شکاف	
تراکم حلقه‌های سیم‌پیچ ابزار n/l_C	برای هر مولد پالس و شرایط شکل‌دهی تعداد حلقه بهینه‌ای وجود دارد. مقدار بهینه دامنه فشار به مدت زمان فرآیند بستگی دارد.
شکاف بین قطعه و سیم‌پیچ ابزار a	شکاف هوایی کمتر باعث کاهش اندوکتانس شده که شدت میدان و مقدار فرافشار را افزایش می‌دهد.
ضریب رسانایی الکتریکی K	ضریب رسانایی الکتریکی بالاتر باعث کاهش اندوکتانس شده که شدت میدان و مقدار فرافشار را افزایش می‌دهد.

در تمامی انواع فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس، گام نخست طراحی فرآیند تعیین خواص بهینه سیم‌پیچ و هندسه مناسب است، که هر دو وابسته به نوع شکل‌دهی و مولد پالس است.

۱-۳-۲- بررسی کنش میان ایمپالس فشار و تغییر شکل قطعه

علاوه بر پارامترهای جداول ۱-۱ و ۲-۱، سایر ملزومات برای اعمال فشار مناسب را می‌توان با توجه به نوع تغییر شکل قطعه مشخص کرد. همانگونه که در بخش قبل گفته شد، افزایش شکاف طی فرآیند باعث تغییر جریان تخلیه و در پی آن تغییر فشار اعمالی می‌شود. این تغییرات در شبیه سازی میدان مغناطیسی به صورت پله‌ای لحاظ شده و نتایج این شبیه سازی با نتایج اندازه گیریهای تجربی فرآیند تغییر شکل مقایسه شده است.



شکل ۴-۱ روش اندازه‌گیری سریع برای تعیین رفتار تغییر شکل نواحی مهم قطعه

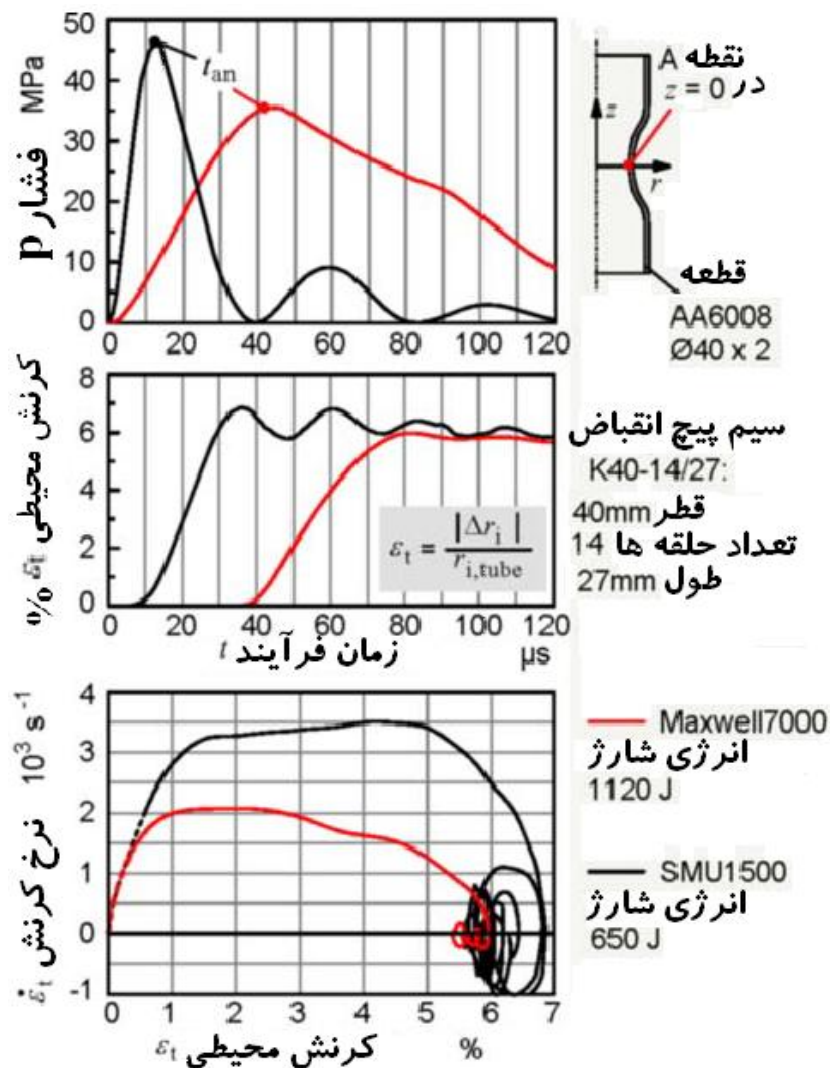
شکل ۴-۱ نحوه کار روش اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. طرز کار آن مبتنی بر سایه پرتوهای مستقیم لیزر در اثر تغییر شکل قطعه حین فرآیند است. دیود لیزری در یک سمت قطعه و آشکارساز آن در سمت دیگر قرار می‌گیرد (آشکارساز نوعی دیود نوری است که زمان خیز آمپلی فایر آن کمتر از یک پیکوثانیه است). در فرآیند انقباض لوله، ولتاژ خروجی آشکارساز متناسب با جابجایی نقطه A (نقطه با خیز بیشینه) است. در فرآیند شکل‌دهی ورق با سیم‌پیچ مارپیچ، پرتو لیزر به صورت افقی تابیده شده و می‌تواند تغییر شکل شعاع مشخصی از ورق را نشان دهد. برای اندازه‌گیری نواحی «پنهان» قطعه می‌توان از روش پینهای تماسی به عنوان روش دوم بهره گرفت. در این روش پینها در فواصل مختلف Δz نسبت به قطعه قرار گرفته که زمان تماس Δt_c آنها اندازه‌گیری می‌شود.

به منظور نشان دادن ارتباط میان خواص قطعه، سرعت شکل‌دهی و فشار مغناطیسی اعمالی، در بخشهای بعد فرآیندهای شکل‌دهی ورق و انقباض لوله مطابق با سازوکار شکل‌دهی مربوط به خود مورد بررسی قرار می‌گیرند.

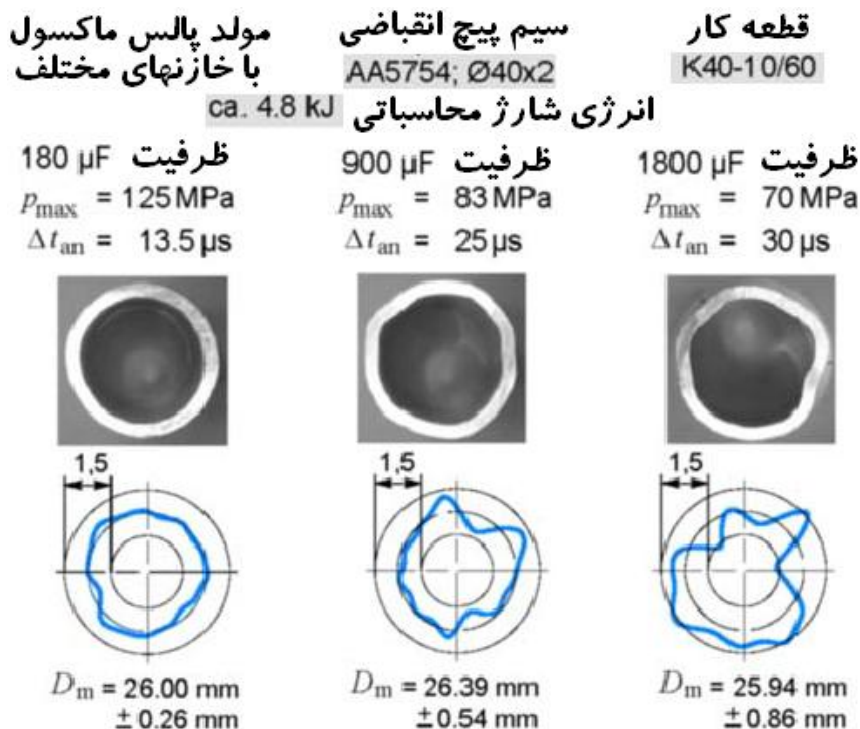
۳-۳-۱- انقباض قطعات لوله‌ای شکل به روش الکترومغناطیس

مشخصات بهینه سیم‌پیچ برای یک مولد پالس خاص می‌تواند منحنی‌های فشار زمان متفاوتی ایجاد کند. پارامترهای توصیف کننده این منحنی‌ها عبارتند از فرافشار p_{max} ، زمان خیز t_{an} و مدت زمان (نخستین) ایمپالس Δt_p . اصولاً ایمپالس کوتاه و شدید و ایمپالس طولانی و ضعیفتر، نسبت گلویی ϵ_f یکسانی در لوله ایجاد می‌کند. در شکل ۵-۱ مثالی نشان داده شده که در آن یک سیم‌پیچ ابزار با دو مولد پالس متفاوت، کرنش محیطی تقریباً یکسانی ایجاد کرده‌اند. زمانهای خیز فشار متفاوت بوده

و می‌توان مشاهده کرد که زمان خیز کوتاه‌تر، سرعت شکل‌دهی بیشتری به قطعه داده است. معمولاً در عملیات انقباض لوله، فرآیند تا زمان ایمپالس Δt_p به اتمام می‌رسد.



شکل ۵ نمونه‌ای از فرآیندهای انقباض لوله با زمانهای خیز فشار و سرعتهای شکل‌دهی متفاوت در این حالت ایمپالس کوتاه‌تر انطباق خوبی با مدت زمان فرآیند شکل‌دهی پیدا کرده و لذا به انرژی شارژ بسیار کمتری نسبت به ایمپالس بلندتر نیاز دارد. علاوه بر بازدهی فرآیند، خواص قطعه تولید شده نیز معیاری برای منحنی فشار بهینه است.



شکل ۶ تاثیر زمان خیز فشار بر اثرات چین خوردگی در فرآیند انقباض آزاد لوله

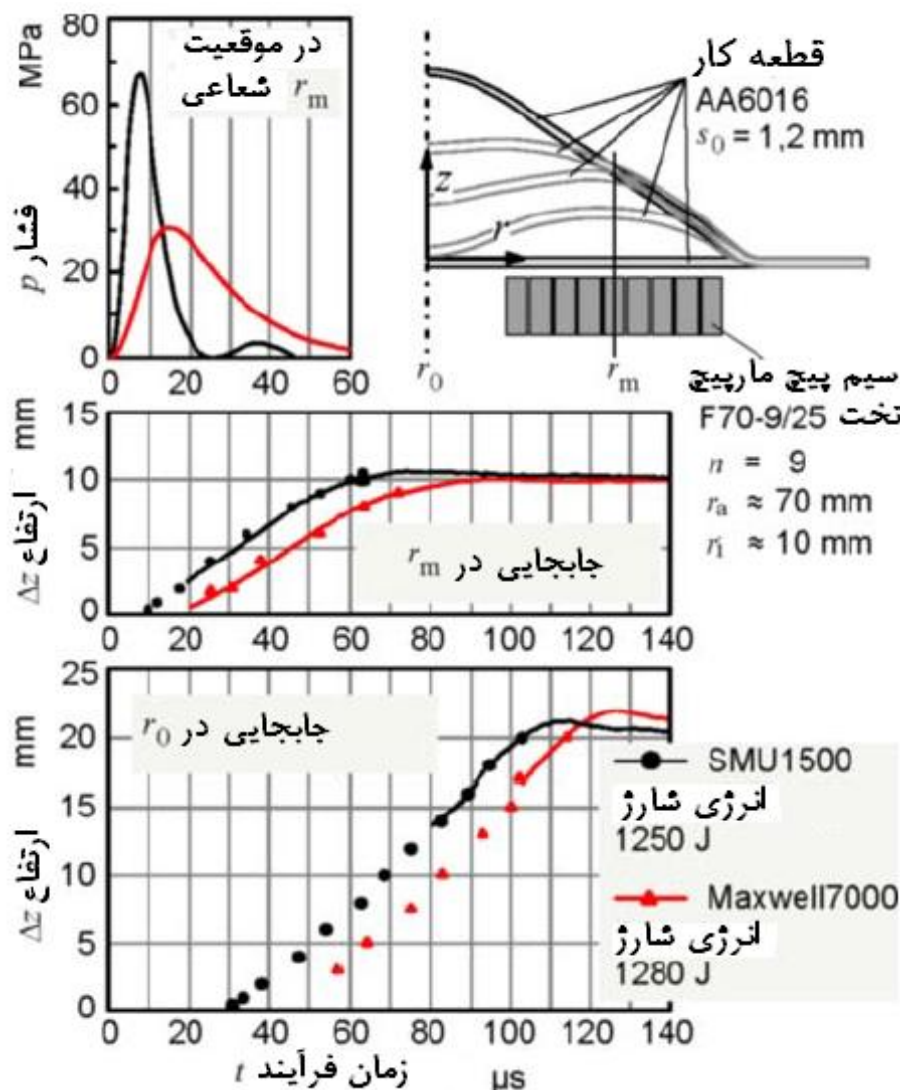
با توجه به قابلیت استفاده از فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس به عنوان عملیات پیش فرم فرآیند شبه ایستای هیدروفرمینگ، نتایج زیر به دست آمده است:

- همانگونه که انتظار می رود، با افزایش فشار ایمپالس در زمان خیز مشابه، کرنش محیطی بالاتری حاصل می شود، که باعث افزایش تاثیر چین خوردگی و اثر کرنش سختی می شود.
- اما در یک کرنش محیطی مشخص، نرخ کرنش بالاتر که در اثر زمان خیز فشار کوتاهتری ایجاد می شود، منجر به تولید گردی بهتری می شود (مراجعه شود به مثال شکل ۶)، حال آنکه تاثیری بر کرنش سختی ندارد.

علاوه بر این، در کاربردهای اتصال قطعات، سرعت ضربه میان لوله و قطعه درونی آن نیز جزو پارامترهای فرآیند محسوب می شود. چنانچه انرژی جنبشی در لحظه ضربه به اندازه کافی بالا باشد، نیروی اتصال انطباقی می تواند در حد استحکام جنس قطعه باشد.

۴-۳-۱- شکل دهی الکترومغناطیس ورق

برخلاف فرآیند انقباض لوله، تغییر شکل قطعه در شکل دهی آزاد ورق به زمان بیشتری نسبت به زمان اعمال فشار ایمپالس نیاز دارد. این مساله را در شکل ۷ می توان مشاهده کرد. در این مثال، شکل هندسی تقریباً یکسانی با ابزار سیم پیچ یکسان ولی با مولدهای پالس مختلف به دست آمده است.



شکل ۷ نمونه‌ای از فرآیند شکل‌دهی ورق با منحنی‌های فشار-زمان گوناگون

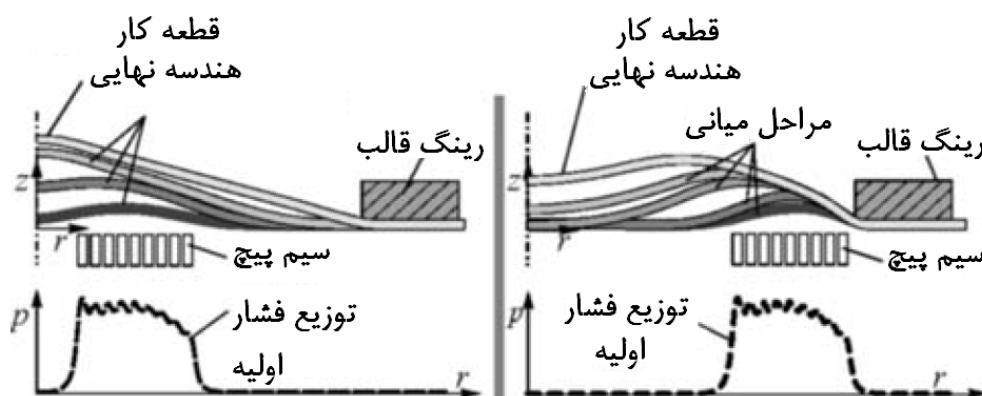
جابجایی دو نقطه مهم در موقعیتهای شعاعی زیر اندازه‌گیری شده است.

- r_m که در آن توزیع فشار اولیه بیشترین مقدار را داشته و از آنجا تغییر شکل آغاز می‌شود، و
- روی مرکز سیم‌پیچ که در آنجا فشار صفر است.

با بالا رفتن تنش از مقدار تنش تسلیم، فرآیند تغییر شکل در ناحیه حلقوی شکل تحت فشار آغاز می‌شود. همانگونه که در موقعیت r_m نشان داده شده، به دلیل افزایش سریع شکاف a ، فشار به سرعت کاهش می‌یابد. با افت فشار، جابجایی در این ناحیه در اثر نیروهای اینرسی همچنان افزایش می‌یابد، ولی سرعت تغییر شکل کاهش پیدا می‌کند. عمدتاً در این مرحله از فرآیند، ناحیه مرکزی قطعه شتاب گرفته و به حداکثر سرعت می‌رسد، در حالیکه تغییر شکل ناحیه تحت فشار تقریباً به اتمام رسیده است. بقیه تغییر شکل قطعه تنها با نیروهای اینرسی انجام می‌شود.

به دلیل آنکه ایمپالس فشار بسیار کوتاه است، سرعت شکل‌دهی نمی‌تواند متأثر از زمان خیز فشار باشد، و نیز به دلیل ماهیت فرآیند و افزایش شکاف، اعمال فشار به مدت زیاد امکان‌پذیر نیست. در

فرآیند شکل دهی ورق، انرژی شارژ پارامتر مهمی است که توسط فشار مغناطیسی به نیروهای اینرسی منتقل می‌شود. به بیان دیگر، میزان تاثیر نیروهای اینرسی وابسته به توزیع مکانی فشار است. با تغییر ناحیه تحت فشار ورق، هندسه مراحل شکل دهی تغییر کرده (شکل ۸) و بالتبع، توزیع سرعت نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین در طراحی فرآیند باید هندسه سیم پیچ ابزار را که بر توزیع فشار تاثیر گذار است و نیز مقدار بهینه انرژی شارژ را در نظر گرفت. این امر نیازمند بهره‌گیری از شبیه سازی المان محدود با کوپل الکترومکانیکی است.



شکل ۸ شبیه سازی تغییرات توزیع مکانی فشار

برای بهره‌گیری موثر از شکل دهی الکترومغناطیس در تولید صنعتی، انتقال کارآمد انرژی الکتریکی به پالس فشار و توزیع آن مطابق با نوع قطعه ضروری است. در این بخش نشان داده شده که بسته به اینکه بخش عمده‌ای از تغییر شکل قطعه در مدت اعمال پالس انجام شود (مانند فرآیند انقباض لوله) یا زمان پالس فشار در مقایسه با زمان تغییر شکل قطعه کوتاه باشد (مانند فرآیند شکل دهی ورق)، می‌توان دو سازوکار تغییر شکل متفاوت را برای فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس در نظر گرفت. شناخت ارتباط میان رفتار قطعه کار و فشار مغناطیسی اعمالی امکان طراحی و تحلیل مطمئن فرآیند را فراهم می‌سازد.

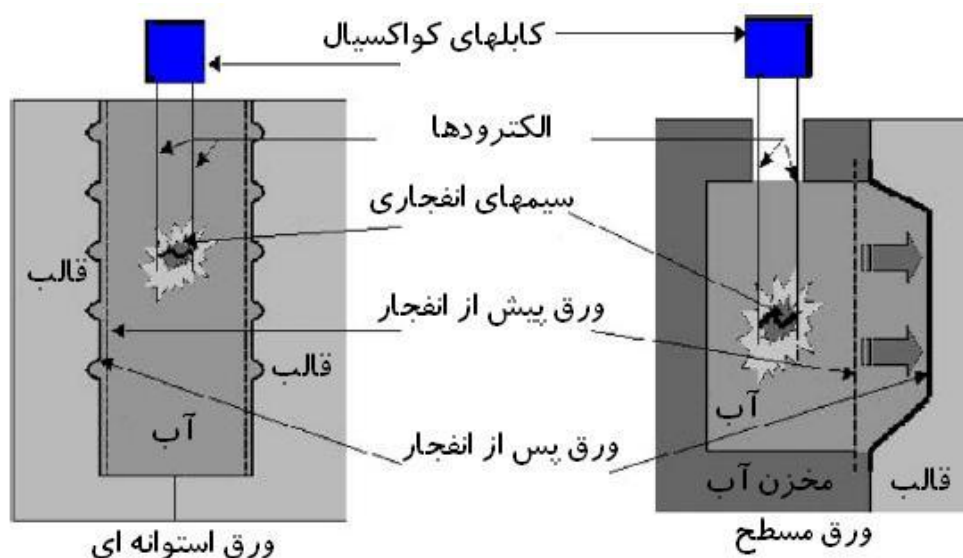
۴-۱- شکل دهی الکتروهیدرولیک

شکل دهی الکتروهیدرولیک را می‌توان حد واسطی میان شکل دهی الکترومغناطیس و شکل دهی انفجاری با خرج شیمیایی دانست. انرژی خازنهای شارژ شده درون یک محیط ناقل انرژی (که نوعاً آب می‌باشد) تخلیه می‌شود (شکل ۹). قالب معمولاً به همراه قطعه ورق یا لوله درون آب قرار گرفته و میان آن دو خلا ایجاد می‌شود. دو عدد سیم الکتریکی بلند به طور موازی درون آب قرار می‌گیرد. اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر سیم باعث عبور جریان از آنها شده که بعضاً به کمک یک سیمپل

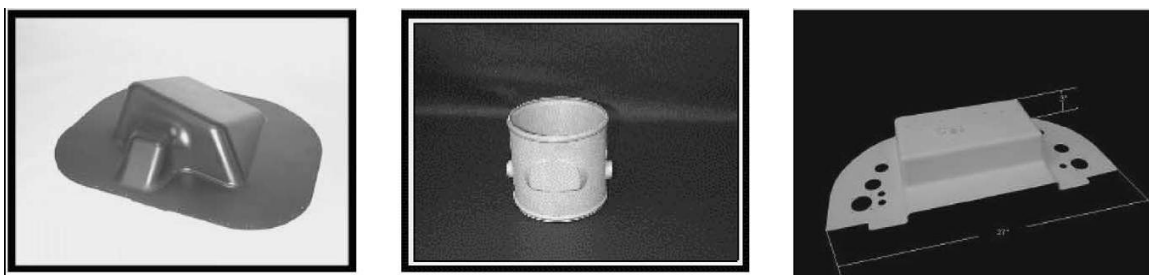
انفجاری، عبور جریان تسهيل می‌شود. جريان عبور کننده از آب آن را به اکسيژن و هيدروژن تجزيه نموده که با تخليه انفجاری انرژی، موج ضربه‌ای ایجاد کرده و ورق را با سرعت بالا به سمت قالب هل می‌دهد. موقعیت الکترودها در آب به شکل قطعه بستگی دارد. از جمله کاربردهای این روش می‌توان شکل‌دهی پوسته‌های قایق را نام برد.

داهن از دانشگاه ایالتی اوهایو گزارش کرده که شرکت جنرال الکتریک قطعات موشک از جنس آلومینیوم را با استفاده از خازنهای ۳۶۰ میلی فاراد و تا ۱۰ کیلوولت تولید نموده است. شرکت ویکرز از نیوکاسل در بریتانیا نیز از خازنهایی به ظرفیت ۴۰ کیلوژول برای تولید قطعات گوناگون شامل اتصالات لولایی از جنس فولاد ضدزنگ؛ برای ترکیب عملیات برش و شکل‌دهی ورقهای نازک آلومینیومی و مونتاژ قطعات با استفاده از آلیاژهای گوناگون آلومینیوم، مس، نيمونیک ۷۵ و تیتانیوم بهره گرفته است. همچنین داهن می‌گوید که گزارشها نشان می‌دهد استفاده از شکل‌دهی الکتروهیدرولیک به نحو موفقیت‌آمیزی مشکلات شکل‌دهی مس، آلومینیوم ۶۰۶۱ و فولاد ضدزنگ را برطرف کرده است. شرکت سینسیناتی شیرر دستگاه‌های شکل‌دهی الکتروهیدرولیک را با ظرفیتهایی بین ۲۵ تا ۱۵۰ کیلوژول تحت نام تجاری الکتروشیپ تولید کرد و شرکت روهر نیز دستگاه‌های سونیفرم را با ظرفیت بین ۱۵ تا ۶۰ کیلوژول عرضه کرد.

محدودیت این فرآیند مربوط به مقدار ظرفیت انرژی خازنهای الکتریکی است. به لحاظ فنی، اندازه فیزیکی خازنها عامل محدود کننده به شمار می‌رود. این فرآیند نوعاً برای تولید قطعات کوچک و متوسط لوله و ورق با ضخامت کم به کار می‌رود که نمونه‌ای از آن در شکل ۴ نشان داده شده است. گفته شده که با استفاده از ابزارها و الکترودهای مناسب می‌توان از روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک به عنوان جایگزین بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری بهره گرفت.



شکل ۹ آرایش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک



شکل ۱۰ چند نمونه قطعه تولید شده به روش شکل دهی الکتروهیدرولیک

۱-۵- معرفی شکل دهی انفجاری

شکل دهی انفجاری یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک با نرخ انرژی بالا در ورقها و لوله‌های فلزی است که در آن از یک خرج انفجاری به عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود. این روش حدود ۵۰ سال پیش توسعه پیدا کرده و در دهه هفتاد سده گذشته برای تولید قطعات گوناگون صنعت هوافضا مانند شکل دهی ورقهای بزرگ آلومینیوم برای راکت ساتورن در آمریکا به کار رفته است. امروزه از این روش تنها در تعداد محدودی از شرکتها و موسسات تحقیقاتی استفاده می‌شود. مروری بر این فناوری و استفاده کنندگان آن در همین فصل ارائه شده است.

شکل دهی انفجاری فرآیندی است که به لحاظ کاربری دشوار بوده ولی از آنجا که تنها به یک نیمه قالب نیاز دارد می‌تواند برای تولید تعداد کم فلزات با شکل پذیری دشوار (مانند نیکل، تیتانیوم و آلیاژهای آلومینیوم که عموماً در کاربردهای هوافضایی به کار می‌روند) صرفه اقتصادی داشته باشد. از آنجا که این آلیاژها می‌توانند در حالت سخت شده (و تمپر شده) خود شکل داده شوند، قطعات تولید شده نیازی به عملیات حرارتی بعدی (که عموماً منجر به تابیدگی قطعات می‌شود) ندارد.

از آنجا که در این روش تنها از یک نیمه قالب استفاده می‌شود، مزیت بزرگی در کاهش هزینه‌های تولید قالبهای با اشکال پیچیده محسوب می‌شود. همچنین نیاز به دستگاه‌های عظیم‌الجثه یا منابع انرژی خاص حذف شده که شکل دهی صفحات فلزی بزرگ و ضخیم را امکان پذیر کرده است. البته گیره‌بندی صفحات فلزی و کارکردن با خرجهای انفجاری آن را به لحاظ کاربری دشوار کرده که هزینه‌های بازگشتی آن را زیاد کرده است. ترکیب هزینه‌های اولیه اندک و مشخصه کاربری دشوار، این فرآیند شکل دهی را تنها برای تولید قطعات نمونه و تولید محدود مناسب نموده است.

مواد منفجره یک منبع انرژی قوی، ارزان قیمت و کاملاً در دسترس به حساب می‌آیند. برخلاف دیگر روشهای شکل دهی، این روش نیاز به دستگاه خاصی ندارد. این مساله خود یک مزیت عمده محسوب می‌شود چراکه اندازه و قدرت محدود دستگاه به طور ذاتی محدود کننده ابعاد و ضخامت

آن قطعه می‌باشد. در صورتی که خرج انفجاری را می‌توان برای هرگونه ابعادی از فلز تنظیم نمود. خرج انفجاری می‌تواند در یک نقطه متمرکز شده و یا به گونه‌ای توزیع شده باشد که انرژی آزاد شده از آن به صورت یکنواخت روی فلز پخش شود (مانند استفاده از کورد انفجاری). معمولاً خرج در تماس مستقیم با صفحه نیست بلکه زیر آب که محیط خوبی برای انتقال موج ضربه است (زیرا پرکننده‌ای تراکم ناپذیر و بدون حفره است) قرار می‌گیرد.

ورق روی حفره قالب قرار گرفته و از لبه‌های آن گیربندی می‌شود. هوای میان ورق و قالب ممکن است قبل از شکل‌دهی برای جلوگیری از فشار پستی (و اکسیدشدن موضعی فلز در اثر دماهای بالای گاز) تخلیه شود.

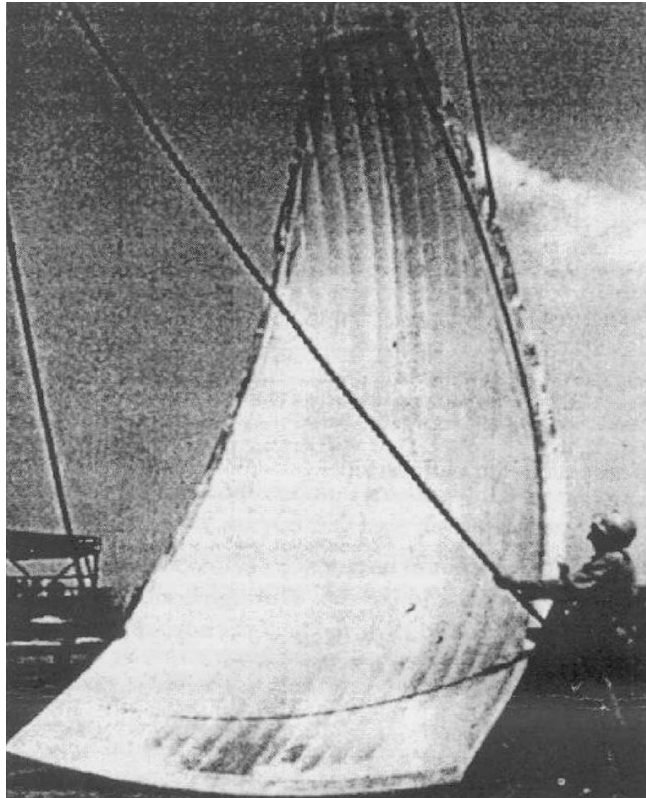
معمولاً قالب و خرج انفجاری برای فرآیند شکل‌دهی درون یک مخزن آب قرار می‌گیرند. اگرچه برای قطعات کوچک ساده‌تر آن است که یک کیسه پر از آب را روی قالب قرار داده و خرج انفجاری درون آب را در فاصله توقف مناسب منفجر کرد. در لحظه انفجار، موج ضربه‌ای درون آب تولید شده که در تمامی جهات با سرعتی متناسب با شدت موج ضربه منتشر می‌شود (مقدار این سرعت در فاصله چند سانتیمتری از خرج انفجاری نوعاً برابر ۱۶۰۰ متر بر ثانیه است). هنگامی که موج ضربه به سطح فلز برخورد می‌کند به سمت آب منعکس شده و فلز مومنتومی پیدا کرده و شروع به حرکت به سمت حفره قالب می‌کند. سرعت فلز بستگی به شدت موج ضربه در آب و جرم ورق داشته، ولی عموماً در مرتبه چند ده متر بر ثانیه است. در صورتیکه سرعت موج ضربه خیلی بیشتر باشد فلز عملاً به صورت یک جسم شروع به حرکت می‌کند. از آنجا که آب تنها عمود بر سطح فلز تنش ایجاد می‌کند، فلز نیز تنها در این جهت شتاب می‌گیرد. در اثر قیود ایجاد شده توسط قالب و گیربندی فلز، محیط فلز نمی‌تواند به همراه بقیه ورق حرکت کرده و ورق شروع به خم شدن روی شعاع لبه‌های قالب می‌کند. این حرکت خمشی درون ورق فلزی با سرعتی مشخص حرکت می‌کند.

بسته به مقدار گیربندی، ورق تحت تنش کششی صفحه‌ای قرار گرفته و فلز کشیده می‌شود (که منجر به نازک شدن ورق می‌شود) و یا فلز ورق زیر گیربندی شروع به کشیده شدن می‌کند. معمولاً هر دو واکنش ورق همزمان رخ می‌دهد. همچنان که انرژی جنبشی به تغییر شکل پلاستیک ورق تبدیل می‌شود حرکت فلز آرام‌تر می‌شود. هنگامی که تمامی انرژی جنبشی پیش از آنکه فلز به سطح قالب تماس پیدا کند مصرف شود، فلز شکل‌دهی آزاد پیدا کرده و به مراحل شکل‌دهی (انفجاری) بعدی نیز نیاز پیدا می‌کند. هنگامی که فلزی که در اثر موج ضربه شتاب پیدا کرده به سطح قالب برخورد می‌کند مطابق با شکل قالب تغییر شکل داده و شکل مورد نیاز به دست می‌آید.

شکل‌دهی انفجاری یک فرآیند دسته‌ای برای تولید تعداد کم قطعات پیچیده با شکل‌پذیری دشوار است. شکل‌دهی در بیش از یک مرحله، کاری دشوار و پرهزینه بوده و لذا باعث کاهش ظرفیت تولید می‌شود. اگرچه، در این روش تنها از یک نیمه قالب استفاده شده که باعث کاهش هزینه‌های اولیه تولید می‌شود. با این روش تولید می‌توان قطعات پیچیده با انحنای دوگانه را از ماده با شرایط پیرسختی شده (عملیات حرارتی شده) تولید کرد. به این ترتیب از فرآیندهای عملیات حرارتی و جوشکاری قطعات کوچک متعدد پس از شکل‌دهی اجتناب شده و قطعاتی با کیفیت بالاتر و کم هزینه‌تر تولید می‌شود.

۱-۶- سابقه کاربرد شکل‌دهی انفجاری

نخستین بار انگیزه اصلی شکل‌دهی انفجاری در صنعت هوافضا آشکار شد. در ۱۹۶۰ دست کم ۸۰ پروژه صنعتی با حمایت دولتها به طور همزمان آغاز شد. این روند در مورد کاربردهای تجاری نیز به همین شکل بوده است. برای مثال، داریل جی میتون شرکتی در زمینه ماشینکاری شیمیایی و شکل‌دهی انفجاری تاسیس نمود که در ۱۹۶۸ نیز فروخته شد. در زمان فعالیت این شرکت پروژه‌هایی با همکاری ناسا برای تولید راکت‌های فضایی مرکوری، جمنی و آپولو انجام شد. این شرکت همچنین گنبد‌هایی به قطر ۱۰ متر برای موتور بولستر مرحله اول ساترن تولید کرد و برای برنامه‌های موشک‌های بالستیک ایالات متحده نیز فعالیت نمود. این فعالیت منجر به تولید منظم قطعات قطاع مثلثی از جنس آلومینیوم ۲۰۱۴ به روش شکل‌دهی انفجاری در مرکز فضانوردی آمریکای شمالی گردید (شکل ۱۱). در پروژه آیرجت، گنبد‌هایی به قطر ۱,۳۷ متر با ضخامت ۳,۱۷۵ میلیمتر از فولاد پراستحکام **AMS 6434** به روش انفجاری شکل داده شد. موارد دیگری از کاربردهای موفق در مقیاس بزرگ نیز انجام شد که عبارتند از شکل‌دهی انفجاری گنبد‌هایی با قطر ۱۰ فوت (۳,۰۵ متر) و گنبد‌هایی به قطر ۵ فوت (۱,۵۲ متر) از جنس آلومینیوم ۲۰۱۴ برای پروژه ارتقای توان موشکی نیروی هوایی آمریکا.



شکل ۱۱ قطعه قطعی مثلی از آلومینیوم **2014-O** برای دماغه قطر ۱۰ متر موشک ساترن، ساخته شده توسط شرکت راکول آمریکای شمالی.

در گزارش تحقیقاتی سازمان پروژه‌های پژوهشی-دفاعی پیشرفته ایالات متحده (**DARPA**) شکل‌دهی انفجاری به عنوان پروژه اواسط دهه ۶۰ این سازمان ثبت شده است. علت اطلاق عنوان «پروژه» به آن به دلیل توسعه یک فرآیند باصرفه برای شکل‌دهی گونه‌های متنوعی از آلیاژهای فلزی است. دستاورد این پروژه نیز ایجاد توانمندی بالا برای تولید سازه‌های بزرگ فلزی با تولرانسهای بسته بوده است. از فرآیند شکل‌دهی انفجاری به نحو گسترده‌ای در پروژه‌های وزارت دفاع ایالات متحده به کار گرفته شد. پروژه‌های مربوطه عبارت بودند از: تولید حلقه‌های پشت مشعل در موشک **SR-71**، شعله پخش کن موتور جت برای موشک روهر، دریچه‌های ورودی موشک تیتان، آب بندهای موتور راکت، پوسته‌های هواپیمای اورین **P-3**، گنبدهای موشکها، صداگیر موتور جت و سپرهای حرارتی برای توربین موتورها.

علاوه بر کارهایی که در ایالات متحده انجام شده، یکسری فعالیتها نیز در انگلستان در دانشگاه‌های کوئینز و منچستر انجام شده است. به نظر می‌رسد نتیجه کار پژوهشی در موسسه علوم و فناوری دانشگاه منچستر، تشکیل شرکت انرژتیک شمالی بوده است. این شرکت که تا به امروز نیز فعالیت دارد، جدول ۳، ابراز می‌کند که امکانات مجیزی برای آزمونهای انفجاری و انجام فرآیندهای

شکل دهی و برش انفجاری را در اختیار دارد. همچنین به نظر می‌رسد که کارهایی وسیعی نیز در این زمینه در کشورهای چین و اوکراین انجام شده و می‌شود.

درباره اینکه چرا تعداد مقالات و انتشارات مربوط به شکل دهی انفجاری پس از ۱۹۷۲ دچار افت شده (شکل ۱)، گرونولد از شرکت اکسپلوform چند دلیل را بیان کرده است. سال ۱۹۷۲ به نظر می‌رسد سالی است که پوشش دهی انفجاری کشف شده یا دست کم به عنوان یک فرآیند تجاری مورد استفاده قرار گرفته است. در آن زمان فرآیند پوشش دهی، آینده تجاری و سهولت فنی بیشتری نسبت به شکل دهی انفجاری داشت. هنگامی که موسسات و شرکتها علیرغم تفاوت زیادی که داشت، تصمیم گرفتند که فعالیتهای خود را بر روی پوشش دهی متمرکز کنند، دو سوم از ظرفیت شکل دهی انفجاری ایالات متحده آمریکا کاسته شد. در همان زمان فناوریهای غیرمتداول دیگری مانند پرسکاری با لاستیک، اتساع و شکل دهی سوپرپلاستیک نیز به وجود آمد. برخلاف پیچیدگیها و مشکلات مربوط به مواد منفجره که به کار عملی دشوار و نیروی کار ماهر و آموزش دیده نیاز داشت، این روشها به عنوان جایگزین مناسب، می‌توانستند در یک کارگاه معمولی نیز اجرا شوند. گرونولد همچنین بیان می‌کند که بسیاری از شرکتهایی که شکل دهی انفجاری انجام می‌دادند نیز اغلب از این فرآیند تنها برای تولید قطعات خود استفاده کرده و عملاً فرآیند در طراحی مجدد محصول حذف شد.

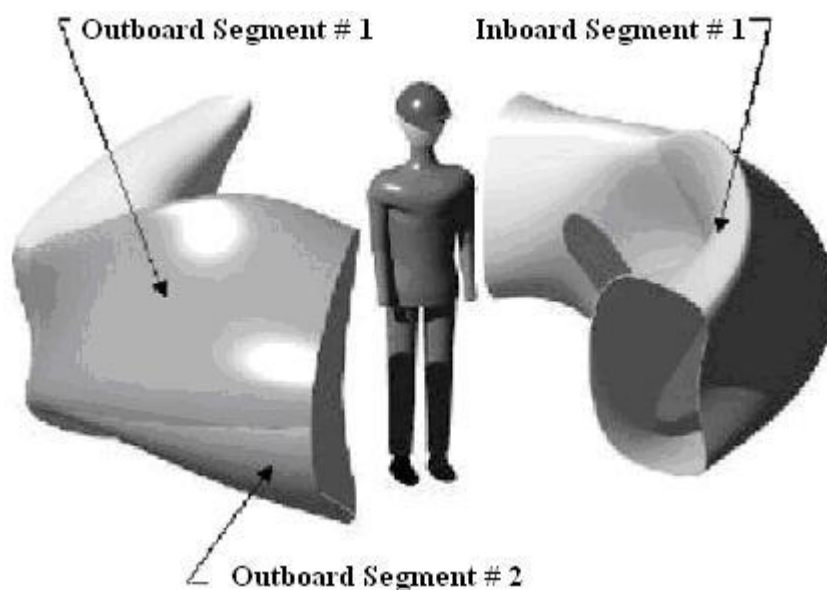
جدول ۳ موسساتی که به صورت تجاری در زمینه فرآیند شکل دهی انفجاری فعالیت می‌کنند.

موسسه	فعالیت	آدرس و مشخصات
شرکت میلر	شکل دهی الکتروهایدرولیک، تولید کننده قطعات نازک از ورق و لوله (نمونه قطعات آن در شکل ۴ آورده شده است)	2065 S. Burleson Blvd., Burleson, Texas 76028, USA, sales@miller-company.com
اکسپلوform	تولید کننده محدوده وسیعی از قطعات شامل: قطعات زین اسبی شکل و حلقوی	P.O. Box 45, NL 2280 AA Rijswijk, The Netherlands, Tel.: +31-15-284-36-64, fax: +31-15-284-39-50, email: exploform@exploform.com
آزمایشگاه تی ان او پرینس ماوریت	تولید کننده محدوده وسیعی از قطعات شامل: قطعههای آنتهای سهومی، بدنه راکت، قطعات تبلیغاتی با انحنای دوگانه	P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands, Tel.: +31-15-2843695, fax: +31-15-2843954, e-mail: wentzel@pml.tno.nl
صنایع فنی نورث وست	تولید کننده قطعات صنایع مهمی چون هوافضا و پزشکی	2249 Diamond Point Road, Sequim, Washington 98382, USA, e-mail: nwtech@nwtech.com

Beijing Explosive Forming Factory, Beijing, P.O. Box 142-80, Beijing 100854, PR China	مخازن کروی و نیم کروی تک لایه و دولایه (قطر ۳۰۰ الی ۴۰۰۰ میلیمتر با کاربردهای مخازن شیمیایی و کشاورزی)	کارخانه شکل دهی انفجاری بیجینگ
Department of Materials Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Hohhot 010062, PR China	شکل دهی انفجاری بدون قالب مخازن کروی (شکل دهی انفجاری رینگهای شیاردار با قالب)	دانشگاه پلی تکنیک اینر مانگولیا
National Aerospace University in Kharkov, Ukraine	قابلیتهای چشمگیر، توانایی تولید قطعات سیستم ستاره وار	دانشگاه ملی هوافضا در خارکف
Kharkov Institute for Physics and Technology, Kharkov, Ukraine	قابلیتهای چشمگیر، توانایی تولید قطعات سیستم ستاره وار	موسسه فیزیک و فناوری خارکف
Ukrainian Kharkov University, Ukraine	قطعات هواپیما: قاب پنجره آلومینیومی، محفظه های توربین، قطعات بال که در دماهای بالا کار می کنند	دانشگاه اوکراین خارکف
551 Aspen Ridge Drive, Lafayette, CO 80026, USA, www.dynamicmaterials.com, e-mail: boom@dynamicmaterials.com	متخصص در تولید قطعاتی که به دلایلی چون بزرگی، شکل و غیره با روشهای متداول قابل تولید نیستند	شرکت دینامیک متریالز
Reverse Engineering Limited, Armstrong House, Brancaster Road, Manchester M1 7ED, UK, Tel.: +44-0161-2883210, fax: +44-0161-2883211	قابلیت انجام فرایندها و شکل دهی انفجاری	شرکت مهندسی معکوس
Shock Wave and Condensed Matter Research Centre, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto 860-8555, Japan	شکل دهی انفجاری بدون قالب مخازن کروی، متراکم کردن مواد پیشرفته به وسیله شوک	پژوهشگاه موج ضربه و مواد متراکم
The North of Building 9204-4, Oak Ridge Nuclear Facilities, US Department of Energy, USA	تولید اجزای بزرگ راکتورها	تجهیزات هسته ای آوک ریج

لاوریون از صنایع فنی نورث وست، اظهار می‌کند که کاهش تعداد مقالات و انتشارات درباره شکل‌دهی انفجاری هنگامی ایجاد شد که دو شرکت نخست مطرح در شکل‌دهی انفجاری در آمریکا شروع به ارائه خدمات تولیدی دیگری نیز نمودند. این مساله با افزایش فرآیندهای تجاری که پیشتر مطرح شد همراه شد. تصور می‌شود که یکی از این دو شرکت قابلیت انجام شکل‌دهی انفجاری را تا سال ۱۹۹۸ از دست داده است. البته به مدت بیش از ۳۰ سال این باور وجود داشت که شرکتها حجم زیادی از پژوهشها را به صورت محرمانه انجام می‌داده‌اند. نگارنده بر این باور است که همین روند در همه جا به جز شاید در چین و شوروی سابق برقرار بوده است. در دهه هفتاد، آزمایشگاه پرنس ماوریت **TNO** در هلند، در زمینه شکل‌دهی انفجاری شروع به کار نمود. اگرچه، تا سال ۱۹۹۲ که آنها پروژه‌ای تحقیقاتی با شش شرکت هلندی تعریف کردند، عملاً پژوهشی انجام نشده بود. نتیجه حاصل از این پروژه که در فاصله ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ انجام شد، این بود که شکل‌دهی انفجاری یک فناوری مناسب برای قطعات با تعداد کم، شکلهای پیچیده و جنسهای صعب‌التولید است. کارشناسان **TNO** مقاله‌ای که دربرگیرنده بخشی از پروژه بود منتشر کردند. در این مقاله نشان داده شده که شکل‌دهی انفجاری رقیبی برای شکل‌دهی سوپرپلاستیک و شکل‌دهی اتساع است. در این مقاله تاکید شده که اوکراین تجربه قابل توجهی در این زمینه دارد. برای آنکه بتوان شکل‌دهی انفجاری را به عنوان یک روش تولیدی تجاری ارائه کرد، موسسه **TNO** و دیگران شرکت جدید اکسپلوفر را تاسیس کردند.

حتی پیش از آغاز به کار شرکت اکسپلوفر، دیگران نیز به طور فعال از شکل‌دهی انفجاری استفاده می‌کردند. در ۱۹۸۱ یک سازنده خودرو در آلمان غربی سابق شروع به تولید محفظه محور عقب خودرو به روش شکل‌دهی انفجاری نمود. گزارشهای ارائه شده حاکی از کاهش ۵۰ درصدی هزینه‌ها و صرفه جویی ۱۰ درصدی مواد نسبت به دیگر روشهای متداول است.



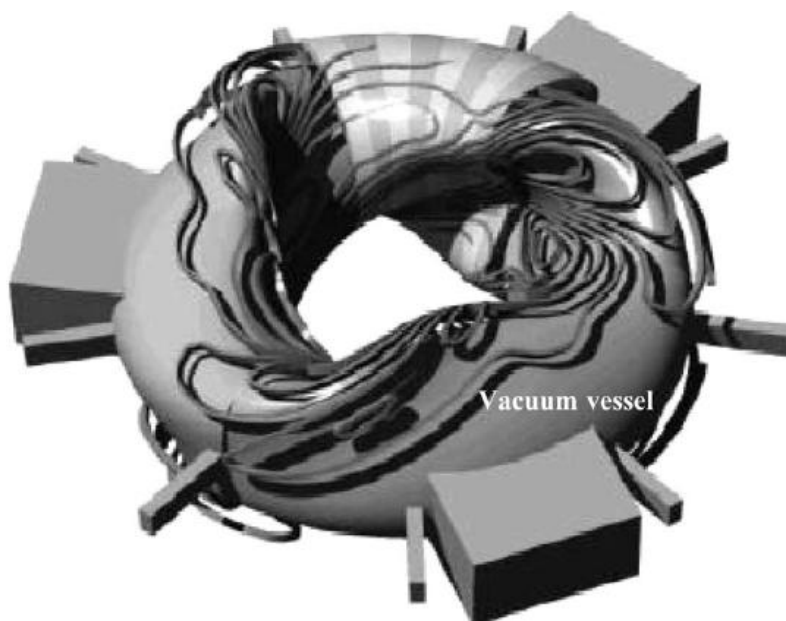
شکل ۱۲ شمایی از مخزن خلا.

در چند سال اخیر، جامعه پژوهشی فزونیون (همجوشی هسته ای) در حال آماده سازی مقدمات لازم برای ساخت یک سری ستاره وار (استلوراتور) است. پژوهشگران این مرکز یکسری تحلیلهایی بر روی مواد و تکنیکهای تولید برای ساخت مخازن خلا انجام داده‌اند. شکل ۱۲ شمایی از هندسه مقاطعی که مخازن خلا را تشکیل می‌دهند نشان می‌دهد. در ۱۹۹۸، آزمایشگاه ملی آوک ریج استفاده از فولاد ضدزنگ 316L یا آلیاژ Inconel 625 (شکل ۱۳) با روشهای تولیدی چون شکل‌دهی انفجاری یا ریخته گری را بررسی کرد. در سال ۲۰۰۰، آزمایشگاه ملی لاورنس برکلی تصمیم به شکل‌دهی مخزن خلا ستاره وار HSX به روش انفجاری گرفت که بخشی از آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در آوریل ۲۰۰۱ آزمایشگاه فیزیک پلاسمای پرینستون نیز تصمیم گرفت که مخزن خلا ستاره وار NCSX را به همین روش تولید کند. در بخشی از گزارش این پروژه آمده است که:

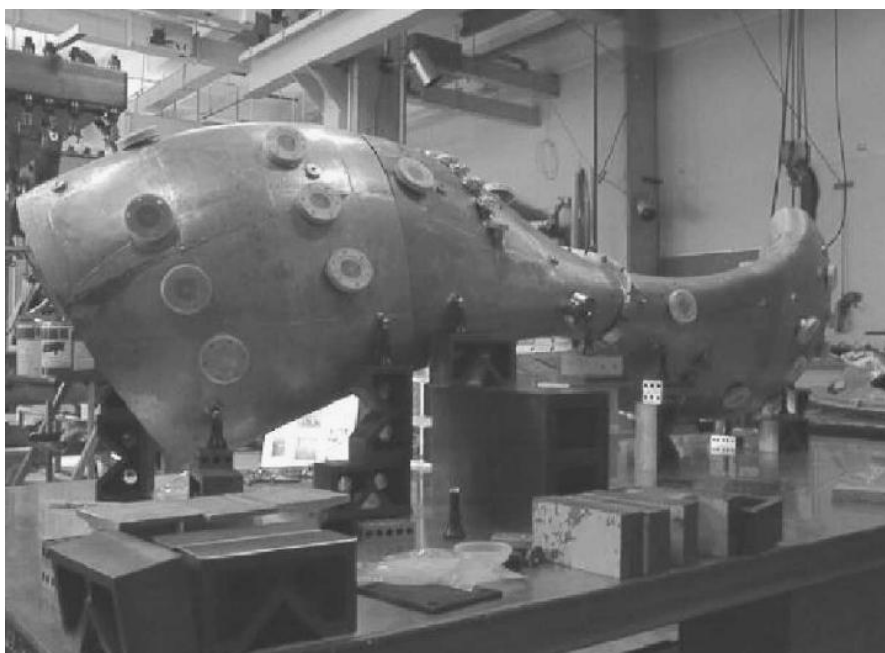
ساخت مخزن خلا با شکل پیچیده یکی از چالشهای فنی پیش روی NCSX است. مطالعه‌ای بر روی شکل‌دهی مخزن خلا اخیراً توسط الکساندر گرگیفسکی و گروهی از مهندسين و متخصصين از دانشگاه هوافضای ملی خارکف و موسسه فیزیک و فناوری خارکف (اوکراین) انجام شده است. این پژوهش استفاده از شکل‌دهی انفجاری را به عنوان روش ارجح برای شکل دادن مخزن خلا توصیه می‌کند. دو موسسه مذکور تجربیات وسیعی در زمینه شکل‌دهی انفجاری دارند. در این زمینه آنها هشت مورد ثبت اختراع داشته و کاربردهای موفق متعددی مانند پوسته مارپیچ ستاره وار اوراگان-۳ ارایه کرده‌اند. در شکل‌دهی انفجاری، پدیده برگشت فتری تا حدود زیادی حذف می‌شود. اعوجاجهای ناشی از جوشکاری با شکل دادن انفجاری قطعه جوشکاری شده به هندسه قالب

برطرف می‌شود. علاوه بر کاربردهای فوق الذکر گونه‌های دیگری از شکل‌های تولید شده به شرح زیر است:

- شکل‌های گنبدی (شکل ۱۵)؛
- پانل‌های آویزه دار؛
- آنتن‌های سهموی بزرگ کم عمق؛
- محفظه‌های بزرگ کم عمق؛
- دریچه‌های مخازن؛
- دریوش‌های تجهیزات؛
- محفظه‌های توربین‌ها، ساخته شده از فولاد مقاوم به حرارت به ضخامت ۱,۵ میلیمتر و قطر ۵۴۰ میلیمتر؛
- بدنه موتور توربوجت از آلیاژ **Ti-5Al2.5Sn** که از شکل‌های اولیه مخروطی تولید شده اند؛
- قطعات مخروط خروجی از ورق **Inconel 718**.



شکل ۱۳ شمایی از مخزن خلا آوک ریدج.



شکل ۱۴ قسمت مخزن خلاء HSX

شکل ۱۶ یک قطعه بزرگ استوانه‌ای از آلیاژ آلومینیوم 5052-H32 که مانیفولدهای اکسیژن مایع برای موتور بوستر یک موشک بزرگ را نشان می‌دهد که با یکسری از انفجارها شکل داده می‌شود. انفجار نخست ابعاد دایره‌ای قطعه را بهبود می‌دهد. پس از آن کیسه‌های کوچکتري با آب پر شده و خرجهای کوچکی درون آنها قرار می‌گیرد تا به سوراخهایی که به روشهای متداول ایجاد شده لبه بدهد.

مخازن کروی با قطرهایی در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰۰ میلیمتر با استفاده از شکل‌دهی انفجاری بدون قالب تولید شده‌اند. کاربردهای آن نیز عبارتند از مخازن نگهداری مواد شیمیایی، تزئینات معماری، گنبد‌های نیم-کروی و مخازن دوجداره برای نگهداری مواد خطرناک و سمی (شکل ۱۷). اگرچه شکل‌دهی انفجاری غالباً برای تولید قطعات بزرگ به کار می‌روند، اما امکان بهره‌گیری از آن برای ساخت قطعات کوچک مانند تولید پایه‌های دندانهای مصنوعی از جنس فولاد ضدزنگ و کاشتهای فلزی مربوط به دندانپزشکی و جراحیهای ارتوپدی وجود دارد.



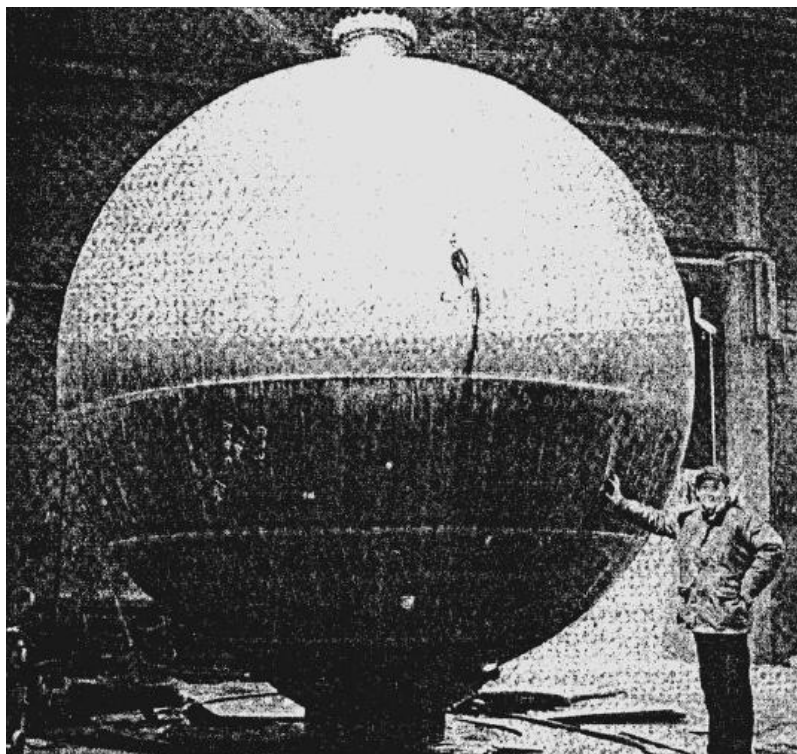
شکل ۱۵ قطعات گنبدی شکل، ساخت شرکت دینامیک متریالز (جدول ۳)



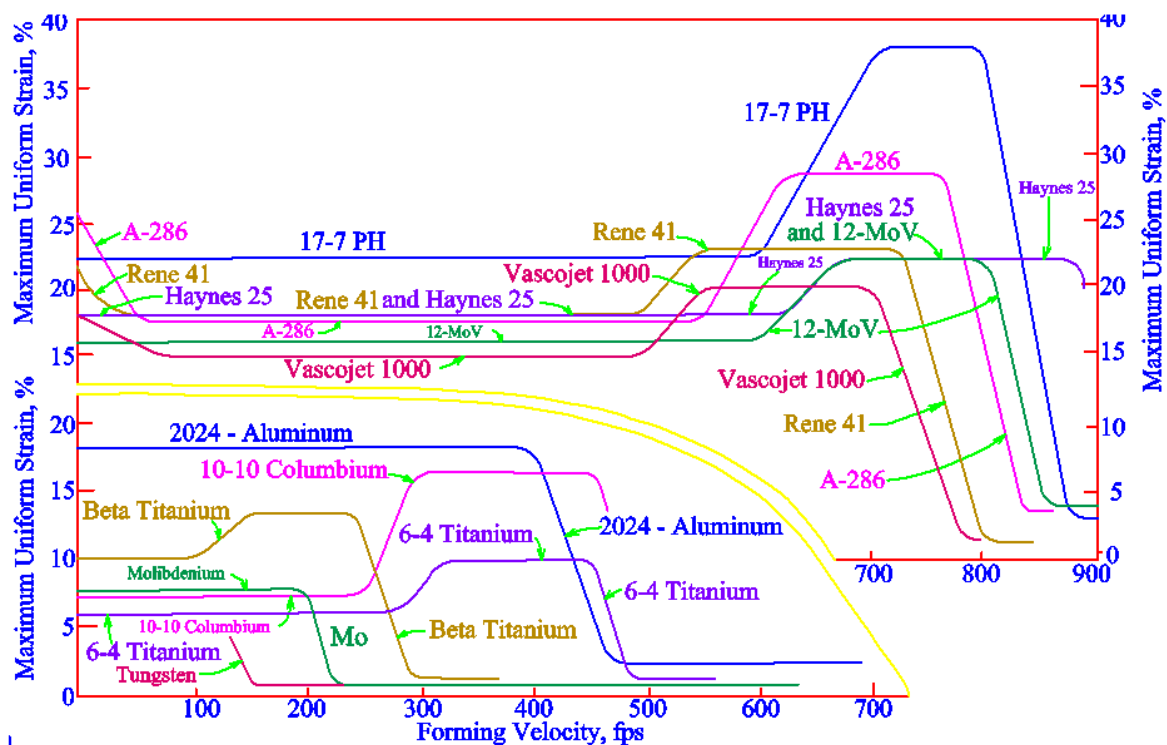
شکل ۱۶ قطعه استوانه‌ای از آلیاژ آلومینیوم 5052 H32 که به روش انفجاری لبه‌دار شده است.

به طور کلی بر اساس مقالاتی که نگارنده مطالعه کرده و گزارشهای شرکت دینامیک متریالز، جدول ۳، تمامی فلزات را می‌توان به نحو موفقیت‌آمیزی به روش انفجاری شکل داد. البته یکی از دلایل گرایش مجدد صنایع به استفاده از شکل‌دهی انفجاری، کاربرد فزاینده مواد صعب‌التولید است، چرا که نرخ کرنشهای بالایی که در شکل‌دهی انفجاری ایجاد می‌شود می‌تواند شکل‌پذیری برخی از مواد را بهبود بخشد. این تاثیر را می‌توان در شکل ۱۸ که در آن کرنش یکنواخت برای یکسری از سرعت‌های شکل‌دهی ترسیم شده و در شکل ۱۹ که شاخصی از شکل‌پذیری نسبی را تحت شرایط انفجاری برای تعدادی از فلزات بیان می‌کند، مشاهده نمود.

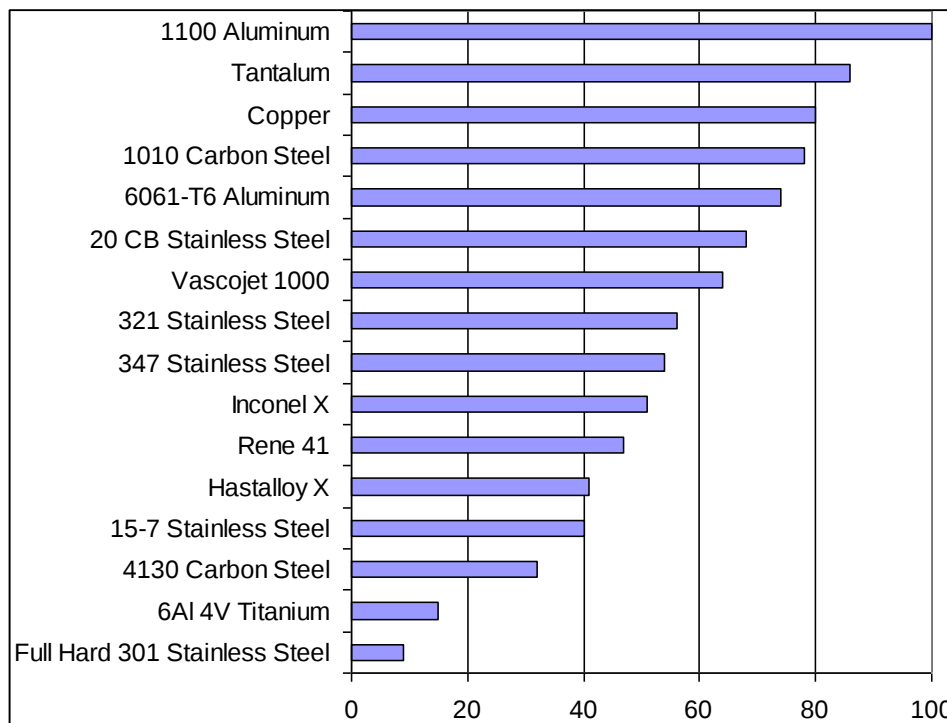
آنچه که از بررسی اطلاعات موجود به دست می‌آید آن است که اگرچه شکل‌دهی انفجاری به دلایلی پس از ۱۹۷۲ دچار افول شد اما همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ۳ فهرستی از شرکتها و موسساتی صاحب نام در زمینه شکل‌دهی انفجاری تجاری آورده شده است. در این بخش نمونه‌هایی از نوع قطعات قابل تولید به روش شکل‌دهی انفجاری بررسی شد، در فصل بعد، تجهیزات این فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۷ مخزن کروی تولید شده به روش شکل‌دهی انفجاری بدون قالب.



شکل ۱۸ تاثیر سرعت شکل دهی بر بیشینه کرنش یکنواخت (ده فوت بر ثانیه **fps** برابر است با 3.05 متر بر ثانیه).



شکل ۱۹ شکل پذیری نسبی فلزات با شکل دهی انفجاری

۱-۷- جمع‌بندی

در تلاش برای مروری بر موضوع شکل‌دهی انفجاری، نگارنده دریافته که کِهولت این فرآیند تاحدی کسب اطلاعات درباره آن را دشوار کرده است. می‌توان مشاهده کرد که افرادی که در فعالیتهای پژوهشی آن در دهه ۱۹۶۰-۱۹۷۰ فعالیت داشته‌اند اکنون بازنشست شده یا در جایگاه مدیریت ارشد قرار گرفته‌اند. طبعاً، پژوهشگران نمی‌توانند از تجربه دیگران در این زمینه بهره‌گیرند، مگر آنکه از مستندات محدود موجود استفاده کنند. نتیجتاً نگارنده بر این باور است که باید اطلاعات بیشتری در سطح جهانی در این زمینه موجود باشد تا بتوان تصویر کاملتری از آن به دست آورد، اما این اطلاعات یا هرگز منتشر نشده و یا اینکه هم اکنون قابل دسترس نیست.

البته از اطلاعات ارایه شده در این فصل این چنین بر می‌آید که شکل‌دهی انفجاری فرآیندی انعطاف‌پذیر بوده که از هزینه سرمایه‌گذاری پایین و توانایی کاربردی بالایی برخوردار است. قابلیت تغییر توزیع و شدت فشار و انرژی در محدوده‌ای وسیع، توانمندی بالاتری نسبت به روشهای شکل‌دهی متعارف ایجاد کرده است. مزیت دیگری که در تمامی روشهای شکل‌دهی سریع مشترک است افزایش شکل‌پذیری است که در سرعتهای خاصی از تغییر شکل حاصل می‌شود. این فرآیند معایبی از قبیل نیاز به دانش فنی لازم برای متخصص فرآیند و محدودیتهای کار با مواد منفجره است. تصور می‌شود که شکل‌دهی انفجاری توانمندی کاربردهای آینده صنایع اتمی و هوافضا را داشته باشد.

فصل دوم

فرآیند شکل دهی انفجاری و ملزومات
آن

شکل دهی انفجاری امکان تولید قطعات بزرگ و شکل را فراهم کرده و نیز نیاز به هزینه کردن برای ماشین ابزارها و قالبهای گرانبه و زمانبر را حذف می کند. به این ترتیب طی یک دهه، شکل دهی انفجاری رشد سریعی پیدا کرد. با افول فعالیتهای مرتبط با هوافضا، کاربرد این روش نیز در سالهای اخیر کاهش یافته است، به گونه ای که تعداد اندکی از شرکتها و موسسات نظامی از این روش به عنوان یک فرآیند متداول تولیدی بهره می گیرند.

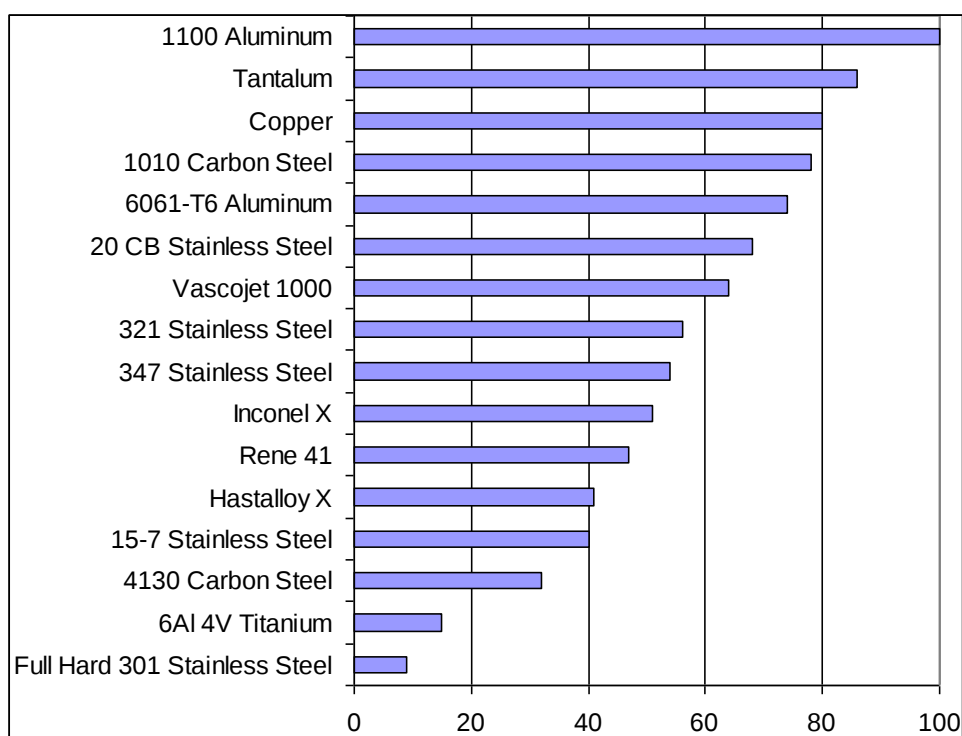
این فصل به بررسی جنبه های عملی و متداول شکل دهی انفجاری پرداخته و تواناییهای آن را بیان می کند.

۱. شکل پذیری آلیاژهای مهندسی

مطالعات نشان داده که عوامل اصلی موثر در شکل دهیهای مکانیکی و انفجاری (شامل انعطاف پذیری **(Ductility)** و چقرمگی **(Toughness)**) یکسان اند. تغییر شکل ورق هنگام شکل دهی انفجاری نباید از تغییر طول نسبی که از آزمون کشش تک محوری به دست می آید فراتر رود، در غیر این صورت ورق پاره خواهد شد. به دلیل تنشهای چند محوره ای که ممکن است در طی فرآیند شکل دهی انفجاری ایجاد شوند، داده های آزمایش کشش تک محوری تنها به عنوان یک داده نسبی می تواند به کار رود. این مقدار هنگامی که با تجربه، طراحی قالب و روش شکل دهی ترکیب شود معیاری برای مقایسه شکل پذیری به دست می دهد. نمونه ای از مقایسه مواد، با مبنا قرار دادن آلومینیوم ۱۱۰۰ آنیل شده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

تجهیزات و عملیات شکل دهی انفجاری

اجزای اصلی فرآیند شکل دهی انفجاری عبارتند از ماده منفجره، قالب، محیط ناقل انرژی و میدان کار. آرایش این اجزا را می توان بسته به هندسه قطعه و تعداد مورد نیاز به روشهای گوناگونی ایجاد نمود. در اینجا آرایشهای مورد استفاده برای قطعات لوله ای و ورقها و عناصر اصلی فرآیند مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱۳ شکل پذیری نسبی برخی از فلزات.

۳.۱. مواد منفجره

ماده منفجره به ماده‌ای اطلاق می‌شود که بتواند حجم پرفشاری از گاز را به طور ناگهانی تولید کند. پرکاربردترین نوع مواد منفجره در شکل‌دهی انفجاری، خرجهای انفجاری شیمیایی بوده که بسته به سرعت واکنش شیمیایی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. مواد منفجره ضعیف یا سوزشی و مواد منفجره قوی یا شدیدالانفجار. مواد منفجره ضعیف مانند باروت یا کوردیت عمده‌تاً به عنوان پیش‌رانه در گلوله‌ها یا راکتها به کار می‌رود و فشارهایی در مرتبه **0.28** گیگاپاسکال را برای مدت نسبتاً طولانی ایجاد می‌کند. مواد منفجره ضعیف کاربرد چندانی در شکل‌دهی انفجاری ندارند.

مواد منفجره قوی به دو نوع اولیه و ثانویه دسته‌بندی می‌شوند. در چاشنی‌ها از مقادیر اندکی مواد منفجره اولیه، که بسیار حساس بوده و به سادگی منفجر می‌شوند، استفاده می‌شود. مواد منفجره ثانویه انرژی بسیار بیشتری نسبت به مواد منفجره اولیه دارند ولی از حساسیت بسیار کمتری برخوردار بوده و تنها با شوک ناگهانی و قوی (مانند شوک ناشی از انفجار چاشنی) می‌توانند منفجر شوند.

در شکل‌دهی فلزات به روش انفجاری صرفاً از مواد منفجره ثانویه مانند دینامیت، **PETN** (پنتااریتریتول تترانیترات، **C₅H₈N₁₂O₄**)، تی ان تی (تری نیتروتولون، **C₇H₅N₃O₆**) و **RDX** (سیکلوتری متیلن-تری نیترامین، **C₃H₆N₆O₆**) استفاده می‌شود. این مواد پالس فشار نسبتاً کوتاه مدت و پرفشاری در مرتبه **13.8-27.6 GPa** تولید می‌کنند. پریماکورد و مواد منفجره صفحه‌ای کاربرد گسترده‌ای در شکل‌دهی دارند چرا که کار کردن با آنها ساده بوده و می‌توان با چاقو

آنها را به هر اندازه‌ای برید. البته برای کاربردهای شکل‌دهی بزرگ که به بیش از ۱۰ کیلوگرم ماده منفجره نیاز باشد از مواد منفجره پرس شده یا ریخته‌گری شده استفاده می‌شود، چرا که به راحتی می‌توان آنها را به وزن و ابعاد مورد نظر رساند. فرآوری دقیق ماده منفجره بیشتر در آزمونهای سعی و خطا در شکل‌دهی نمونه‌های کوچک شده کاربرد دارد.

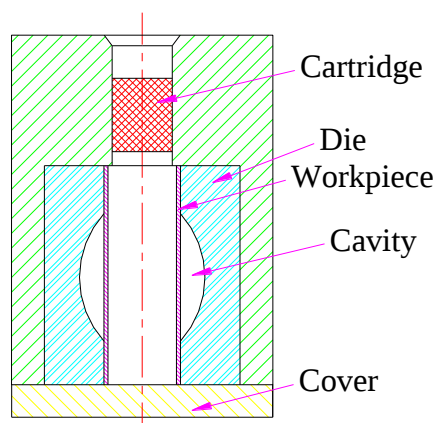
مقایسه ساده میان مواد منفجره ضعیف، قوی و یک پرس معمولی این نتایج را به دست می‌دهد: یک کیلوگرم ماده منفجره قوی معادل ۵ کیلوگرم ماده منفجره ضعیف انرژی آزاد می‌کند؛ و یک کیلوگرم خرج منفجره قوی انرژی موثری برابر با یک پرس **5 MN** آزاد می‌کند [۱۱]. عموماً، خرجهای شیمیایی در نزدیکی خط مرکز یک قطعه لوله‌ای یا در فاصله‌ای از ورق قرار می‌گیرد. در شکل‌دهی قطعات بزرگ، می‌توان تعدادی از خرجها را به نحو مناسبی توزیع کرد. نوعاً، هدف آن است که تغییر شکل مورد نظر با حداقل تعداد عملیات و با استفاده از بیشترین وزن مجاز خرج انجام شود. البته، با توجه به روند شکل‌دهی توصیف شده برای ستاره وار **NCSX**، از عملیتهای مکرر می‌توان به نحو سودمندی بهره گرفت.

در انفجار توده‌ای از خرج شدیدالانفجار ثانویه، موج انفجار از نقطه آغازش درون خرج حرکت کرده و به طور ناگهانی آن را به انبوهی از گاز با فشار در مرتبه ۲۰ تا ۳۰ گیگاپاسکال در مجاورت خرج تبدیل می‌کند. واکنش انفجار مقادیر زیادی گرما نیز تولید می‌کند. انبساط این حباب گاز بسیار فشرده و با دمای بالا، انرژی شکل‌دهی انفجاری را تامین می‌کند. به طور بسیار تقریبی و غیر دقیق می‌توان گفت که حجم گازی که در اثر انفجار یک خرج آزاد می‌شود برابر با ۱۰۰۰ سانتیمتر مکعب به ازای هر گرم خرج است.

۲.۲. آرایشهای تجربی برای شکل‌دهی قطعات استوانه ای

شکل‌دهی انفجاری لوله‌ها غالباً در آرایش قالب بسته با قالب دو تکه انجام می‌شود، شکل ۱۴. در این آرایش بسته، خرج کاملاً در قالب محبوس شده و قطعه بین ماتریس و خرج قرار می‌گیرد. موقعیت خرج در شکل‌دهی لوله بسیار مهم بوده و معمولاً در راستای محور مرکزی لوله قرار می‌گیرد. بین قطعه و سطح قالب خلاء ایجاد می‌شود تا هوا در هنگام فرآیند گیر نیافتد. گیر کردن هوا یا روانکار در برابر حرکت قطعه مقاومت ایجاد کرده و هنگام فشرده شدن ممکن است ترکیده و به قطعه و قالب آسیب برساند. در شرایط شکل‌دهی انفجاری معمولی، حفره قالب در اثر خوردگی ناشی از گاز به تدریج تخریب می‌شود. خرده‌های ناشی از آن ممکن است بر روی کیفیت سطح قطعه تاثیر بگذارد. در شرایطی هم ممکن است شکست قالب که خطرناک نیز است رخ دهد.

گزارش شده که هزینه‌های قالب برای شکل‌دهی قطعات لوله‌ای با قطر بیش از ۵۰ میلیمتر غیر اقتصادی می‌شود [۹]. با وجود این، نمونه‌های متعددی از کاربردهای تولیدی و فرآیندهای پیچیده گزارش شده است. در ۱۹۷۳ گزارش شده که از قالبهای دو تکه از جنس فولاد ابزار برای تولید انبوه اندام مصنوعی به کار گرفته شده است [۲۳]. در پروژه مذکور، قطعات اندام مصنوعی با دقت بالا و کیفیت سطح مناسب از پیش-فرمهای لوله‌ای از آلیاژ آلومینیومی چرخکاری شده تولید شده‌اند.



شکل ۱۴ قالب شکل‌دهی بسته.

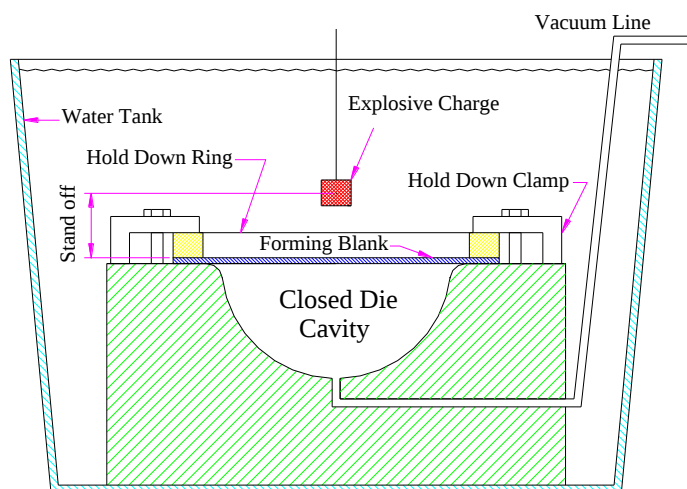
از قالبهای تک مرحله‌ای برای تولید قطعات فنجان‌ی شکل از لوله‌ها با نرخ ۲۴ تا ۳۶ عدد در ساعت استفاده شده است. البته، همانند تمامی فرآیندهای شکل‌دهی، پارامترهای فرآیند از قبیل طراحی پیش‌فرم و قالب، انتخاب خرج و آرایش فرآیند مهم و تاثیرگذار است [۲۳]. شکل‌دهی انفجاری لوله‌ها نوعاً شکل دادن هر نوع پروفیل نهایی مورد نظر را به صورت یک تکه امکان پذیر می‌کند. حذف یا کاهش نیاز برای اتصال، امکان استفاده مطمئن‌تر از قطعات در بسیاری از محیطهای خورنده را فراهم می‌کند.

با مقایسه شکل‌دهی انفجاری لوله با هیدروفرمینگ [۲۴] شباهتهای قابل توجهی از قبیل کاهش تعداد اتصالات در قطعات پیچیده و قابلیت هر دو برای انجام فرآیندهای شکل‌دهی و پانچ در یک مرحله به دست می‌آید. نمونه‌ای از آن شکل‌دهی انفجاری یک لوله از جنس فولاد ضدزنگ [۲۲] به قطر داخلی ۱۳۰ میلیمتر و ضخامت جداره ۱ میلیمتر و طول ۲,۳ متر است که اندازه شدن، شکل‌دهی و پانچ شدن آن در یک مرحله انجام می‌شود. شکل نهایی لوله دارای ۲۷ سوراخ لبه‌دار برای موقعیت پرچ، دو سوراخ به قطر ۱۹ و ۲۵ میلیمتر، و یک شیار بیضی به عرض ۱۵,۷ و طول ۵۹,۵ میلیمتر بود. فرآیند در یک قالب دو تکه فرورفته در آب انجام شده و بین قطعه و قالب خلاء ایجاد شد. روشهای به کار رفته برای تولید لوله‌ها به برای استفاده در شکل‌دهی انفجاری مطلبی است که از مقالات به

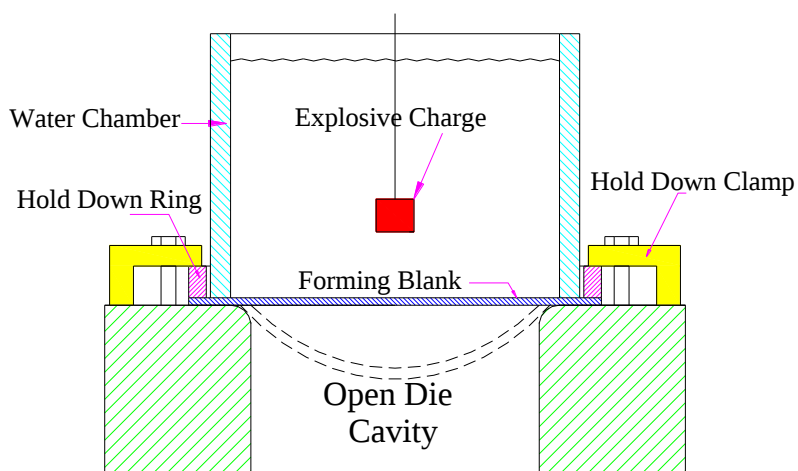
دست نمی‌آید. نکته شگفت‌انگیز آن است که همانند هیدروفرمینگ، تاکید زیادی بر فرآیند تولید لوله که معمولاً اکستروژن یا جوشکاری مقاطع نورد شده است، می‌شود. خواص لوله و کیفیت جوش جزو عوامل مهم در شکل‌پذیری و کیفیت محصول نهایی است.

۲,۳. آرایشهای تجربی قطعات تولید شده از ورق

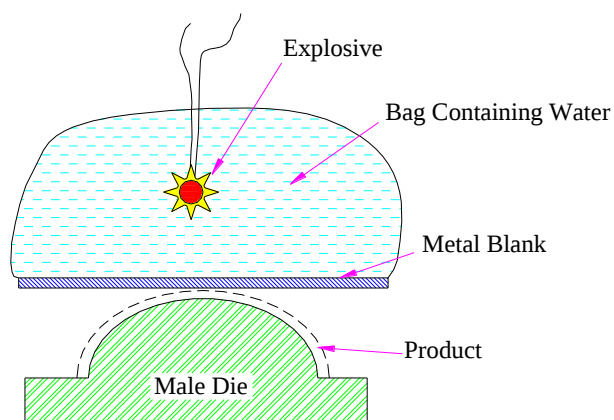
به بیان ساده، شکل‌دهی قطعه از ورق نیازمند آن است که ورق به سمت قالب کشیده شود و عمومی‌ترین آرایش آن عبارت است از یک سیستم قالب باز مطابق با آنچه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. متغیرهای این فرآیند مشابه فرآیند کشش عمیق است. قطعه بر روی قالب گیره‌بندی شده و هوای موجود در حفره ماتریس از طریق سوراخ واقع در پایین‌ترین نقطه کف قالب تا حدود ۳ میلیمتر جیوه تخلیه می‌شود. مجموعه قطعه و قالب درون مخزن آب فرو برده می‌شود. سپس خرج انفجاری در ارتفاع معینی قرار گرفته و منفجر می‌شود. آرایش دیگری غیر از مخزن پر از آب، شکل ۱۶، عبارت است از کیسه پر از آب، شکل ۱۷، که بر روی قطعه قرار می‌گیرد. به این روش، شکل‌دهی انفجاری با فاصله توقف گفته می‌شود که منظور از فاصله توقف، فاصله میان قطعه و خرج است. از آنجا که خرج در تمامی جهات انرژی آزاد می‌کند، تنها بخشی از انرژی آن به سمت قطعه هدایت می‌شود. در شرایط عادی، اگر فاصله خرج تا سطح آب دو برابر فاصله آن از قطعه باشد انرژی کافی تامین می‌شود. قالبهای ماده که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده‌اند کاربرد بیشتری داشته و متداولتراند. قالبهای نر، شکل ۱۷، را نمی‌توان در آب فرو برد و ماده ناقل انرژی را تنها می‌توان روی قطعه قرار داد، چرا که آب زیر فلز در حال تغییر شکل، باعث برگشت ورق از روی یک محیط تقریباً تراکم‌ناپذیر می‌شود. آرایش سوم قالب شکل‌دهی آزاد است، شکل ۱۶، که در آن قطعه درون یک حفره باز شکل داده می‌شود. این فرآیند را هم به دلایلی مشابه آرایش قالب نر نمی‌توان درون آب انجام داد. البته کاربردهایی هم از شکل‌دهی بدون قالب وجود دارد که در آن قطعات ورق که به یکدیگر جوش داده شده‌اند تشکیل یک مخزن را داده و درون آن، ماده ناقل انرژی مانند آب قرار می‌گیرد. سپس خرج در مرکز مخزن قرار گرفته و پس از انفجار باعث شکل‌دهی مخزن می‌شود. از این روش در شکل‌دهی مخازن کروی بسیار بزرگ (شکل ۱۱) استفاده شده است. علاوه بر روش فاصله توقف، از روش تماسی نیز در شکل‌دهی انفجاری بهره گرفته شده است. همانگونه که از نام این فرآیند بر می‌آید، خرج در تماس با قطعه قرار می‌گیرد و پس از انفجار، موج شوک به جای محیط ناقل انرژی، مستقیماً درون خود فلز ایجاد می‌شود.



شکل ۱۵ شمای فرآیند شکل دهی انفجاری با فاصله توقف.



شکل ۱۶ شمای فرآیند شکل دهی انفجاری آزاد با فاصله توقف.



شکل ۱۷ شمای فرآیند شکل دهی انفجاری با فاصله توقف با استفاده از قالب نر.

۲,۴. محیطهای ناقل انرژی و قالبهای شکل دهی

برآورد مقدار انرژی آزاد شده توسط خرج انفجاری به قطعه فلزی موضوع مهمی در طراحی این فرآیند است. برای یک خرج معین با ابعاد مشخص، بازدهی انتقال انرژی تا حد زیادی به آرایش قطعه کار نسبت به خرج و خواص محیط ناقل انرژی بستگی دارد. محیطهای ناقل انرژی مورد استفاده عبارتند از آب (که متداولترین ماده برای این کاربرد است)، هوا، پلاستیسین (که برای تغییر شکلهای موضعی قطعه موثر است) و ژلاتین [۲۵] (که از محدودیتهای کاری فیزیکی می‌کاهد). آب به دلیل آنکه بازدهی انتقال انرژی بسیار بالاتری نسبت به هوا دارد کاربرد بیشتری دارد.

در شکل‌دهی انفجاری ورق، شکل ۱۵، خرج انفجاری زیر آب منفجر شده و حباب گاز پرفشاری تولید می‌شود. در اثر تشکیل حباب گاز، یک موج شوک اولیه در آب مجاور حباب تشکیل می‌شود. این شوک در فاصله کوتاهی از منبع آن حدود ۵۰ درصد از انرژی کل خرج را دربر دارد. حباب گاز منبسط می‌شود تا فشار درون آن به زیر فشار آب اطراف کاهش پیدا کند. در نهایت فرآیند انبساط متوقف شده و حباب شروع به منقبض شدن می‌کند تا به ابعاد کمینه خود برسد. هنگامی که فشار به اندازه کافی افزایش می‌یابد کوچک شدن حباب متوقف می‌گردد. با توجه به اینکه فشار حباب از فشار محیط بیشتر شده مجدداً انبساط حباب انجام می‌شود. در ابتدای انبساط دوم، موج شوک ثانویه‌ای در آب ایجاد می‌شود. موج شوک ثانویه هرگاه که حباب به اندازه کمینه برسد آزاد می‌شود. موج شوک ثانویه تنها بخش کوچکی از کل انرژی را حمل می‌کند و نقش اندکی در فرآیند شکل‌دهی ورق دارد.

موج شوک اولیه در سیال به ورق برخورد کرده و به آن یک سرعت اولیه می‌دهد. حرکت ورق نیز باعث ارسال یک موج ترقیق در آب می‌شود. این امر سبب کاهش فشار در آب مجاورت ورق شده تا آنجا که کاویتاسیون رخ دهد. سرعت ورق در اثر قیود در مرزها (لبه‌ها) کاهش یافته و آب بین حباب گاز و ناحیه کاویته شده به آن اعمال می‌شود. ضربه حاصل به عنوان پدیده بارگذاری مجدد شناخته شده و حتی نسبت به موج شوک اولیه انرژی بیشتری به ورق اعمال می‌کند که این مساله به لحاظ تجربی نیز صحنه‌گذاری شده است. برای آنکه بارگذاری مجدد رخ دهد، ارتفاع آب روی خرج باید بیش از دو برابر فاصله توقف باشد. در غیر این صورت حباب گاز در سطح آب می‌ترکد و فرآیند انتقال انرژی متوقف می‌شود. موج شوک اولیه و بارگذاری مجدد بخش عمده‌ای از کار را در فرآیند شکل‌دهی انجام می‌دهد.

برای فرآیند پیچیده انتقال انرژی از انفجار زیر آب هنوز توصیف ریاضی کاملی ارایه نشده است. روشهای تقریبی برای برآورد انرژی کل اعمال شده به ورق موجود بوده که سه روش متداول آن عبارتند از:

۱. روش هندسی، که اساساً مبتنی بر انرژی مخصوص خرج و آرایش آن نسبت به خرج است. تاثیر محیط ناقل انرژی به طور نسبی با ضریب تجربی بیان می‌شود.

۲. روش انرژی، مبتنی بر فرمول چگالی انرژی تجربی است که از اندازه گیریهای انفجار زیر آب حاصل شده و شامل اثر بارگذاری مجدد است. چگالی انرژی روی مساحت قطعه انتگرال گیری می‌شود. کاربرد این روش محدود به خرجهایی است که ثوابت تجربی انرژی آنها تعیین شده است.

۳. روش ایمپالس، نیز مبتنی بر روابط تجربی به دست آمده از اندازه گیریهای فشارهای شوک ناشی از انفجار زیر آب است و تنها هنگامی می‌تواند به کار رود که محیط ناقل انرژی آب بوده و پدیده بارگذاری مجدد وجود نداشته باشد.

روشهای اول و دوم، برآورد حد بالایی از انرژی منتقل شده به قطعه حاصل از موج شوک اولیه و پدیده بارگذاری مجدد به دست می‌دهد. روش سوم برآورد حد پایینی مبتنی بر روابط تجربی فشار و ایمپالس تجربی داده و انرژی مربوط به فاز بارگذاری مجدد را در نظر نمی‌گیرد.

به عنوان نمونه، فرافشار P ایجاد شده در محیط آب را می‌توان با رابطه زیر به دست آورد [۱]:

$$P = k \left(\frac{w^{2/3}}{R} \right)^a \quad (1)$$

که در آن P فرافشار برحسب k, psi ثابتی است که بستگی به خرج انفجاری داشته و برای خرج TNT برابر با 21600 است، w وزن خرج برحسب پوند، R فاصله خرج از قطعه (فاصله توقف) برحسب فوت و a ثابتی است که عموماً برابر 1.15 در نظر گرفته می‌شود.

عامل مهم در تعیین فرافشار، تراکم پذیری محیط ناقل انرژی و امپدانس آکوستیک آن که حاصل ضرب چگالی در سرعت صوت در آن محیط است می‌باشد. برای تصور بهتر از فشردگی در شرایط شکل دهی می‌توان گفت که سرعت انفجار نوعاً برابر با $22 \times 10^3 \text{ ft/s}$ ($6.8 \times 10^3 \text{ m/s}$) است، حال آنکه سرعت تغییر شکل ورق در مرتبه $100-600 \text{ ft/s}$ ($30-200 \text{ m/s}$) می‌باشد.

در اینجا تنها آرایشهای ساده با فاصله توقف مورد بررسی قرار گرفت، پدیدههای انتشار موج در سیستمهای قالب بسته که سطوح انعکاسی بیشتری دارد بسیار پیچیده تر است چرا که چگالی انرژی موج منعکس شده نیز به مقدار خرج انفجاری بستگی خواهد داشت.

تفاوت میان انرژی ساطع شده از خرج انفجاری و انرژی جذب شده توسط قطعه، توسط سیستم شکل دهی (عمدتاً قالب) جذب می‌شود. برای اطمینان از رفتار الاستیک قالب، قالب باید بتواند کسر قابل توجهی از انرژی باقیمانده را بدون آنکه دچار تسلیم شود تحمل کند، لذا مدت زمان بارگذاری و میزان بارگذاری اعمال شده به قالب را باید در نظر گرفت.

یک روش استفاده شده برای تعیین مدت زمان اعمال بار به قالب، روی قالب استوانه‌ای شکل‌دهی انفجاری، عبارت بوده است از نصب کرنش‌سنجهای مقاومت الکتریکی بر روی آن و اندازه‌گیری کرنشهای محیطی در سطح بیرونی قالب. قالب مذکور از لوله فولادی جداره ضخیم ساخته شده که قطر داخلی آن برابر **6.75 in. (171 mm)**، قطر خارجی آن برابر **10.50 in. (267 mm)** و طول آن برابر **1.62 in. (41 mm)** است. خرج پریماکورد از جنس PETN به قطر **2 in. (50.8 mm)** و چگالی خطی **400 g/ft** به طور متقارن درون قالب قرار گرفت و منفجر شد. مسیر کرنش حاصل نشان دهنده ارتعاشات سازه‌ای قالب به صورت موج با فرکانس بالا بود که بر روی یک انبساط طولانی‌تر سوار شده بود. دوره تناوب ارتعاشات سازه‌ای حدود **124 μ s/cycle** (معادل فرکانس **8066 Hz**) بود و روند کلی انبساط به مدت بیش از یک میلی ثانیه به طول انجامید. افزایش نسبتاً ملایم منحنی کرنش-زمان در مراحل اولیه بیانگر آن است که موج شوک شدیدی در قالب ایجاد نشده است. این امر نشان می‌دهد که برخورد قطعه به قالب پدیده حادی نبوده و نرخ آغاز بارگذاری مجدد ملایم بوده است. شدت نوسانات ناشی از ارتعاش قالب اندکی کمتر از ۲۰ درصد دامنه کل انبساط است. از اینرو وجود نوسانات را می‌توان با احتساب یک ضریب اطمینان اندک در نظر گرفت و استفاده از تحلیل شبه استاتیک برای طراحی کافی است. این نتیجه برای قالبهای شکل‌دهی استوانه‌ای که قطعه در آن کرنش قابل توجهی دارد اعتبارسنجی شده است.



شکل ۱۸ یک قالب شکل‌دهی انفجاری شکل داده شده، جوشکاری شده و ماشینکاری شده.

انتخاب جنس قالب بستگی به شرایط عملکردی قطعه، تعداد قطعات، صافی سطح و تولرانسه‌های مورد نیاز دارد. مواد ضعیف و ارزان قیمتی مانند بتن برای تعداد خیلی کم قطعات، یا نهایی کردن طراحی قالب اصلی و یا برآوردن ملزومات عملیات حرارتی بین مرحله‌ای به کار می‌رود. البته چنانچه نیروهای انفجار کم باشد از قالب با جنس رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه می‌توان بهره گرفت. قالبهای فولاد معمولی تعبیه شده در بتن می‌تواند برای قطعات بزرگتر به کار رود. برای قطعات با تعداد بالا باید از مواد بادوامتری استفاده کرد. چدن داکتیل برای فشارهای بالا و کاربردهای مکرر مناسب است. با استفاده از چدن می‌توان به تعداد تولید بالا دست یافت ولی صافی سطح خوبی به دست نمی‌آید. برای صافی سطح مناسب و تعداد تولید بالا استفاده از فولاد ابزار ماشینکاری شده توصیه می‌شود که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۸ نشان داده شده است. از این قالب برای تولید کیسه‌های خلاء به کار رفته در فرآیند لحیم کاری گرم موتورهای شاتل‌های فضایی استفاده می‌شود. این کیسه‌ها به نازل متصل شده و خلاء ایجاد شده باعث نگه داشتن ۱۰۸۰ عدد لوله در محل خود (با رعایت تولرانسه‌های مورد نظر) هنگام انجام فرآیند لحیم کاری گرم می‌شود

. قالب شکل سهموی داشته که قطر آن در پایین **36 in. (914.4 mm)**، در بالا **91 in. (2311.4 mm)** و ارتفاع **150 in. (3810 mm)** داشت. این قالب به روش جوشکاری با گاز محافظ از ورقی به ضخامت **1.25 in. (31.75 mm)** و حلقه‌های نورد شده و جوشکاری شده به ضخامت **2.25 in. (57.15 mm)** تولید شده که برای تمامی جوشها از مفتول **0.045 in. (1.143 mm)** استفاده شده است. حداقل ضخامت نهایی جداره قالب برابر **0.5 in. (12.7 mm)** بود. البته بعد از آنکه شکل اولیه قالب با جوشکاری حاصل شد، حجم قابل توجهی از ماده آن به منظور دستیابی به تولرانسه‌های نهایی، ماشینکاری شد [۲۶].

هنگام طراحی قالبهای شکل‌دهی انفجاری، نکته مهمی که باید به خاطر داشت آن است که عبور امواج ضربه از ماده منجر به ایجاد تنشهای فشاری یا کششی می‌شود. به علاوه، به علت انعکاس امواج از سطوح، سطوح منعکس کننده نباید سبب متمرکز شدن امواج شده که گاهی حتی باعث متلاشی شدن قالب می‌شود. اگر قالب در فشار مقاوم و در کشش ضعیف باشد، مانند بتن، باید آن را درون محفظه چگالتر با امیدانس آکوستیکی بالاتری قرار داد. این امر سبب می‌شود که امواج ضربه فشاری در مرزهای قالب به صورت امواج فشاری منعکس شوند نه کششی.

محوطه تولید و هزینه‌های مربوطه

ملزومات فرآیند شکل‌دهی انفجاری بستگی به ابعاد قطعات، آرایش قالب و محیط ناقل انرژی دارد. برای قطعات بزرگ با استفاده از قالب ماده، عمدتاً از یک مخزن آب حفر شده در زمین استفاده

می‌شود. مجموعه قالب، قطعه و خرج درون مخزن فرو برده می‌شوند. معمولاً مخزن با حفر زمین و پوشاندن جداره آن با بتن ایجاد شده و در برخی از مواقع به عنوان مخزن نهایی از آن استفاده می‌شود. البته بتن در اثر استفاده مکرر منبسط و منقبض شده که باعث تشکیل ترک در آن می‌شود، لذا نوعاً از یک روکش ضد آب مانند لاستیک یا فولاد معمولی نیز استفاده می‌شود. چنانچه از روکش فولادی استفاده شود، معمولاً قطر مخزن برابر با قطر مخازن استوانه‌ای فولادی تجاری در نظر گرفته می‌شود.

تئوتیا [۲۷] در اوایل دهه ۱۹۷۰ مطالعه جامعی درباره هزینه ساخت تجهیزات شکل‌دهی انفجاری انجام داد. در این مطالعه قواعد کامل طراحی مخازن با ظرفیت بین ۵ تا ۵۰۰ پوند، هزینه گودبرداری، موقعیت دهی روکش فولادی، پشت‌بندی آن با بتن و سپس با خاک ارایه شده است. در این مطالعه همچنین هزینه‌های مربوط به سیستم گرمکن آب و فیلتراسیون آن برای شرایطی که دمای محیط کمتر از ۱۳ درجه سانتیگراد است و ممکن است بر خواص جنس قطعه تاثیرگذار باشد و حصار ایمنی دور میدان و غیره نیز ارایه شده است. به علاوه، در این مطالعه تجهیزات میدان برای پایین آوردن مجموعه قالب به درون مخزن، تجهیزات تولید خلاء بین قطعه و قالب و تمهید زاغه لازم برای آماده سازی و نگهداری خرج انفجاری دیده شده است. نتایج این مطالعه با هزینه‌های واقعی ساخت سه میدان مشابه در ایالات متحده مقایسه شده است. هزینه کل یک میدان شکل‌دهی انفجاری به نسبت ۱۰:۱ الی ۵۰:۱ برابر کمتر از تجهیزات شکل‌دهی متداول با ظرفیت برابر است. البته هزینه‌های کاربری برای هر قطعه در شکل‌دهی انفجاری به نحو قابل توجهی بیشتر است.

از سوی دیگر قطعات کوچک را می‌توان با استفاده از کیسه‌های پلاستیکی پر از آب روی زمین و بدون فراهم کردن امکانات چندانی برای میدان، تولید کرد، البته تمهید امکاناتی برای کار کردن ایمن با مواد منفجره و موقعیت دادن خرج نسبت به قالب مورد نیاز می‌باشد. برای تولید قطعات خیلی کوچک مانند قیده‌های دندانپزشکی، فرآیند را می‌توان درون محفظه‌ای به اندازه یک لیوان و روی میز انجام داد. گزارشهایی مبنی بر انجام تولید خودکار قطعات با قالبهایی تا قطر ۵۰۰ میلیمتر و عمق ۱۰۰ میلیمتر در دستگاه اکسپلورفرم ارایه شده است [۲۸، ۲۹].

۴. تولرانسهای قابل حصول

دقت قابل دستیابی با شکل‌دهی انفجاری را می‌توان با لوله‌های مستطیل شکلی که با شعاع گوشه **1.3 mm** شکل داده شده نشان داد [۲۰]. به علاوه، بر روی قطعات کوچک شکل داده شده به روش انفجاری به تولرانسهای تا **0.025 mm** می‌توان دست یافت. عموماً به دلیل اختلاف در رفتار

برگشت فنری تولرانسهای به دست آمده در شکل دهی انفجاری می تواند برابر یا بهتر از تولرانسهای مربوط به روشهای متداول شکل دهی باشد [۳۰].

در یک فرآیند شکل دهی با قالب مشخص، مقدار برگشت فنری را بسته به جنس قطعه، با تغییر دادن مقدار خرج و فاصله توقف، می توان تا حد مشخصی کنترل کرد. افزایش اندازه خرج یا کاهش فاصله توقف باعث افزایش نیرو و تغییر شکل قطعه می شود. نیروی افزایش یافته به قالب منتقل می شود و تغییر شکل الاستیک قالب بیشتر از قبل خواهد شد. از اینرو تغییر شکل اضافی قطعه، برگشت الاستیک آن را جبران خواهد کرد و ابعاد نهایی قطعه به ابعاد قالب نزدیکتر خواهد بود. تفاوت میان ابعاد نهایی قطعه و ابعاد قالب پس از شکل دهی انفجاری ورق در قالب، با افزایش وزن خرج، ابتدا به صورت تقریباً خطی کاهش پیدا کرده و سپس به مقدار حدوداً ثابتی که بستگی به خواص جنس مانند سختی و مدول الاستیک دارد می رسد.

جدول ۲ تولرانسهایی که در شکل دهی گندهای بزرگ در محدوده **1000-1500 mm** از فولاد پر استحكام **AMS 6434** با ضخامت در حدود **2.3** تا **3.8 mm** [۲۰] حاصل شده را نشان می دهد. در مقایسه، تولرانسهای **0.03-0.2 mm** برای کشش عمیق قطعاتی با قطر **500 mm** گزارش شده است [۳۱].

جدول ۲ تولرانسهای قابل حصول در شکل دهی انفجاری گندهای بزرگ

تولرانس (میلیمتر)		
ابعاد	معمولی	امکان پذیر
قطر	0.254	0.128
ضخامت	0.100	0.050

۲. سیستمهای شکل دهی در هوا و زیر آب

سیستم شکل دهی انفجاری می تواند ترکیبی از سادگی و سهولت عملیات در هوا و مزایای توزیع انرژی، ایمنی و کنترل مناسب در سیستمهای زیر آب را بهره گیرد.

سیستمهای شکل دهی در هوا عموماً زمانی استفاده می شوند که اندازه خرج انفجاری کوچک بوده، عملیات در منطقه ای دور از محل استقرار انجام شود و یا اینکه ماهیت فرآیند مانع از استفاده از آب شود. نوعاً سیستم هوایی یک محفظه انفجار است که در آن کل فرآیند انجام می شود. این محفظه باید به گونه ای طراحی شود که بتواند در برابر نیروهای ناشی از انفجار مقاومت کرده، در برابر اصوات ناشی از انفجار عایق بندی شود و برای دفع گازهای حاصل از انفجار تجهیزات لازم را داشته باشد.

این محفظه‌ها می‌توان یک اتاقک انفجار، سنگر سطح الارضی یا در برخی موارد، حفره‌های تحت الارضی باشد. نکته اصلی هنگام طراحی این گونه محفظه‌ها آن است که باید بتواند در برابر پالس فشار ناشی از انفجار خرج مقاومت کند. مطالعه لایوینگ رابطه زیر را به دست داده است:

$$P = WK/V \quad (1)$$

که در آن P فشار پالس برحسب psi (6.894 kPa)، W وزن خرج برحسب پوند (0.4536 kg)، V حجم کره اطراف خرج برحسب فوت مکعب ($2.83 \times 10^{-2} \text{ m}^3$) و K مقدار ثابتی است که به خرج مورد استفاده بستگی دارد (مثلاً برای PETN برابر 15000 است).

(هنگامی که محفظه کروی نیست، حجم کره‌ای که شعاع آن برابر فاصله با نزدیکترین دیوار است محاسبه می‌شود.) این رابطه روشی مطمئن برای طراحی محفظه در برابر فشار انفجار است. چنانچه امکانات تولید اجازه دهد، غالباً انجام فرآیند شکل‌دهی انفجاری در محلی دور از مکان استقرار سودمند خواهد بود. عیب این روش آن است که فرآیند در معرض شرایط جوی قرار گرفته و زمانی که شرایط جوی نامناسب باشد، زمان از دست خواهد رفت. این روش تنها برای زمانی که تعداد تولید اندک باشد مناسب است.

درنهایت، برخی از کاربردهای شکل‌دهی انفجاری به طور ذاتی دارای سیستم نگهدارنده صوت و شوک می‌باشند. نمونه‌ای از آن انبساط انفجاری لوله‌ها به صفحات لوله گیر مبدل‌های حرارتی است. چنانچه پس از آنکه بست کانال مبدل در محل قرار گرفت، انبساط انفجاری انجام شود، خود بست نقش یک محفظه انفجار بسیار موثر را بازی می‌کند.

سیستم‌های شکل‌دهی زیر آب نیازمند حجم زیادی از آب (ترجیحاً درون یک مخزن) بوده تا بتواند در برابر ضربه مکرر شوک انفجار مقاومت کند. استفاده از یک سیستم نگهدارنده آب انبساط پذیر از جنس صفحات یا کیسه‌های پلاستیکی که روی قطعه‌ای که قرار است شکل‌دهی شود قرار گرفته و با آب پر می‌شود نیز امکان پذیر است. این روش برای بسیاری از فرآیندها به خوبی جواب می‌دهد اما نسبت به فرآیند درون آب دارای یکسری معایبی است که عبارت است از مصرف زیاد آب و قابلیت کمتر خفه کردن صدا.

طراحی مخزن آب یا استخر برای شکل‌دهی انفجاری باید با دقت و توجه خاصی انجام شود. تنها بخشی از انرژی انفجار به سمت قطعه شکل‌دهی هدایت می‌شود، بقیه این انرژی به صورت موج شوک در آب در می‌آید که به صورت شعاعی از خرج دور می‌شود. هنگام طراحی مخازن برای شکل‌دهی انفجاری زیر آب، از ضریب اطمینان چهار باید استفاده شود. متداولترین جنس مورد استفاده برای مخزن، فولاد معمولی است.

یک خرج **8.6** کیلوگرمی از **TNT** فشار **13 765 kPa** در فاصله **6.1** متری ایجاد می‌کند. مخزن جداره عمودی با استحکام کافی برای نگه داشتن شوکهای مکرر با چنین قدرتی بسیار هزینه می‌شود. برای کاستن از تنشهای جداره‌ها و کف مخزن، روشهای متعددی پیشنهاد می‌شود:

(۱) نخست، از مخزنی با جداره‌های شیب‌دار استفاده شود. تحلیل این نوع مخازن نشان می‌دهد که تنشها با تابعی از زاویه شیب کاهش می‌یابد.

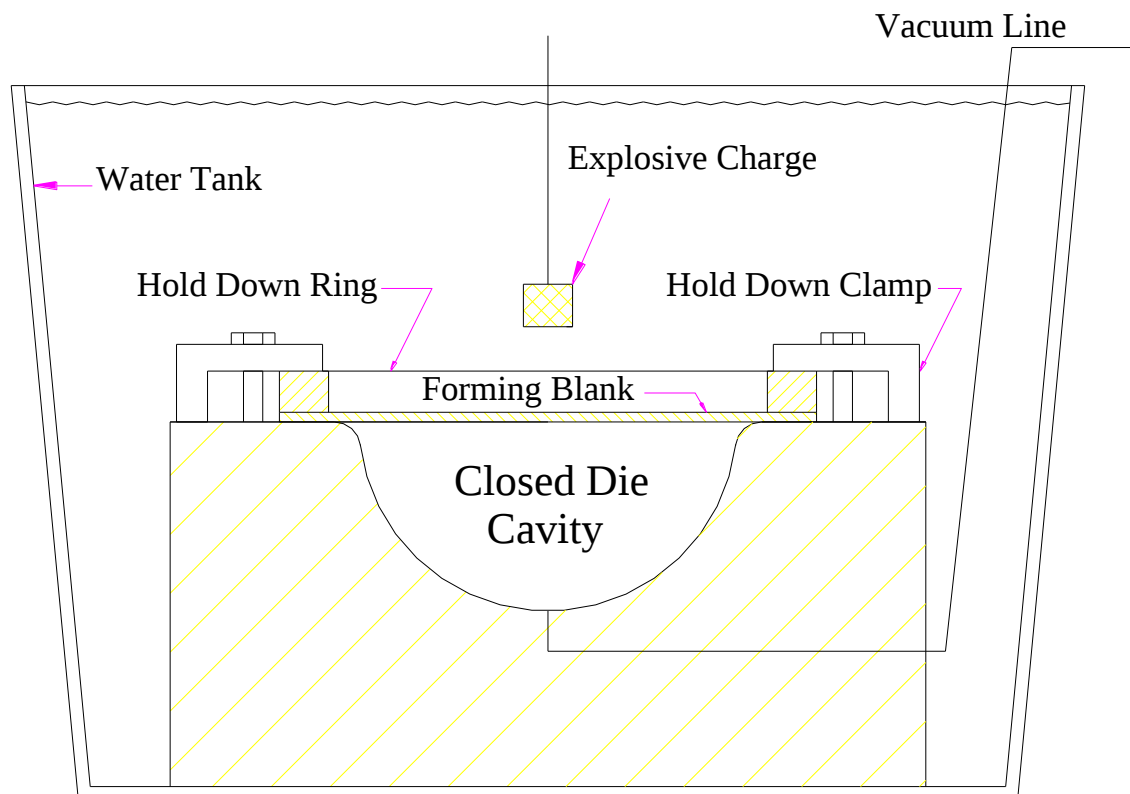
(۲) دوم، استفاده از واسط بالشتک مانند برای تعدیل امواج ضربه. با پوشاندن جداره‌های داخلی مخزن با لوله‌های لاستیکی متورم، تنش تا حد ۸۳ درصد کاهش یافته است.

(۳) سوم، رها کردن هوا از طریق حفره‌هایی از لوله‌هایی در کف مخزن. بالشتک هوایی حبابهای تولید شده در کاهش تنش ناشی از انفجار در جداره‌های مخزن سودمند بوده است. یک مخزن فولادی با قطر **6.1** متر و عمق **6.1** متر و ضخامت **2.54** سانتیمتر توانست با استفاده از بالشتک حباب، انفجارهای مکرر خرجهایی به وزن **4.3** کیلوگرم را بدون تاثیرات منفی تحمل کند.

۳. شکل‌دهیهای با ماتریس و بدون ماتریس

هنگامی که صحبت از شکل‌دهی انفجاری به میان می‌آید، ایده‌ای که بلافاصله به ذهن تداعی می‌شود، استفاده از خرج انفجاری برای کوبیدن ورق فلزی به یک ماتریس با شکل معین است. این نوع شکل‌دهی متداول بوده و پرکاربردترین روش شکل‌دهی انفجاری است؛ اگرچه ایده شکل‌دهی آزاد یا بدون ماتریس نیز از اقبال قابل توجهی برخوردار بوده و در مواردی که قطعه تمام شده نیازی به دقت زیادی ندارد استفاده می‌شود.

شکل‌دهی با ماتریس عموماً مطابق با روشی که در شکل ۲ نشان داده شده انجام می‌شود. قالب به صورت شکل دقیق قطعه نهایی ماشینکاری می‌شود. ورق فلزی روی قالب قرار گرفته و لبه‌های آن محکم روی سطح فوقانی قالب گیره‌بندی می‌شود. حفره قالب زیر ورق از هوا تخلیه می‌شود تا از پدیده تراکم آدیاباتیک که منجر به آسیب دیدن قطعه شکل داده شده و قالب می‌گردد جلوگیری شود. مجموعه قالب و ورق درون یک محیط ناقل انرژی (معمولاً آب) فروبرده شده و خرج انفجاری در فاصله مشخصی از مجموعه قرار می‌گیرد. با انفجار خرج، موج ضربه و حباب گاز تولید می‌شود. موج ضربه که منبع اصلی انرژی است، پالس فشاری معادل چند میلیون مگا پاسکال به مدت ۵ تا ۱۰ میکروثانیه ایجاد می‌کند. پالس فشار ایجاد شده به ورق نیرو اعمال نموده و آن را به سمت حفره قالب می‌کوبد. مشاهدات تصویربرداری نشان می‌دهد که ورق در عرض یک تا دو میلی ثانیه پس از انفجار شکل می‌گیرد.



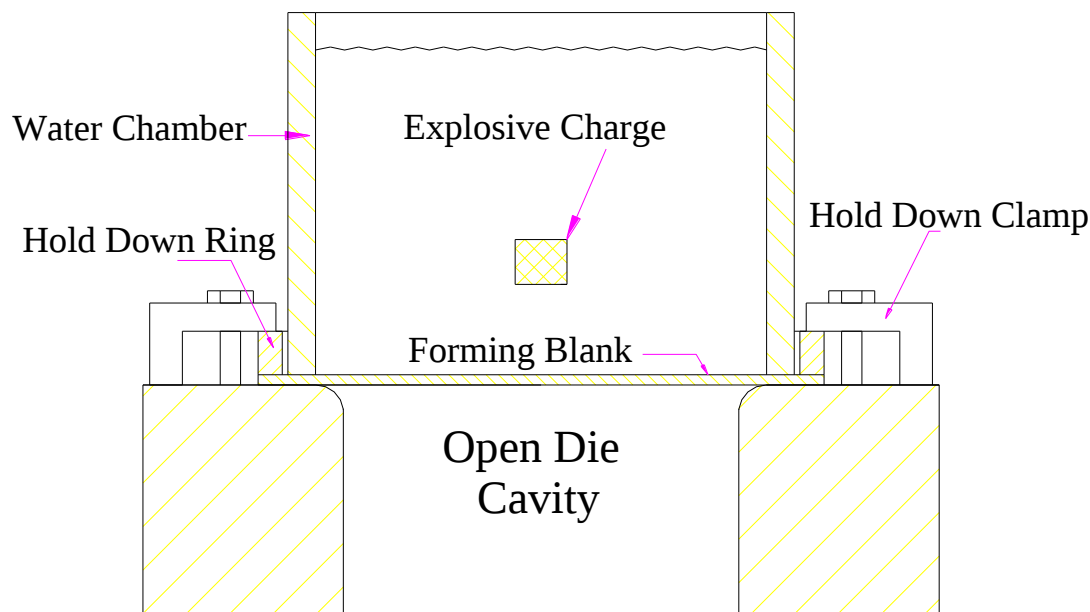
شکل ۲ شکل دهی انفجاری در قالب بسته

استفاده از حلقه ورق گیر برای جلوگیری از چین خوردگی و تغییر شکل لبه‌ها هنگام حرکت ورق به سمت ماتریس ضروری است. (بحث مفصلتری از طراحی قالب در بخش ۷ این فصل آمده است.) درون ماتریس باید پورت تخلیه هوا تعبیه شود. از آنجا که قطعه تولید شده، کلیه جزئیات حفره ماتریس را به خود می‌گیرد، پورت باید در ناحیه‌ای تعبیه شود که اثر مربوط به آن روی قطعه را بتوان حذف کرده و یا تاثیر نامناسبی برای قطعه نداشته باشد.

شکل دهی در قالبهای بسته منجر به تولید قطعات متقارن بسیار دقیقی می‌شود. عموماً پذیرفته شده که تولرانسهای ابعادی قطعاتی که به روش شکل دهی انفجاری تولید می‌شوند برابر یا بهتر از تولرانسهای ابعادی قطعات مشابهی است که با روشهای متداول تولید می‌شوند.

شکل دهی بدون ماتریس با خرج در فاصله ایستگاهی، مرسوم‌اً شکل دهی آزاد نامیده می‌شود. این نوع شکل دهی در مواردی که دقت ابعادی در قطعات متقارن چندان حایز اهمیت نیست از موفقیت بیشتری برخوردار است. با شکل دهی بدون ماتریس، شکل نهایی قطعه شکل دهی شده با اندازه و محل قرارگیری خرج انفجاری و مقاومت ورق در برابر تغییر شکل تعیین می‌شود. جزئیات سیستم شکل دهی آزاد در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل دهی روی حفره عمیقی انجام می‌شود که نقش آن کنترل شکل لبه قطعه شکل گرفته است. در اینجا نیز باید از حلقه ورق گیر به منظور جلوگیری از چین خوردگی و تغییر شکل ورق استفاده نمود. این نوع شکل دهی برای کلاهکهای بیضوی، کروی

و هذلولی بسیار موفق بوده است. همچنین می‌توان برای شکل دادن ورقهای ضخیم پیش از ماشینکاری از این روش بهره گرفت تا میزان ماشینکاری به حداقل برسد.



شکل ۳ شکل‌دهی انفجاری در قالب باز

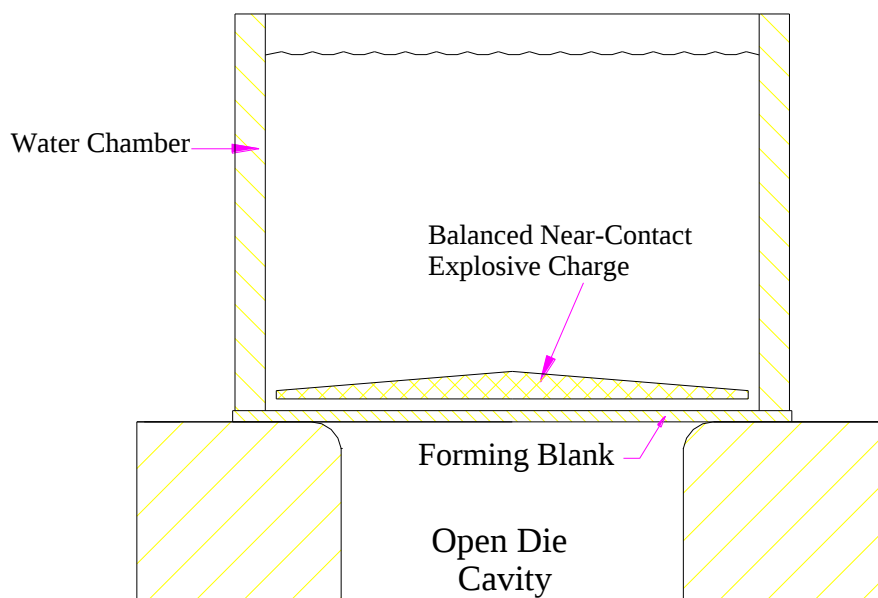
روش دوم شکل‌دهی بدون ماتریس استفاده از خرجهای تماس نزدیک بوده که در مقاله‌ای توسط برمان و شرودر توصیف شده است. در روش آنها مقدار، شکل، نوع و توزیع خرج به همراه پارامترهای مشابه برای سیال محیط تعیین کننده شدت، توزیع و مدت زمان انرژی اعمالی به قطعه است.

شکل ۴ جزئیات شکل‌دهی آزاد با استفاده از خرجهای تماس نزدیک را نشان می‌دهد. همانند روش شکل‌دهی آزاد، از یک قالب با لبه ساده استفاده می‌شود. تجهیزات ورق گیر حذف شده و خرجی بر روی لبه قرار می‌گیرد کار ورق گیر را انجام می‌دهد. این خرج روی ورق توزیع می‌شود و فاصله و مقدار آن به گونه‌ای است که ورودی انرژی مخصوص برای ایجاد شکل مورد نظر را تامین کند. محیط شکل‌دهی (یا ماده حامل انرژی از خرج به قطعه کار) نیز می‌تواند در صورت لزوم برای کنترل موضعی شدت انرژی تغییر کند.

در شکل‌دهی انفجاری آزاد یک قطعه همگن با ضخامت یکنواخت، شکل نهایی توسط پنج عامل تعیین می‌شود: (۱) مقدار خرج، (۲) نوع خرج، (۳) شکل خرج، (۴) محل قرارگیری خرج و (۵) محیط مورد استفاده برای انتقال انرژی.

مقدار خرج در ارتباط با محیط، مقدار کل انرژی اعمال شده به قطعه را تعیین می‌کند. به دلیل وجود پنج عامل متغیر ذکر شده، فرمول قابل اعتمادی برای پیش بینی دقیق شکل نهایی قطعه‌ای که برای نخستین بار شکل‌دهی انفجاری آزاد می‌شود وجود ندارد. برای این منظور آزمایشهایی تحت شرایط

کنترل شده بایستی انجام شود تا پارامترهای مناسب برای شکل مورد نظر به دست آید. بنابراین مقدار خرج مستقیماً وابسته به چهار پارامتر دیگر است. قدرت نسبی و سرعت انفجار خرجهای به کار رفته با نوع آنها تعیین می‌شود. خرجهای شدیدالانفجار متداول سرعت انفجاری در حدود ۲۶۰۰ تا ۸۰۶۰ متر بر ثانیه داشته و فشاری در حدود ۱۲ تا ۲۵ MPa تولید می‌کنند.



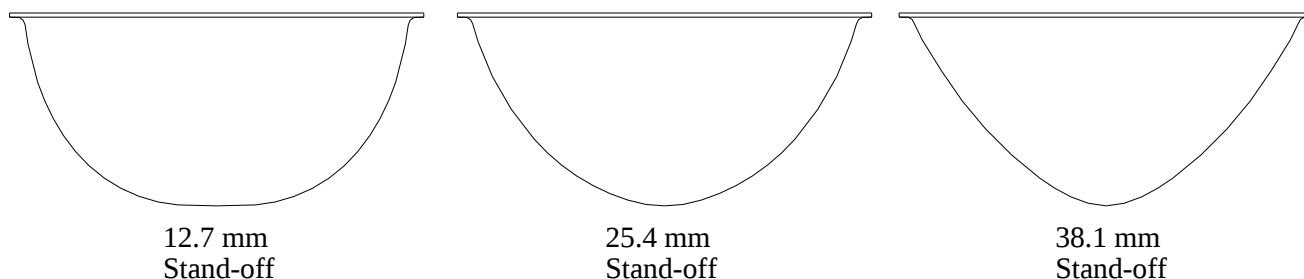
شکل ۴ شکل‌دهی انفجاری آزاد با استفاده از خرجهای تماس نزدیک

شکل خرج به تعیین پروفیل جبهه انرژی هنگام برخورد به قطعه کمک می‌کند، لذا در تعیین شکل نهایی قطعه موثر است. محل قرارگیری که در واقع فاصله توقف خرج محسوب می‌شود، تعیین کننده شکل و شدت جبهه انرژی هنگام برخورد به قطعه است. این متغیر، بیشتر از سایر عوامل می‌تواند بر شکل نهایی قطعه تاثیر بگذارد.

محیط استفاده شده برای انتقال انرژی انفجار نیز می‌تواند به آن جهت دهی کند. طبعاً با تغییر دادن محیط می‌توان انرژی را به صورت موضعی هدایت کرد. آب متداولترین محیط مورد استفاده در شکل‌دهی آزاد است، اگرچه از هوا، شن و سایر مایعات و جامدات مانند موم و پلاستیک نیز به نحو موفقیت آمیزی استفاده شده است.

۴. تحلیل شکل نهایی در شکل‌دهی آزاد

همانگونه که در بخش قبل بدان اشاره شد، شکل نهایی قطعه در شکل‌دهی انفجاری آزاد به پنج عامل بستگی دارد که مهمترین آنها محل قرارگیری خرج است. آزمایشهای زیادی برای مطالعه این پارامتر شکل‌دهی انجام شده و مشاهدات کلاسیک در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ شکلهای گنبدی شکل دهی شده به روش انفجاری آزاد با استفاده از خرجهای دیسکی مشابه ولی با فواصل توقف گوناگون

مقطع گنبدهای شکل دهی شده به روش انفجاری آزاد هنگامی که فاصله توقف خرج دیسکی تغییر می کند به طرز چشمگیری تغییر می کند. نگارنده بارها این ویژگی را مشاهده نموده و از آن به نحو موفقیت آمیزی در شکل دهی اشکال معین بهره گرفته است.

شکل دهی انفجاری یکی از روشهای تولید بوده که از انفجار برای شکل دادن فلز به سمت قالب بهره می گیرد. مواد انفجاری نوعاً زیر آب یا در تماس مستقیم با مواد منفجر می شوند. این روش برای تولید قطعات با تعداد اندک که تولید آنها با روشهای متداول دشوار است مناسب می باشد. شکل دهی انفجاری می تواند برای شکل دهی قطعاتی با ابعاد چند اینچ تا ۱۵ فوت به کار رود. محدودیت اصلی عبارت است از آغازش انفجار یکنواخت و اندازه مخزن نگهدارنده آب. به دلیل همین انعطاف پذیری، از شکل دهی انفجاری در صنعت هوافضا برای نمونه سازی قطعات پیچیده استفاده شده است.

۱,۱ تاریخچه شکل دهی انفجاری

شکل دهی انفجاری برای نخستین بار در ۱۸۸۸ گزارش شد. از آن برای حکاکی صفحات آهنی استفاده شد. در این حکاکی، ماده منفجره در تماس مستقیم با فلز قرار گرفته و ضخامت لایه ماده منفجره روی صفحه تعیین کننده عمق فرورفتگی پس از انفجار بود. شکل ۱,۱ نمونه ای از حکاکی انفجاری را نشان می دهد.

شکل ۱,۱ صفحه برنجی که به روش انفجاری حکاکی شده است (مرجع ۱) با گذشت زمان، کاربردهای زیادی برای مواد منفجره پیدا شد. پژوهشهای انجام شده بر روی اثرات مواد منفجره و امواج ضربه بر روی فلزات ریشه در کاربردهای نظامی دارد. طی جنگهای جهانی اول و دوم پژوهشهای زیادی بر روی این پدیده ها به منظور توسعه اژدرها و دیگر تسلیحات برای انهدام استحکامات دشمن انجام شد.

توسعه مواد انفجاری، باروتها و دیگر مواد شیمیایی گرمازا ارتباط تنگاتنگی با توسعه تسلیحات نظامی دارد. نیاز برای توپخانه ها و راکتهای قویتر انگیزه تحقیق بر روی باروتها و مکانیزمهای

انفجاری بوده است. تحلیل عمیق بر روی باروت‌های جدید توپ‌ها نقش مهمی در شکل‌دهی انفجاری داشته است، و امروزه مهندسين این باروت‌ها را به همراه مشخصات دقیق، قابل حصول می‌بینند. در اوایل دهه ۱۹۵۰، شرکت‌های هوافضا در ایالات متحده مانند راکتداین، آیروجت و ریان از شکل‌دهی انفجاری برای تولید قطعات هوافضایی با اشکال پیچیده بهره گرفتند. شکل‌دهی انفجاری به طور خاص در توسعه قطعات با تعداد کم موشک (به ویژه گنبد‌های موشک‌ها و مخروط‌های دماغه راکت) اهمیت پیدا کرد.

سایر قطعات صنعت هوافضا نیز از روش شکل‌دهی انفجاری تولید شد: پانل‌های موجدار پیچیده برای هواپیما و فیلترهای سوخت و لوله‌های آگروز نامتقارن برای موتورهای جت. همزمان، اتحادیه جماهیر شوروی نیز استفاده از شکل‌دهی انفجاری را در صنایع راکت سازی خود به منظور تولید پانل‌های منحنی شکل بزرگ را آغاز کرد.

۱,۲ شکلهای دیگر تولید انفجاری

روشهای تولید متعددی با استفاده از مواد منفجره وجود دارد. در این فصل صرفاً به شکل‌دهی انفجاری پرداخته شده است. برخی از دیگر روشهای تولید انفجاری عبارتند از: جوشکاری انفجاری، برش انفجاری، شکل‌دهی پودر انفجاری، پوششکاری ورق انفجاری، پوشش دهی انفجاری، تنش زدایی انفجاری، متراکم سازی انفجاری، تمیزکاری انفجاری.

۱,۳ انواع شکل‌دهی انفجاری

شکل‌دهی انفجاری را می‌توان به دو دسته مختلف جدا کرد. فرآیندهای تماسی و فرآیندهای با فاصله توقف. در فرآیندهای تماسی ماده منفجره در تماس مستقیم با فلز قرار می‌گیرد. در فرآیندهای با فاصله توقف، خرج انفجاری در فاصله‌ای از قطعه قرار می‌گیرد. فرآیندهای تماسی نیازمند مطالعات خاصی از برهم کنش فلز، ماده منفجره و محصولات دارد. فرآیندهای با فاصله توقف نوعاً از محیط حائلی مانند هوا، روغن یا آب استفاده می‌کنند. تفاوت در فشارها، بارها، و سرعت شکل‌دهی ایجاد شده در این دو روش چشمگیر است. این مطلب به صورت مفصلتری در بخش ۲ مورد کنکاش قرار گرفته است.

۲. فرآیندهای تماسی و فرآیندهای با فاصله توقف

شکل ۲,۱ تفاوت‌های میان فرآیندهای تماسی و با فاصله توقف

شکل ۲,۱ محدوده‌ای از شکل‌دهیهای انفجاری با روشهای تماسی یا با فاصله توقف را که می‌تواند انجام شود نشان می‌دهد. از مرجع ۱ صفحه ۵:

«به لحاظ مفهومی، هر فرآیند تولید انفجاری را می‌توان در طیفی از فرآیندها به عنوان تابعی از نرخ کرنش یا فشار وارده بر قطعه جای داد. این مقیاس به دو ناحیه اصلی فرآیندهای تماسی و با فاصله

توقف دسته‌بندی می‌شوند. محدوده فشار در این طیف می‌تواند از چند هزار **psi** تا چندین میلیون **psi** متغیر باشد. بسیاری از این فرآیندها در محدوده میکروثانیه تا میلی ثانیه انجام می‌شود. تفاوت‌های زیادی را در الگوهای رفتاری مواد می‌توان در این طیف فرآیندها انتظار داشت.»

همانگونه که بیان شد، خواص و رفتار مواد به نحو چشمگیری، بسته به فاصله خرج از فلز تغییر خواهد کرد. همانند دیگر روشهای شکل‌دهی فلزات، تغییرشکلهای پلاستیک مانند لغزش و اعوجاج دانه‌ها رخ می‌دهد. کنترل انفجار و فشارهای ناشی از موج ضربه تعیین کننده احتمال و تغییرات تمرکز شدید در ریزساختار قطعه شکل داده شده است. این تمرکزها می‌تواند منجر به رفتار پیش بینی نشده ماده شده و چنانچه به درستی پیش بینی و کنترل نشوند، منجر به شکست و خرابی قطعه شوند (شکل ۲,۲).

شکل ۲,۲ خرابیها و انتشار شکست در یک فرآیند تماسی (مرجع ۱)
به دلیل احتمال زیاد خرابی در فرآیندهای تماسی، در شکل‌دهی انفجاری بیشتر از فرآیند با فاصله توقف استفاده می‌شود. روش فاصله توقف مزایای دیگری نیز دارد. نخست آنکه به دلیل فاصله بیشتر بین خرج و قطعه کار، انرژی موج ضربه که به فلز منتقل می‌شود نوعاً کمتر از فرآیندهای تماسی است. قطعات بزرگتر را نیز می‌توان با مقدار کمتری از ماده منفجره شکل داد. به غیر از شکل‌دهی انفجاری، دیگر روشهای تولید انفجاری از فرآیندهای تماسی بهره می‌گیرند، (بخش ۱,۲ را ببینید).
۲,۱ روشهای تماسی

تنشهایی که در اثر انفجار خرج در یک فرآیند تماسی ایجاد می‌شود مدت زمان بسیار کوتاه و شدت بالایی دارد (مرجع ۱). چنین تنشهایی مشابه تنشهایی‌اند که در فرآیندهای متداول شکل‌دهی مانند حفره زنی ایجاد می‌شوند. اگرچه جزئیات انتقال تنش از انفجار خرج به فلز به نحو چشمگیری با دیگر فرآیندهای تولیدی متفاوت است.

شکل ۲,۳ برهم کنش موج انفجار و سطح فلز، قبل و بعد از فرآیند (مرجع ۱)
شکل ۲,۳ نمودار برهم کنش میان جبهه انفجار و فلز را قبل و بعد از فرآیند نشان می‌دهد. جزئیات مربوط به تراکم و انتشار ضربه در این فصل بیان نشده است (مرجع ۱ راهنمای تئوری خوبی برای این موضوع می‌باشد). لازم است اشاره شود که انفجار سبب می‌شود که موج ضربه درون فلز حرکت کرده و برخی از جابجائیها در فلز تقریباً همزمان با رسیدن جبهه موج به قطعه رخ می‌دهد.

شکل ۲,۴ ضخامت ناحیه کار شده به عنوان تابعی از ضخامت خرج (مرجع ۱)
همچنانکه موج فشار منتشر می‌شود، فلز «کارشدن» را تجربه می‌کند. شکل ۲,۴ ضخامت فلز که به شدت تحت کار قرار می‌گیرد را برحسب تابعی از ضخامت خرج نشان می‌دهد. مشخصاً هرچه خرج بیشتری استفاده شود، ناحیه کار شده قطعه بیشتر خواهد بود. یک مزیت شکل‌دهی انفجاری قابلیت

استفاده از فلز در یک حالت بازپخت شده قبل از فرآیند شکل‌دهی است. با این وجود، کاری که توسط موج ضربه ایجاد می‌شود می‌تواند به نحو چشمگیری خواص فیزیکی فلز شامل کارسختی یا کارنرمی را تغییر دهد. از مرجع ۱: اثر کار بر روی فلز توسط اغتشاشات تنشهای گذرای قوی، به صورت تغییر در خواص فیزیکی فلز آشکار می‌شود. سختی تغییر کرده، استحکام حد نهایی بالا رفته و نقطه تسلیم و مشخصات جریان پلاستیک تغییر می‌کند.

به عنوان مثال، فولاد معمولی در اثر شکل‌دهی انفجاری تغییرات محسوسی در سختی آن مشاهده می‌شود. شکل ۲,۵ تغییر در سختی فولاد ۱۰۲۰ را پس از فرآیند تماسی نشان می‌دهد.

شکل ۲,۵ سختی ورق فولاد ۱۰۲۰ پس از فرآیند تماسی (مرجع ۱)

البته فولاد معمولی یک استثناء است. به طور مثال، نیکل تاثیر چندانی از فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری تماسی نمی‌گیرد. ساختار بلوری (مکعبی مرکزپر، مکعبی وجوه مرکزپر و غیره) فلز شکل داده شده نقش مهمی در شدت تغییرات خواص ماده پس از شکل‌دهی دارد.

۲,۲ فرآیندهای با فاصله توقف

شکل ۲,۶ فرآیند شکل‌دهی انفجاری با فاصله توقف در آرایش مخزن آب (مرجع ۱)

موقعیت خرج و روشی که نیروهای فشاری به قطعه تغییر شکل نیافته منتقل می‌شوند در فرآیندهای تماسی و با فاصله توقف متفاوت است. شکل ۲,۶ نمونه‌ای از یک مخزن آب فرآیند با فاصله توقف را نشان می‌دهد (این آرایش برای شکل‌دهی یک مخروط، احتمالاً نوک یک موشک می‌باشد). مطالعه انتشار موج و شوک در محیطهای مختلف در فهم فرآیندهای با فاصله توقف بسیار مهم است. موج ضربه ایجاد شده توسط انفجار خرج بلافاصله مایع حائل را از حالت چگالی، دما و فشار کم به سیالی پرچگالی، پر دما و پرفشار تبدیل می‌کند.

شکل ۲,۷ منحنی‌های فشار-فاصله برای اندازه‌های گوناگون خرج (مرجع ۱)

شکل ۲,۸ تاثیر فاصله توقف بر روی پروفیل کاسه (مرجع ۱)

شکل ۲,۹ تاثیر محیط بر روی پروفیل با فاصله توقف نیم اینچ (مرجع ۱)

فاصله میان خرج و فلز فاصله توقف نامیده می‌شود. فاصله توقف و مقدار خرج تعیین کننده مقدار فشار منتقل شده به فلز است. سایر عوامل مانند نوع خرج، شکل خرج و نوع محیط حائل نیز بر فشار تاثیر می‌گذارد. شکل ۲,۷ رابطه میان وزن خرج (برای این حالت TNT)، فاصله توقف و فشار را نشان می‌دهد. شکل‌های ۲,۸ و ۲,۹ تاثیر تغییرات فاصله توقف و محیط را بر روی فرآیند شکل‌دهی آلومینیوم 2024-O را نشان می‌دهد.

بر مبنای اشکال ۲,۸ و ۲,۹، انتخاب آب (که ارزانتر و در دسترستر از پارافین یا گلیسرین است) در فاصله توقف نیم اینچ (که بهترین شکل کاسه را ایجاد می‌کند) برای شکل‌دهی این قطعه خاص مناسب می‌باشد.

فهم امواج فشاری و ترقیقی که در انفجار ایجاد می‌شوند در پیش بینی عکس العمل فلز شکل‌دهی شده بسیار مهم است. موضوعات موج فشاری در زمینه هوافضا به خوبی شناخته شده بوده و باعث شده فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری با فاصله توقف به عنوان یک روش تولیدی جذاب به ویژه در صنایع هوافضا به شمار رود. فرآیندهای با فاصله توقف همچنین می‌تواند در تولید قطعات بسیار بزرگ به کار رود. شکلهای ۲,۱۰ و ۲,۱۱ دو مخزن بزرگ را نشان می‌دهد که در شکل‌دهی قطعات بزرگ هوافضا به کار می‌رود.

شکل ۲,۱۰ مخزن بزرگ شکل‌دهی انفجاری (مرجع ۱)

شکل ۲,۱۱ شکل طرحواری از مخزن شکل‌دهی انفجاری بزرگ (مرجع ۱)

نوع دیگری از شکل‌دهی انفجاری با فاصله توقف در شکل ۲,۱۲ نشان داده شده است. از آن می‌توان برای تولید ساختارهای لوله‌ای شکل اصلاح شده از لوله‌های کشیده شده استفاده کرد. شکل ۲,۱۲ طرحی از یک قالب و موقعیت خرج انفجاری را نشان می‌دهد که در آن محیط حائل به جای آب از ماسه استفاده شده است.

شکل ۲,۱۲ شکل‌دهی انفجاری یک لوله

محدودیت‌های مربوط به تعداد اندک تولید و شکل پذیری انواع گوناگون فلزات با انفجار در بخشهای بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده در فرآیندهای تماسی و با فاصله توقف در بخش ۴، «کاربردهای مهندسی» نشان داده خواهد شد.

۳. انواع خرجهای انفجاری، جنسهای قالب و شکل پذیری فلزات

۳,۱ انواع خرجهای انفجاری

خرجهای به کار رفته در شکل‌دهی انفجاری متنوع است. در جدول ۳,۱ روشهای آغازگری مواد پرانفجار و کم انفجار و همچنین مقیاسهای زمانی و فشارهای بیشینه هرکدام مقایسه شده است. روشن است که فشار لازم برای شکل‌دهی هر قطعه تعیین کننده انتخاب هر ماده منفجره است. جدول ۳ برخی از مشخصات انواع مواد منفجره مورد استفاده در صنعت برای شکل‌دهی انفجاری را دربردارد. هر دو جدول ۳,۱ و ۳,۲ از مرجع ۲ برگرفته شده‌اند.

جدول ۳,۱ مشخصات مواد پرانفجار و کم انفجار (مرجع ۲)

ویژگی	مواد پرانفجار	مواد کم انفجار
روش	انفجار ماده منفجره اولیه، جرقه، شعله، یا ضربه، دتوناتور ماده	اشتعال

آغازگری	منفجره ثانویه، یا ترکیب دتوناتور و بوستر	
زمان واکنش	میکروثانیه	میلی ثانیه
فشار	تا حدود 4,000,000 psi	تا حدود 40,000 psi

جدول ۳,۲ خواص چند ماده منفجره مورد استفاده در شکل‌دهی انفجاری (مرجع ۲)

۳,۲ جنسهای قالب

جنس قالب بر مبنای چندین عامل انتخاب می‌شود:

دوام تولید، نوع و ضخامت فلز قطعه کار، آرایش هندسی (شعاعها، عمق پاکتها، بیدها و غیره)، تولرانس مورد نظر برای قطعه، وزن خرج، فاصله توقف. از مرجع ۳ درباره انتخاب جنس قالب: «قالبهای با استحکام نسبتاً پایین عمدتاً برای تولید اندک قطعاتی به کار می‌رود که تولرانسهای بسته‌ای ندارند، حال آنکه برای تولید قطعات با تعداد بیشتر، قالب باید از استحکام بالاتری برخوردار باشد.... [برای] تعداد بیشتر، قالب باید از موادی که استحکام تسلیم آنها بیش از استحکام تسلیم قطعه باشد انتخاب شود.»

مشکلات مربوط به تولید قالبهای شکل‌دهی انفجاری مشابه مواردی است که برای قالبهای شکل‌دهی متداول وجود دارد. چنانچه جنس قالب استحکام تسلیم بالاتری نسبت به فلز قطعه کار داشته باشد، ماشینکاری آن به شکل موردنظر بسیار دشوار است. برای تولیدهای اندک یا نمونه سازی، هنگامی که از قالب برای تولید تعداد محدودی قطعه استفاده می‌شود از موادی مانند کرکسیت یا فایبرگلاس می‌توان استفاده کرد. در جدول ۳,۳ از مرجع ۲، فهرستی از چند نوع جنس قالب و محدوده کاربردهای آنها ارایه شده است.

جدول ۳,۳ جنسهای متداول قالب (مرجع ۲)

جنس قالب	محدوده کاربرد
کرکسیت	فشار کم و قطعات اندک
فایبرگلاس و کرکسیت	فشار کم و قطعات اندک
فایبرگلاس و بتن	فشار کم و قطعات زیاد
اپوکسی و بتن	فشار کم و قطعات زیاد

فشار بالا و قطعات زیاد	فولاد معمولی
فشار متوسط و قطعات زیاد	بتن

۳,۳ شکل پذیری مواد

مرکز **TNO**، یک گروه تحقیقاتی هلندی (مرجع ۳) از روش شکل دهی انفجاری برای مواد زیر استفاده کرده است:

مواد؛ تمامی فلزات شامل: آلیاژهای تیتانیوم (**CP, Ti6Al4V, Ti6-2-4-2, Ti-B21S, ...**)، آلیاژهای نیکل (**625, 718, Hastalloy-X** و غیره)، آلیاژهای آلومینیوم (مانند **7075, 2024, 6xxx, 5xxx** و غیره)، فولاد (ضدزنگ)، آلیاژهای خاص، بسیار پراستحکام یا ترد مانند آلیاژ **PM1000** از **ODS**

مرجع ۱، کار انفجاری فلزات شامل مقایسه ذیل از شکل پذیری فلزات با مواد منفجره است که در شکل ۳,۱ نشان داده شده است.

شکل ۳,۱ شکل پذیری نسبی فلزات با مواد منفجره (مرجع ۱)
موادی که در صنایع هوافضا کاربرد زیادی دارند مانند آلومینیوم (گروه های **5XXX, 2XXX**، **6XXX** و **7XXX**)، تیتانیوم و نیکل را می توان به روش انفجاری شکل داد.

۴. کاربردهای مهندسی

۴,۱ انعطاف پذیری نمونه های شکل دهی انفجاری

شکل ۴,۱ پانل وافل برای راکت ساترن پنچ (مرجع ۳)

شکل ۴,۲ نمونه ای از پانل موجدار هواپیمای جت (مرجع ۱)

شکل ۴,۳ فیلتر سوخت موتور جت (مرجع ۱)

شکل های ۴,۱ تا ۴,۳ محدوده ای از اندازه های قطعاتی که می توان به روش انفجاری شکل داد را نشان می دهد. شکل ۴,۴ و شکل ۴,۵ انعطاف پذیری مربوط به شکل دهی انفجاری در مورد استفاده از لوله ها یا سازه های مشابه به عنوان شکل اولیه (مثلاً در مورد شکل ۴,۵، شکل مخروطی) را نشان می دهد.

شکل ۴,۴ قطعه مربوط به حامل کلاهک موشک و شکل اولیه آن (مرجع ۱)

شکل ۴,۵ استوانه موجدار شده به روش انفجاری (مرجع ۱)

شکل ۴,۶ آلومینیوم **2024-T3** که به روش انفجاری به رینگ شکل داده شده است. (مرجع ۳)

شکل ۴,۷ ساختار بیددار برای استفاده در محمل بازگشت فضاوردان از فضا از **PM1000** (آلیاژ مقاوم به دمای بالا) (مرجع ۳)

شکل ۴,۸ تیتانیوم (**Ti6Al4V**) شکل‌دهی شده به روش انفجاری (مرجع ۳)
شکل‌های ۴,۶ تا ۴,۸ گستره‌ای از مواد هوافضا که می‌توان به روش انفجاری شکل داد را نشان می‌دهد. **TNO** (مرجع ۳) با اشاره به شکل ۴,۸ بیان می‌کند که:

«شکل‌دهی آلیاژهای تیتانیوم مانند **Ti6Al4V** دشوار است. این نمونه نشان می‌دهد که با اعمال یک طرح شکل‌دهی مناسب (مبتنی بر شکل‌دهی عمیق)، شکل‌های قابل توجهی را می‌توان ایجاد کرد. گام بعدی نیمکره خواهد بود.»

TNO اخیراً پژوهشی درباره استفاده از روش‌های شکل‌دهی انفجاری برای گستره‌ای از آلیاژهای خاص و مواد غیرفلزی را آغاز کرده است. در بخش ۵، «پژوهش و کاربردهای آتی» اختصاراً به این موضوعات پرداخته شده است.

۴,۲ هزینه و مناسب بودن

شکل‌دهی انفجاری را می‌توان برای ساخت آسان قطعات صعب‌التولید به کار گرفت. قابلیت تولید سریع نمونه (شکل ۴,۹) قطعات پیچیده و با تolerانس بالا مزیت زیادی در صنعت به شمار می‌رود. البته باید توجه داشت که شکل‌دهی انفجاری لزوماً جایگزین روش‌های متداول شکل‌دهی فلزات نیست.

شکل ۴,۹ دماغه‌های مخروطی آلومینیوم، تولید شده به روش متداول (چپ) و شکل‌دهی انفجاری (راست). (مرجع ۱)

مشخصه‌های شکل‌دهی انفجاری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (مرجع ۲):

صفحات بسیار بزرگ با اشکال نسبتاً پیچیده و البته معمولاً متقارن محوری

هزینه‌های ابزار اندک ولی هزینه‌های کاربری بالا

مناسب برای تولید اندک

زمان فرآیند طولانی

به طور کلی، همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، هزینه واحد یک قطعه شکل داده شده به روش انفجاری برای تعداد قطعات زیاد، بالاتر از روش‌های متداول است.

شکل ۴,۱۰ منحنیهای مقایسه هزینه در حالت کلی (مرجع ۱)

شکل ۴,۱۰ نشان می‌دهد که در نقطه‌ای مانند **P**، هزینه واحد استفاده از شکل‌دهی انفجاری (در صورتی که عملی و امکان‌پذیر باشد) به طرز چشمگیری کمتر از روش‌های متداول است. این امر تا حد زیادی به هزینه‌های اندک تجهیزات برمی‌گردد. به این ترتیب، شکل‌دهی انفجاری می‌تواند به

عنوان یک جایگزین کم هزینه برای سایر روشهای گرانقیمت متداول برای نمونه سازی به شمار رود. فراتر از این نقطه **P**، روشهای متداول ارزاتر است. لذا کاربرد شکلدهی انفجاری در تولید انبوه بسیار محدود است.

به دلیل هزینههای کاربری بالا و تجربه لازم برای شکلدهی انفجاری، بسیاری از شرکتهای کوچکتر تخصصی برای فعالیتهای نمونه سازی تبدیل شدهاند. یکی از شرکتهای فعال در این زمینه، شرکت اکسپلوفر (مرجع ۴) است که متشکل از پیوند سه شرکت و آزمایشگاههای تحقیقاتی آنتونیوس وسلهدز، تی ان ا و فابریک ون پلاتورکن است.

۵ پژوهش و کاربردهای آتی

فعالیت پژوهشی توسط **TNO** انجام شده تا شبیه سازیهای عددی برای فرآیندهای شکلدهی انفجاری توسعه داده شود. **TNO** (مرجع ۳) پیش بینی میکند که شکلدهی انفجاری در آینده در زمینههای زیر به کار گرفته شود:

سازههای تخلیه توربین گاز پوستههای موتور لایههای الیاف فلز

مخازن فشار سوخت

دیگر کاربردهای توربین گاز

شکل ۵،۱ تحلیل عددی و شبیه سازی کالبراسیون فشار

اخیراً لایههای الیاف فلز به شکل انفجاری شکل داده شده است. شکل ۵،۳ یک گلیر را نشان میدهد که حاوی قطعهای است که از فلز با الیاف شیشه ساخته شده است. پس از انجام فرآیند لازم است بازرسی لازم انجام شود تا اطمینان حاصل شود که شکلدهی سریع منجر به جدایش لایههای نشده باشد.

شکل ۵،۳ ماده گلیر که حاوی الیاف شیشه است، توسط پژوهشگاه **TNO** شکل داده شده است (مرجع ۳)

شکلدهی انفجاری همچنان به عنوان یک روش سودمند تولیدی برای نمونه سازی باقی مانده است. در صناعی که «فناوری پرشتاب سبب شده موجب شده که بسیاری از مفاهیم سیستمی پیش از ورود به مرحله تولید، منسوخ شوند» (مرجع ۱) و یا در صناعی که قطعات فلزی نمونه، شکلهای پیچیده ای دارند، شکلدهی انفجاری میتواند جایگزین مناسبی برای فرآیندهای شکلدهی متداول محسوب شود.

فصل سوم

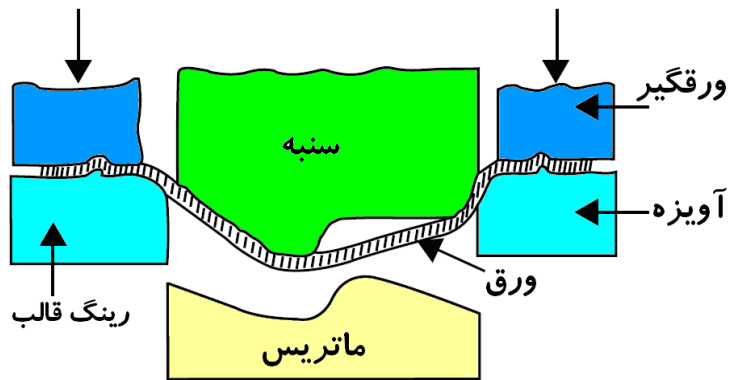
تحلیل شکل دهی انفجاری و مکانیک
شکل گیری ورق

مروری بر تحلیل حد شکل دهی ورقهای فلزی و پارامترهای موثر بر آن

پیشرفت در زمینه مدلسازی عددی فرآیندهای کشش ورق و اندازه گیریهای تجربی، طراحی فرآیندهای شکل دهی ورق با استفاده از اصول کاربردی مهندسی را امکان پذیر کرده است. در این فصل نشان داده شده که چگونه تعامل بین پژوهشهای تئوری و تجربی منجر به ایجاد مفهوم ناحیه شکل دهی در فضای کرنشها شده که مسیر ایمن و مطمئن تغییر کرنش را در یک المان ورق مشخص می کند. این ناحیه به حدود عیوب مربوط به گلویی شدن موضعی، گسیختگی برشی و چین خوردگی محدود می شود. فرآیند شکل دهی قابل اطمینان، فرآیندی است که در آن کرنشهای قطعه درون این ناحیه قرار گیرند. ماهیت این ناحیه و تاثیر خواص ماده بر شکل آن را می توان پیش بینی نمود.

مقدمه

در فرآیند شکل دهی عمیق، ورق از اطراف گیره بندی شده و توسط سنبه ای به دون حفره قالب شکل دهی می شود. ورق تحت اثر نیروهای غشایی به گونه ای کشیده می شود که شکل آن با شکل ابزار منطبق می شود. تنشهای غشایی در ورق از تنشهای تماسی بین ابزار و ورق بسیار بیشتر بوده و از تغییرات تنش در راستای ضخامت به جز در گوشه های تیز (با شعاع انحنای کم) ابزار می توان چشم پوشی کرد. شکل ۱ قالب کشش عمیقی را نشان می دهد که در انتهای کورس، تماس با ورق تنها با یکی از دو جزء ماتریس یا سنبه است. لبه یا فلانچ ورق معمولاً به صورت صلب گیره بندی نشده و جریان ورق به سمت حفره ماتریس به صورت کنترل شده ای انجام می شود. کشش ورق باید به اندازه کافی بوده تا از چین خوردگی آن جلوگیری کند و در عین حال نباید به اندازه ای زیاد باشد که موجب گسیختگی آن شود. محدوده یا ناحیه شکل دهی عمیق ورق در شکل ۲ نشان داده شده است. در مواد همسانگرد، محدوده نقاط $\epsilon_2 > \epsilon_1$ قرینه محدوده $\epsilon_2 < \epsilon_1$ است.



شکل ۱ مقطع طرحوار یک قالب کشش عمیق ورق.

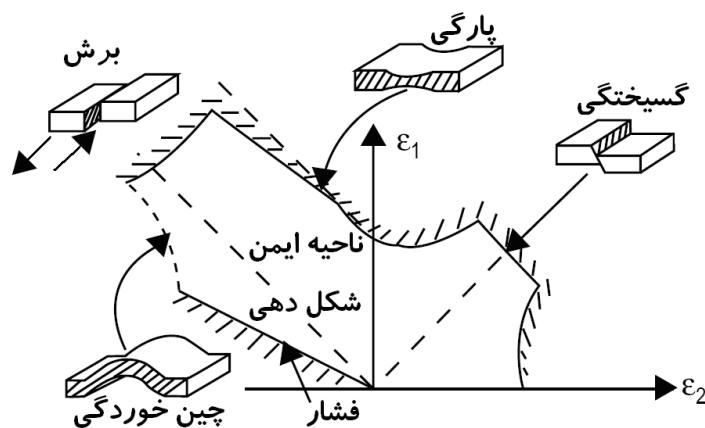
مسیر در فرآیند کشش عمیق با نسبت کرنشهای غشایی بیان می شود

(۱)

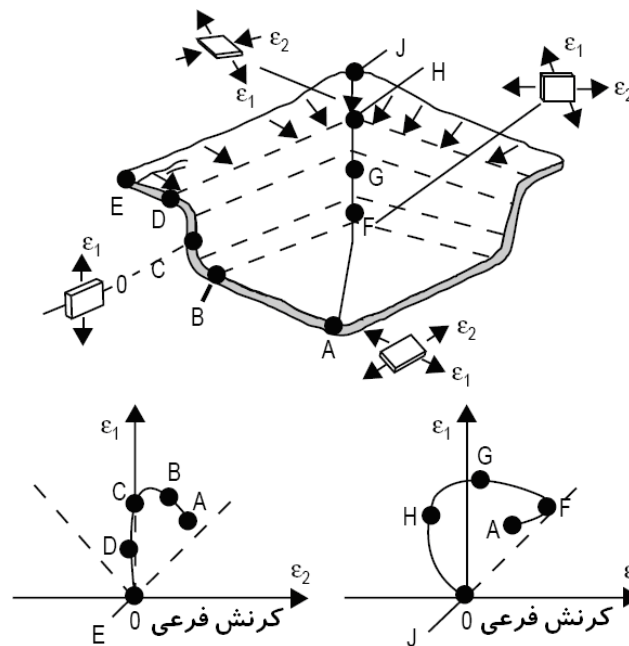
$$\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$$

که مقدار آن از اتساع دو محوره ($\beta = 1$) تا فشار تک محوری ($\beta = -2$) متغیر است. شکل ۳ مسیرهای کرنش را در راستای دو خط در کشش عمیق یک قطعه مستطیلی نشان می دهد. به این نمودارها، مسیرهای کرنش یا امضاها کرنش مربوط به آن بخش از قطعه گفته می شود. در نقطه وسط، A ، اتساع دو محوره نابرابر ($\beta \neq 1$) رخ می دهد. در جداره، C ، وضعیت کرنش صفحه ای ایجاد می شود. اگر ضلع قطعه بزرگ و مستقیم باشد، کرنش صفحه ای در D نیز ایجاد خواهد شد. روی گوشه گرد شده سنبه در نقطه F ، کرنش دو محوری است. در نقاط H تا J کرنشها در ربع دوم نمودار قرار می گیرند. سرگذشت و پیدایش مفهوم منحنی حد شکل دهی در مرجع [Error! Reference source not found.] مورد بررسی قرار گرفته و در این فصل صرفاً

پیشرفتهای جدیدتر در این عرصه بیان می شود.



شکل ۲ شکل طرحوار ناحیه شکل دهی ایمن برای مسیرهای ساده یا نمودار حد شکل دهی.



شکل ۳ مسیرهای کرنش در راستای خطوط A تا J و A تا E در یک قطعه مستطیل شکل.

ناپایداری کششی

لانکفورد، گنسامر و لو [Error! Reference source not found.] پارگی آلیاژهای آلومینیومی که در مسیرهای کرنش مختلفی تغییر شکل داده شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها برای یکی از آلیاژهای آلومینیوم در شکل ۴ نشان داده شده است. شکست در ربع دوم (کشش-فشار) در اثر گلویی موضعی در راستای اتساع صفر رخ می‌دهد (همانگونه که در شکل‌های ۲ و ۴ نشان داده شده است). در این منطقه، آزمایشها با مدل هیل [Error! Reference source not found.] که معادل معیار کشش پیشینه است، انطباق خوبی دارد. نیروی غشایی کشش برابر با نیروی واحد طول مقطع ورق بوده که حاصلضرب تنش در ضخامت است، $T = \sigma t$. برای ماده‌ای با مدل تنش-کرنش موثر نمایشی

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n \quad (2)$$

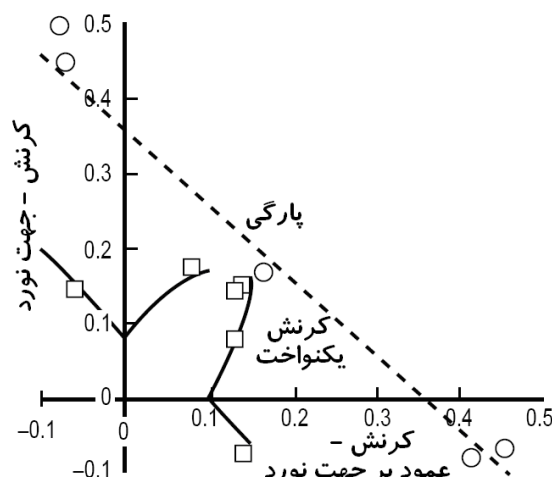
شکست در ضخامت ثابت $t = t_0 e^{-n}$ پیش بینی شده که خط حدی سمت چپ نمودار در شکل‌های ۲ و ۴ است. این خط محور کرنش اصلی را در نقطه $\varepsilon_1 = n$ قطع می‌کند. معیار کشش پیشینه شرط لازم برای گلویی شدن موضعی است، ولی در کشش دو محوره جهتی که نیروی کشش در آن صفر باشد وجود ندارد.

کیلر و باکوفن [Error! Reference source not found.] کرنشهای شکست را در اتساع دو محوره به دست آوردند (شکل ۵). همچنانکه مسیرهای کرنش به سمت دو محوره شدن پیش

می‌روند، کرنشهای شکست اندازه‌گیری شده افزایش یافته و از کرنش در کشش بیشینه فراتر می‌روند. آنها «منحنی حد شکل‌دهی» را برای توصیف شرایطی که منجر به گلویی شدن موضعی می‌شوند، معرفی کردند.

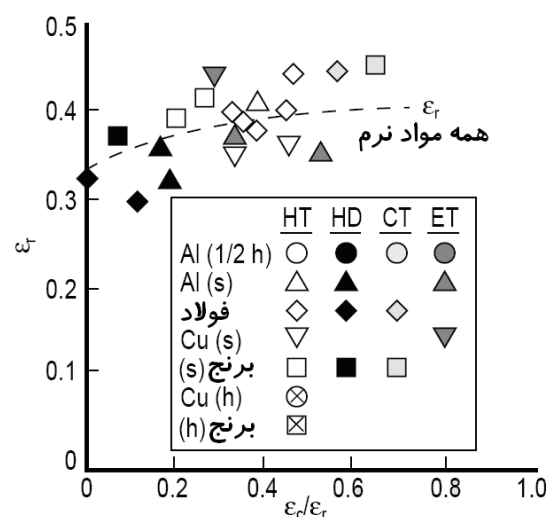
باوجود بدون توجیه ماندن این مشاهدات، پژوهشهای دیگر نیز آنها را تایید کرد (مراجع [found. Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.]).

با استفاده همزمان از تحلیل شبکه‌های دایره‌ای، این روش به عنوان ابزاری توانمند در بررسی عیوب شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های حد شکل‌دهی با استفاده از اندازه‌گیریهای انجام شده در کارگاه پرس یا آزمایشگاه قابل استخراج می‌باشند. شکل ۶ نمونه‌ای از یک منحنی حد کشش را برای فولاد کم کربن نشان می‌دهد.

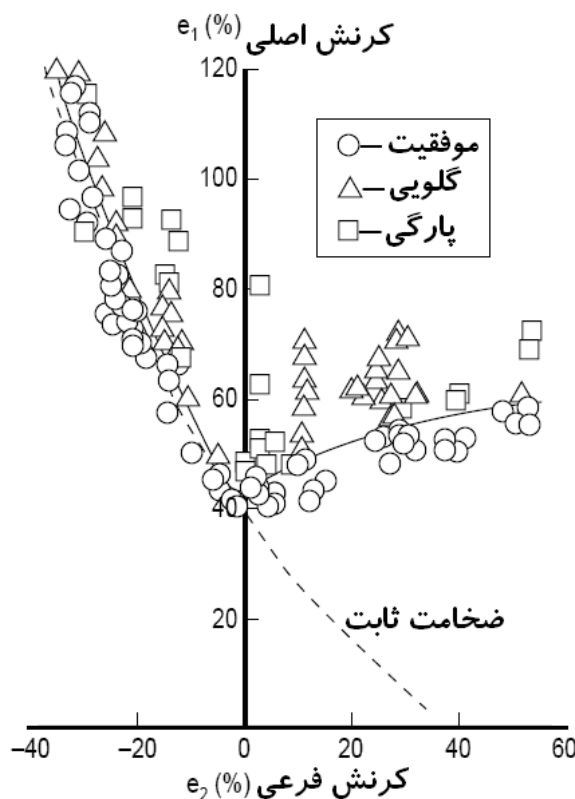


شکل ۴ منحنی‌های حد کشش و پارگی برای آلیاژ آلومینیومی 24 ST [Error! Reference source not found.]

[Reference source not found.] مقدار کمینه در کرنش صفحه‌ای ($\varepsilon_2 = 0$) مشخص شده است.



شکل ۵ کرنشهای شکست در کشش دوجوره [Error! Reference source not found].



شکل ۶ نمودار حد شکل دهی یک نمونه فولاد کم کربن [Error! Reference source not found].
منحنی خط چین مربوط به پیشینه کشش ($T = \sigma t$) بوده که با ضخامت ثابت به دست آمده است.

تحلیل عیوب

عیوب اولیه موجود در ورق، مانند کاهش موضعی ضخامت یا استحکام، می تواند تاثیر مهمی بر کرنش شکست داشته باشد. به عنوان مثال، یک نمونه آزمون کشش ممکن است حاوی منطقه معیوب B که ظرفیت تحمل بار آن اندکی کمتر از بقیه نواحی (منطقه A) است باشد. عیب اولیه می تواند منطقه ای باشد که نازکتر بوده و یا به دلایلی مانند تغییرات اندازه دانه، راستای کریستالوگرافی و یا ترکیب شیمیایی، دارای تنش جریان پایتتری است. در هر صورت، در تحلیل ریاضی می توان آن را به صورت یک منطقه نازکتر در نظر گرفت.

$$f = t_{B0} / t_{A0} \quad (۳)$$

در رابطه فوق، t_{A0} و t_{B0} ضخامتهای اولیه دو منطقه است. با وجود این عیب، نیروی بیشینه در نمونه آزمایش زمانی ایجاد می‌شود که کرنش در ناحیه معیوب به مقدار Π برسد. کرنش یکنواخت ($\varepsilon_A = \varepsilon_u$) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\varepsilon_A^n e^{-\varepsilon_A} = f n^n e^{-n} \quad (4)$$

که حل تقریبی [Error! Reference source not found.] معادله (4) به صورت زیر بیان می‌شود

$$\varepsilon_A = \varepsilon_u = n - \sqrt{n(1-f)} \quad (5)$$

مقادیر کرنشهای یکنواخت از روابط (4) و (5) در شکل ۷ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های آزمون کشش ورقهای فلزی عمدتاً دارای عیوبی در حدود $1-f=0.001$ می‌باشند، که چنانچه $n=0.2$ باشد، منجر به ایجاد کرنش یکنواخت $\varepsilon_u=0.18$ به جای 0.2 می‌شود (یعنی عیبی در مرتبه یک هزارم سبب کاهش ۱۰ درصدی کرنش یکنواخت بیشینه می‌شود).

مارسینیاک و کوزینسکی [Error! Reference source not found.] پیشنهاد کردند که طی فرآیند اتساع دوماحوره، گلوئی‌های موضعی در اثر رشد عیوب بسیار کوچک هم می‌تواند ایجاد شود. اگر منطقه شیار ماندنی که عمود بر بزرگترین تنش اصلی است، ضعیفتر یا نازکتر از بقیه ورق باشد (شکل ۸)، کرنش در آن به صورت موضعی افزایش می‌یابد. شرط تعادل مستلزم آن است که نیروی کششی عمود بر شیار در هر دو منطقه یکسان باشد.

$$\sigma_{1A} t_A = \sigma_{1B} t_B \quad (6)$$

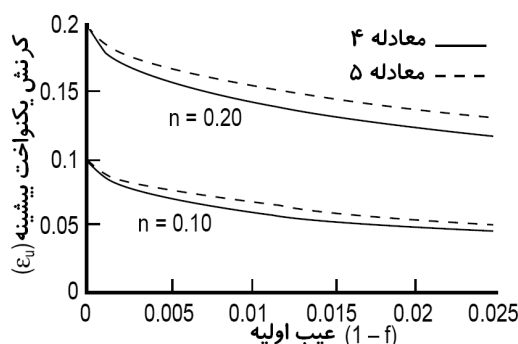
و لازمه شرط سازگاری هم آن است که کرنش موازی با شیار در هر دو منطقه با هم برابر باشد.

$$\varepsilon_{2A} = \varepsilon_{2B} \quad (7)$$

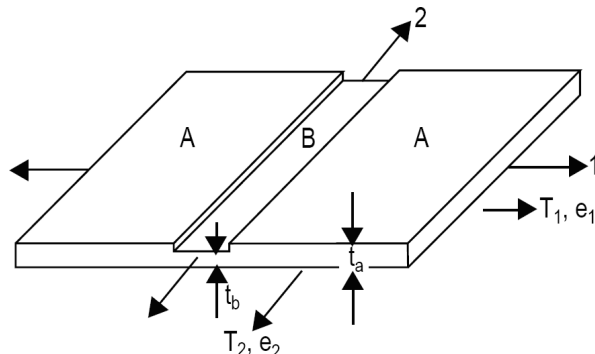
اگر منطقه یکنواخت در مسیر کرنش خطی β_A تغییر شکل دهد، کرنش در شیار در مسیر غیرخطی β_B رشد خواهد کرد (شکل ۹). هنگامی که شیار به وضعیت کرنش صفحه‌ای برسد، تغییر شکل در منطقه یکنواخت کاهش یافته، و حد شکل‌دهی برای مقدار β_A با کرنشهای ε_1^* و ε_2^* در منطقه یکنواخت A مشخص می‌شود.

معیار کشش بیشینه که منجر به رابطه $\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* = n$ می‌شود، برای گلوئی موضعی شرطی لازم ولی غیرکافی است. شرط دیگر آن است که در شیار رابطه $d\varepsilon_{2A}/d\varepsilon_{2B} = 0$ برقرار باشد. در ربع دوم نمودار ($\varepsilon_2 \leq 0$)، زمانی که کشش به بیشینه مقدار خود می‌رسد تغییر شکل در منطقه A بلافاصله افت می‌کند و گلوئی در راستای خط کشش صفر شکل می‌گیرد. در ربع اول

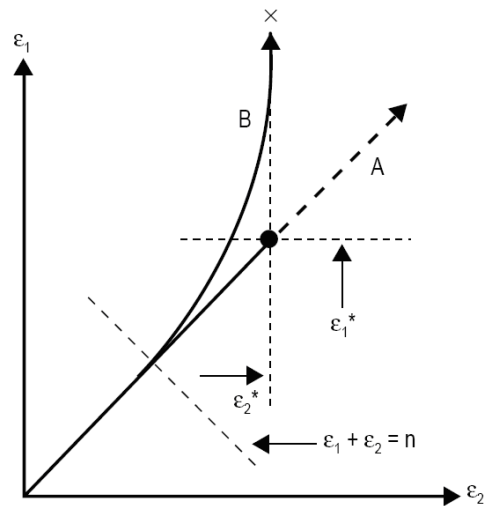
($\varepsilon_2 > 0$)، تغییر کرنش تا فراتر از کشش بیشینه ادامه پیدا می‌کند تا اینکه در قسمت گلویی وضعیت کرنش صفحه‌ای ایجاد شود (مگر آنکه در این میان پارگی رخ دهد). مدل مارسینیاک-کوزینسکی روشی را برای محاسبه منحنی‌های حد کشش و تاثیر خواص ماده بر روی آن به دست می‌دهد. اگرچه، محاسبات حد شکل‌دهی انجام شده در تعدادی از مقالات [Error! Reference source not found.، Reference source not found.، به نحو چشمگیری با نتایج تجربی تفاوت دارد.



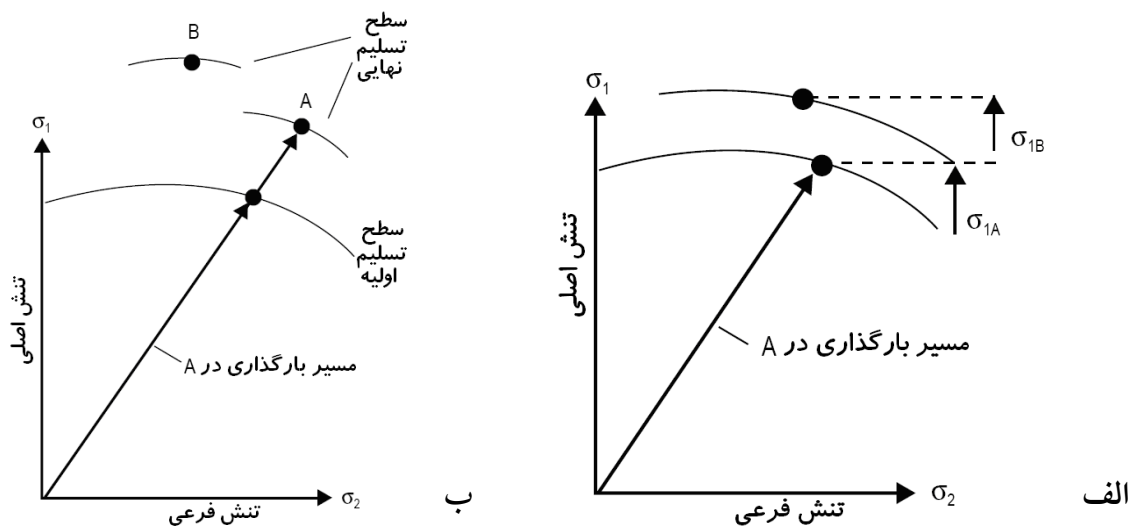
شکل ۷ مقایسه کرنشهای پیش بینی شده با رابطه ۴ (حل دقیق) و رابطه ۵ (حل تقریبی).



شکل ۸ مدل عیب مارسینیاک که با استفاده از یک شیار مشخص شده است.



شکل ۹ تصویر طرحواری که نشان می‌دهد چگونه کرنش در منطقه معیوب (منطقه B) از کرنش منطقه سالم (منطقه A) جدا می‌شود.



شکل ۱۰ (الف) وضعیت تنش در مناطق A و B. به دلیل کرنش سختی بیشتر سطح تسلیم برای B بزرگتر است. (ب) تنشها در منطقه معیوب B به وضعیتی تغییر می‌کند که امکان ایجاد وضعیت کرنش صفحه‌ای فراهم شود، در حالیکه ماده بیرون از منطقه معیوب A به اتساع دو محوری ادامه می‌دهد.

معیار تسلیم

شکل ۱۰-الف نشان می‌دهد که چگونه تنشها در شیار B با تنشهای منطقه یکنواخت متفاوت است، چرا که شرط تعادل را باید برآورده کند

$$\sigma_{1b} = (t_A / t_B) \sigma_{1A} \quad (A)$$

حد شکل‌دهی زمانی ایجاد می‌شود که منطقه B به وضعیت کرنش صفحه‌ای برسد (شکل ۱۰-ب). سوربی و دونکن اظهار داشتند که این مساله به سطح تسلیم وابسته است، که آن هم متأثر از مقدار R بوده که از آزمایش کشش به دست می‌آید. با استفاده از معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل [Error! Reference source not found.]، برای وضعیت تنش صفحه‌ای می‌توان نوشت:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + R(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2\bar{\sigma}^2 \quad (9)$$

پارمار و ملور [Error! Reference source not found.] وابستگی زیاد حدود شکل‌دهی را به ناهمسانگردی پیش‌بینی کردند (شکل ۱۱). اگرچه نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی تأثیر قابل توجهی از ناهمسانگردی را نشان نمی‌دهند. معیار تسلیمی با توان بالاتر برای تقریب محاسبات منحنی حد بالای تسلیم مبتنی بر لغزش کریستالوگرافی پیشنهاد شده [Error! Reference source not found.]، که به صورت زیر می‌باشد:

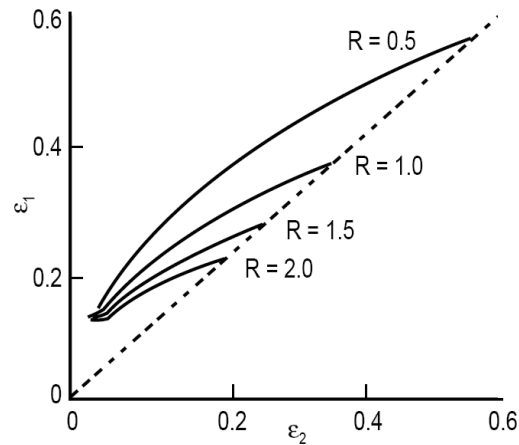
$$\sigma_1^a + \sigma_2^a + R(\sigma_1 - \sigma_2)^a = 2\bar{\sigma}^a \quad (10)$$

توانهای $a=6$ و $a=8$ به ترتیب برای فلزات مکعبی مرکز پر و مکعبی وجوه مرکز پر پیشنهاد شده‌اند. این منحنی تسلیم، همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده، بین معیار ترسکا و معیار مربعی هیل قرار می‌گیرد. می‌توان مشاهده کرد که در معیار توان بالا، نسبت تنش برای کرنش صفحه‌ای (خط چین)، فارغ از مقدار R، نزدیک 0.5 باقی می‌ماند. حدود تسلیمی که با استفاده از این معیار با توان بالا پیش‌بینی شده تقریباً تأثیری از ناهمسانگردی را نشان نمی‌دهد (شکل ۱۳)، چرا که در معیار توان بالا، ناهمسانگردی اثر اندکی بر نسبت تنش مورد نیاز برای کرنش صفحه‌ای دارد. شکل ۱۴ برگرفته از پژوهش بارلت [Error! Reference source not found.]، تأثیر توان معیار تسلیم را بر حدود شکل‌دهی نشان می‌دهد. منحنی تسلیم برای توان ∞ همان منحنی تسلیم ترسکا می‌باشد. برای چنین ماده‌ای، منحنی تسلیم دارای یک راس بوده که در آن بردار کرنش می‌تواند هر جهتی داشته باشد. حد شکل‌دهی در ربع اول نمودار با خط زیر منطبق نیست.

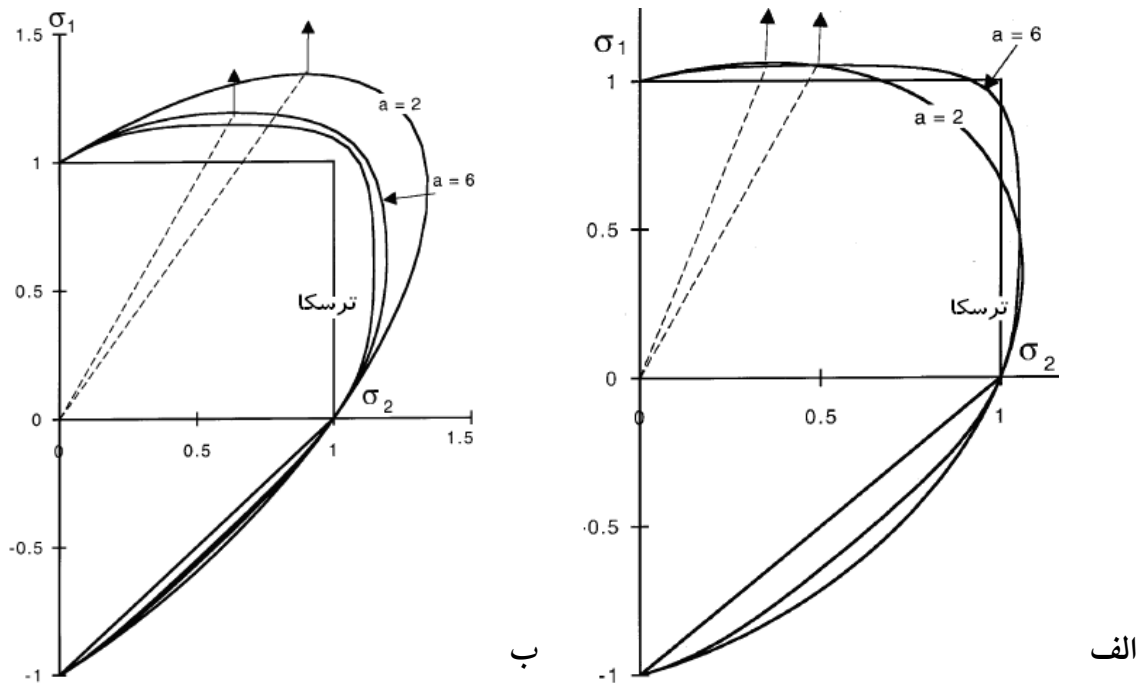
$$\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* = n \quad (11)$$

اختلاف میان حدود شکل‌دهی تجربی و محاسبه شده موجب بررسی مدل‌های منحنی‌های تسلیم گوشه‌دار و کاربرد تئوری تغییر شکل پلاستیسیته شد، اما این مفاهیم هنوز مورد بررسی تجربی قرار نگرفته‌اند. عوامل دیگری نیز می‌تواند بر منحنی تسلیم تأثیر بگذارد. روشن است که در منطقه کشش دو محوره، ماده درون شیار B در مسیر کرنش منحنی-شکل جریان می‌یابد. اثراتی

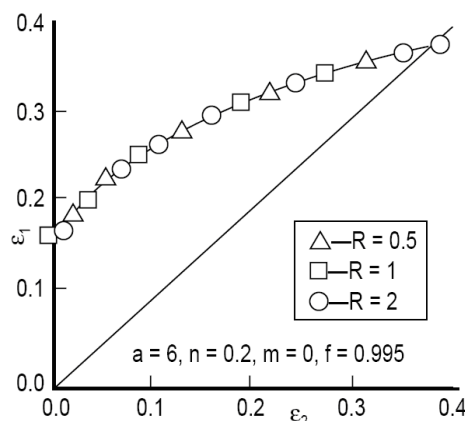
شبيهه به اثر پوشينگر، مانند کرنش سختی سينماتيك، می تواند کرنش سختی در شيار را کم رنگ کرده و به پارگی سرعت بخشد.



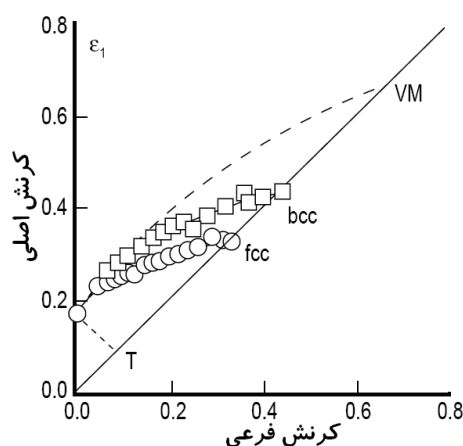
شکل ۱۱ محاسبات انجام شده بر مبنای معيار تسليم مربعی (رابطه ۹) درباره تاثیر R بر روی حدود شکل دهی در ربع اول نمودار.



شکل ۱۲ سطوح تسليم برای معيار توان بالا (معادله ۱۰) برای $a=6$ (مواد bcc) و $a=2$ معيار مربعی هیل (معادله ۹) برای مقادير (الف) $R=0.5$ و (ب) $R=2$.



شکل ۱۳ وابستگی محاسبه شده حدود شکل دهی به مقدار R با استفاده از تحلیل مارسینیاک با معیار توان بالا (معادله ۱۰) برای $n=0.2$ و $f=0.995$.



شکل ۱۴ وابستگی حدود شکل دهی در ورقهای همسانگرد بر اساس محاسبات مرجع [Error! Reference source not found.] با استفاده از تحلیل مارسینیاک با معیارهای تسلیم مختلف. VM بیانگر معیار فون میسز و T بیانگر معیار ترسکا است.

ماهیت عیوب

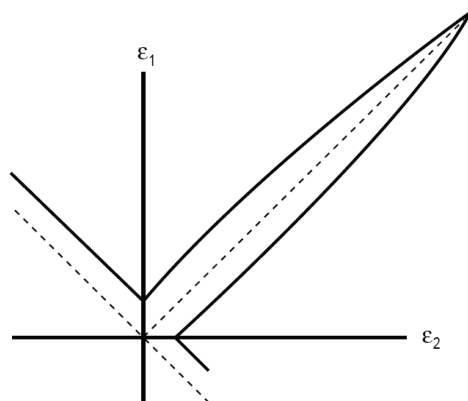
ویلسون و همکاران [Error! Reference source not found.] تغییرات موضعی در راستای دانه‌ها و اندازه دانه را که می‌تواند به عنوان عیوب مارسینیاک تلقی شود مورد مطالعه قرار دادند. تغییرات موضعی ترکیب شیمیایی نیز می‌تواند در برخی از مواد حایز اهمیت باشد. در محاسبات حدود شکل دهی، معمولاً به منظور انطباق با نتایج تجربی، برای عیب اولیه مقداری در محدوده $0.985 \leq f \leq 0.995$ در نظر گرفته می‌شود. مک کارون و همکاران [Error! Reference source not found.] پیش از آنکه ورقهای فولادی را در معرض کشش دوماحوره قرار دهند، عیوبی را در آنها ماشینکاری کردند و دریافتند که عیوب مصنوعی باید در

محدوده $0.990 \leq f \leq 0.995$ باشد تا پارگی به صورت موضعی رخ دهد. عدم توانایی عیوب کوچکتر برای آغازش گلویی موضعی بیانگر آن است که عیوب در چنین محدوده‌ای از قبل موجود بوده است. ورقهای صنعتی احتمالاً توزیع مکانی و اندازه‌ای مشخصی از عیوب را دارا می‌باشند. در بسیاری از فرآیندهای کشش عمیق، ناحیه ورق در معرض کرنش دهی بحرانی ممکن است آنقدر کوچک باشد که حاوی عیوب زیادی از ورق نباشد. پراکندگی کرنشهای حدی بیانگر آن است که حد شکل‌دهی به جای یک خط یک نوار خواهد بود [Error! Reference source not found.]. پیشنهاد شده که حد متوسط شکل‌دهی و پراکندگی با افزایش مقیاس فیزیکی قطعه کاهش پیدا می‌کند، چراکه تغییرات کرنش یکنواخت‌تر می‌شود.

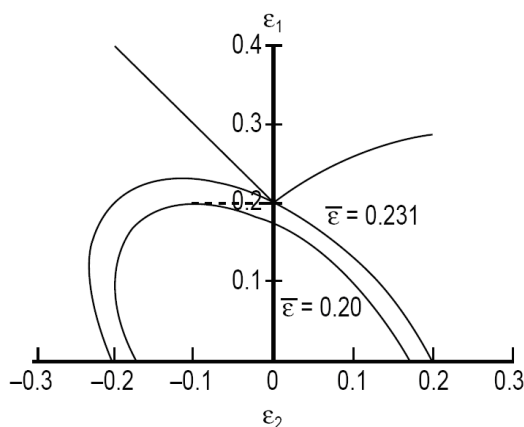
کرنش سختی

حد شکل‌دهی در وضعیت کرنش صفحه‌ای تقریباً برابر با نمای کرنش سختی، Π است. اگر Π کاهش پیدا کند (مثلاً در اثر کار-سرد)، ناحیه شکل‌دهی در ربع اول نمودار بسیار کوچک می‌شود (شکل ۱۵). در ورق کاملاً کارسرد شده، $n \sim 0$ ، تنها فرآیندهایی که بدون پارگی امکان پذیراند عبارتند از کشش دومحوره یکسان، مثل اتساع بر روی سنبه کروی، و تغییر شکل با ضخامت ثابت، $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$.

شرایط بحرانی در گلویی شدن در کرنشهای بزرگ رخ می‌دهد، از اینرو استفاده از مقادیر کرنش سختی در کرنشهای بزرگ در محاسبات حایز اهمیت است. در آزمون کشش، اطلاعات را تنها تا کرنش معادل Π می‌توان به دست آورد. مکان هندسی کرنشهای معادل در شکل ۱۶ نشان داده شده است؛ مشخص است که حدود شکل‌دهی بزرگتر از این مقدار است. شکل منحنی تنش-کرنش در کرنشهای بالاتر را می‌توان از دیگر آزمایشها مانند آزمون تحدب هیدرواستاتیک به دست آورد. برد و دونکن [Error! Reference source not found.] نشان دادند که مواد با کرنش سختی مشابه در محدوده آزمون کشش ممکن است در کرنشهای بزرگتر با یکدیگر همخوانی نداشته باشند و این مساله بر کرنشهای حدی تاثیر می‌گذارد.



شکل ۱۵ ناحیه شکل‌دهی برای ماده‌ای کاملاً کار-سرد شده هنگامی که مقدار n بسیار اندک است.



شکل ۱۶ منحنی حد شکل‌دهی برای ماده‌ای با $n=0.20$ به همراه مکان هندسی کرنشهای معادل 0.20 و 0.231. گلویی شدن موضعی در وضعیت کرنش صفحه‌ای هنگامی رخ می‌دهد که $\varepsilon_1 = n = 0.20$ باشد و آن هم مربوط به $\bar{\varepsilon} = (2/\sqrt{3})n = 0.231$ است؛ در حالیکه نتایج آزمون کشش تنها اطلاعاتی تا کرنش معادل 0.2 به دست می‌دهد.

حساسیت به نرخ کرنش

حساسیت به نرخ کرنش یک ماده را می‌توان با رابطه زیر تقریب زد:

$$\bar{\sigma} = C \dot{\bar{\varepsilon}}^m \bar{\varepsilon}^n \quad (12)$$

برای فلزات مهندسی در محدوده دمای اتاق، مقدار m در محدوده -0.005 تا 0.015 است. حتی چنین مقادیر اندک m هم می‌تواند چشمگیر باشد. در یک نمونه آزمون کشش، اگر طول قسمت موازی نمونه L و سرعت کشش v باشد، نرخ کرنش برابر با v/L است. عرض نمونه آزمون نوعاً در حدود $L/8$ و ضخامت آن در مرتبه $L/100$ است. تغییر شکل در گلویی نفوذی،

درون طولی تقریباً برابر با عرض رخ می‌دهد، لذا نرخ کرنش با ضریب ۸ افزایش می‌یابد. در گلوئی موضعی، تغییر شکل در طولی تقریباً برابر با ضخامت ورق متمرکز شده که نرخ کرنش را در مرتبه ۱۰۰ برابر افزایش می‌دهد. حتی حساسیت اندک به نرخ کرنش استحکام ماده را در گلوئی افزایش داده، که باعث می‌شود گلوئی آرامتر توسعه یافته و امکان تغییر شکل بیشتر بیرون از گلوئی و افزایش کرنش حدی را فراهم می‌کند. تاثیر m بر منحنی حد کرنش مشابه تاثیر ضریب کرنش سختی n است.

حد پارگی

پارگی معمولاً در اثر گسیختگی برشی در ریشه گلوئی موضعی رخ می‌دهد. کرنش در پارگی، ε_p ، مشابه درصد کاهش سطح مقطع نمونه‌های مدور که در آزمون کشش اندازه‌گیری می‌شود، یک مشخصه ماده است. اگر کرنش پارگی ماده‌ای از کرنشی که در آن گلوئی موضعی به وضعیت کرنش صفحه‌ای می‌رسد (شکل ۹) فراتر رود، تاثیری بر کرنشهای حدی در منطقه یکنواخت A ندارد. ولی اگر پارگی پیش از گلوئی کرنش صفحه‌ای رخ دهد، حد شکل‌دهی را کاهش می‌دهد. این مساله در پژوهش لروی و امبوری [Error! Reference source not found.] نشان داده شده، که در کشش دوماحوری، کرنش حدی در یک نمونه آلایژ آلومینیومی به جای گلوئی موضعی توسط پارگی تعیین می‌شود.

تغییر مسیرهای کرنش

در آزمایشهای انجام شده برای تعیین حدود شکل‌دهی، مسیرهای کرنش تقریباً خطی است، که البته در برخی از فرآیندهای صنعتی مسیر کرنش غیر خطی می‌باشد. این مساله را می‌توان به صورت تئوری با اعمال تغییر مسیر کرنش در ناحیه A مورد بررسی قرار داد [Error! Reference source not found.]. آزمایشهای انجام شده با تغییر کرنش منفرد و ناگهانی این روش را تایید می‌کند [Error! Reference source not found.]. تغییر در حدود شکل‌دهی وابسته به مسیر پیش بارگذاری شده است. برای یک مسیر دوخطی، تاثیر بارگذاری نخست، جابجایی (اعم از کاهش یا افزایش) حدود کمینه است.

اثرات ضخامت

ورقهای ضخیمتر حدود شکل‌دهی بالاتری دارند [Error! Reference source not found]. و حدود شکل‌دهی اندازه‌گیری شده برای کرنش صفحه‌ای با مقادیر ضخامت و کرنش سختی در فولاد افزایش می‌یابد. این تاثیر تاحدی مربوط به این واقعیت است که برای ضخامتهای ورق مختلف از یک اندازه شبکه استفاده شده است. شکل سطح مقطع گلولی به لحاظ هندسی در ورقهای ضخیم و نازک مشابه است. در این حالت، مناطق نمونه برداری شده در ورقهای ضخیم به مرکز گلولی نزدیکتر بوده و کرنش متوسط بالاتری دارند. این توجیه با آزمایشهایی که در آن اندازه شبکه و ضخامت تغییر می‌کند تایید می‌شود (جدول ۱) [Error! Reference source not found].

جدول ۱ وابستگی حدود شکل‌دهی در وضعیت کرنش صفحه‌ای (کرنش مهندسی) به ضخامت و اندازه شبکه بندی

ضخامت ورق (mm)	درصد وزنی کربن	ضریب کرنش سختی n	کرنش حدى شبکه 2.54 mm	کرنش حدى شبکه 5.08 mm
0.76	0.038	0.249	0.38	0.34
1.52	0.049	0.248	0.47	0.41

مشاهده می‌شود که با دو برابر شدن همزمان ضخامت و اندازه شبکه، تغییر اندکی در حد شکل‌دهی رخ می‌دهد. دو ورق ضخامتهای 0.76 mm و 1.52 mm تقریباً ترکیب شیمیایی یکسانی داشته‌اند. این نتیجه برای دیگر مواد مشابه نیز صادق است، به جز آنکه شکل گلولی به حساسیت به نرخ ماده وابسته است.

گلولی‌ها در مواد با مقدار m بالاتر یکنواخت‌تر است. آلیاژهای آلومینیوم با مقدار m بسیار پایین، گلولی‌های تیزتری نسبت به فولاد کم کربن دارند. در گلولی‌های تیزتر اثر ضخامت کمتر به چشم می‌خورد. این نتیجه با تاثیر بسیار اندک ضخامت در آلیاژهای آلومینیوم پژوهش اسمیت و لی [Error! Reference source not found.] مطابقت دارد. پیشنهاد شده که با افزایش ضخامت، ضریب ناهمگنی f کاهش می‌یابد و بالتبع حدود شکل‌دهی افزایش می‌یابد [Error! Reference source not found.].

چین خوردگی

هنگامی که تنش فرعی در ورق فشاری است ممکن است چین خوردگی ایجاد شود. چین خوردگی در نواحی لبه (شکل ۳) را می‌توان با نیروی ورقگیر حذف کرد. البته چین خوردگی می‌تواند در نواحی بدون تماس ورق یا جاهایی که ورق از یک سمت با ابزار تماس دارد نیز

رخ دهد [Error! Reference source not found.]. راه حل متداول، افزایش نیروی ورقگیر است که سبب افزایش تنش شعاعی σ_1 و کرنش ε_1 می‌شود. انقباض جانبی محیطی مربوط به این کشش شعاعی به کاهش تنش فشاری محیطی کمک می‌کند. مقدار کشش مورد نیاز به مقدار R ماده وابسته است که تعریف آن عبارت است از نسبت کرنش پهنا به کرنش ضخامت در آزمون کشش. با افزایش مقدار R به کشش شعاعی کمتری نیاز بوده و احتمال پارگی کاهش می‌یابد. مقدار R در فولادها نوعاً بیشتر از یک و در ورقهای آلومینیومی کمتر از یک است، لذا مشکل چین خوردگی در ورقهای آلومینیومی حادتر است. تمایل به چین خوردگی همچنین از مدول الاستیک، ضخامت ورق و شرایط ابزار تاثیر می‌پذیرد به گونه‌ای که نمی‌توان حد چین خوردگی مشخصی را برای یک ماده در نظر گرفت و درج این خط در نمودار کلی حد شکل‌دهی (شکل ۲) چندان معتبر نیست.

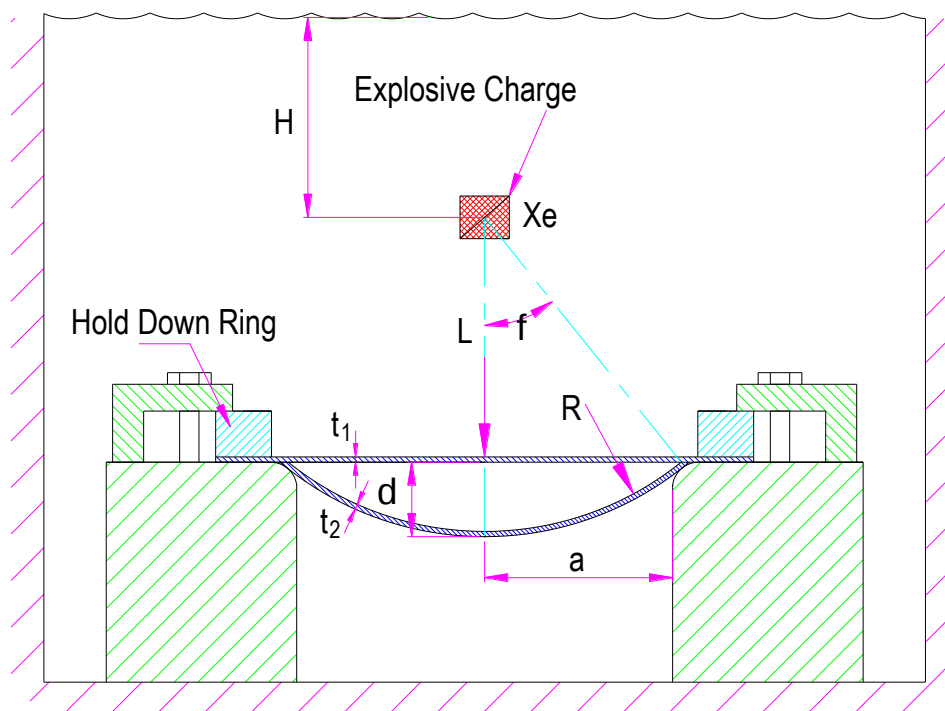
وایتلی [Error! Reference source not found.] نشان داد که با افزایش R امکان کشش فنجانه‌های عمیقتر به وجود می‌آید، ولیکن تحلیل وی توضیح نمی‌دهد که چرا ورقهای با R بالا در شکل‌دهی قطعات کم عمق، مانند قابهای بیرونی بدنه خودرو مناسب تراند. در واقع این افزایش قابلیت به دلیل بالا بودن مقاومت به چین خوردگی آنها است.

نتیجه‌گیری

مفهوم منحنی حد شکل‌دهی آن است که تمامی مسیرهای کرنش ممکن درون محدوده‌ای واقع شود که تنها مشخصه‌ای از جنس ورق باشد. وابستگی صرف حدود پارگی به خواص ورق، چنانچه از تنشهای راستای ضخامت چشم پوشی شود و مسیر جریان هر جزء از ورق ساده و خطی باشد، فرضی منطقی و مقبول خواهد بود. مدل تحلیل عیب مارسینیاک-کوزینسکی روشی را برای محاسبه منحنی‌های حد کشش و تاثیر خواص ماده بر روی آن به دست می‌دهد. مطالعات گسترده‌ای درباره این مدل انجام شده و تلاشهای متعددی برای ارایه راهکارها و اصلاحات تئوری در این مدل به منظور انطباق با نتایج تجربی صورت پذیرفته است. البته پژوهشهای تئوری و تجربی درباره تاثیر پارامترهای ذاتی ورق (از قبیل معادله مادی جنس ورق، رفتار پلاستیسیته، خواص متالورژیکی و غیره) و مشخصه‌های محیطی (مانند دما و سرعت فرآیند، مسیر بارگذاری، شرایط تماسی قالب و غیره) همچنان ادامه دارد.

در شکل دهی انفجاری آزاد ورقها، ورق در رینگ قالب محکم گیره‌بندی شده و شرایط و پارامترهای فرآیند، که تعیین کننده میدان فشار اعمالی‌اند، شکل نهایی قطعه را مشخص می‌کنند. خرج انفجاری در فاصله توقف L از ورق قرار گرفته و انرژی از طریق موج ضربه حاصل از انفجار خرج به ورق منتقل می‌شود. برای کاهش اتلاف انرژی، فشار استاتیک آب بالای خرج H ، باید از مقدار معینی که تقریباً برابر با قطر ورق است بیشتر باشد.

تغییر شکل در شکل دهی انفجاری عمدتاً مربوط به اتساع خالص بوده و عرقچین کروی به شعاع R و عمق δ (شکل ۳-۲۹) به طور تقریبی بیانگر شکل هندسی قطعه است. معمولاً در طراحی فرآیند شکل دهی انفجاری دو هدف دنبال می‌شود: (الف) برآورد اندازه یا مقدار خرج انفجاری و (ب) تعیین کار خارجی یا انرژی اعمالی از خرج انفجاری به قطعه کار. با برابر قرار دادن انرژی تغییر شکل و انرژی اعمالی به ورق، می‌توان مقدار خرج انفجاری مورد نیاز را به دست آورد.



شکل ۳-۲۹ آرایش فرآیند شکل دهی انفجاری آزاد

مساحت سطح عرقچین کروی شکل ۳-۲۹ برابر است با

$$A_s = 2\pi R\delta \quad (۳-۱۵)$$

که در آن δ خیز بیشینه است. با استفاده از فرض ثابت بودن حجم،

$$\pi a^2 t_1 = 2\pi R\delta t_2 \quad (۳-۱۶)$$

که با استفاده از این رابطه می‌توان نوشت:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{a^2}{2R\delta} \quad (۱۷-۳)$$

با نوشتن روابط هندسی (شکل ۳-۲۹) می توان نوشت

$$R^2 = (R - \delta)^2 + a^2 \quad (۱۸-۳)$$

که پس از بسط و ساده سازی می شود،

$$2R\delta = \delta^2 + a^2 \quad (۱۹-۳)$$

جایگذاری رابطه (۱۹-۳) در رابطه (۱۷-۳) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{a^2}{(\delta^2 + a^2)} = \frac{1}{1 + (\delta/a)^2} \quad (۲۰-۳)$$

کرنشهای اصلی شعاعی و محیطی ایجاد شده در عرقچین با یکدیگر برابر فرض می شود، یعنی $\epsilon_r = \epsilon_\theta$. با در نظر گرفتن فرض ثابت بودن حجم، می توان نوشت:

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta = -\frac{1}{2}\epsilon_t \quad (۲۱-۳)$$

به این ترتیب، کرنش موثر به صورت زیر به دست می آید:

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_r^2 + \epsilon_\theta^2 + \epsilon_t^2)} = \epsilon_t = -\ln\left[1 + \left(\frac{\delta}{a}\right)^2\right] \quad (۲۲-۳)$$

با در نظر گرفتن رابطه تنش-کرنش به صورت نمایی،

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (۲۳-۳)$$

انرژی تغییر شکل به صورت زیر در می آید،

$$W = V \frac{K \bar{\epsilon}^{n+1}}{1+n} \quad (۲۴-۳)$$

با جایگذاری رابطه (۲۲-۳) در رابطه (۲۴-۳) می توان نوشت:

$$W = \pi a^2 t_1 \cdot \frac{K}{1+n} \cdot \left[\ln\left\{1 + \left(\frac{\delta}{a}\right)^2\right\} \right]^{n+1} \quad (۲۵-۳)$$

انرژی تغییر شکل را می توان برای سایر هندسه های نهایی مورد نظر برای قطعه کار نیز به دست آورد، که تنها مولفه های حجمی لازم است تغییر کند.

خرج انفجاری در اثر انفجار، مقداری انرژی آزاد می کند که به صورت انرژی واحد جرم خرج، e ، برحسب J/kg بیان می شود. به این ترتیب انرژی آزاد شده از خرج انفجاری به جرم X برابر با $X.e$ است. البته تمام مقدار انرژی به ورق نمی رسد؛ بلکه متناسب با زاویه مرکزی کره، بخشی از انرژی خرج، ورق را در بر می گیرد (شکل ۳-۲۹).

$$\omega = \frac{2\pi\rho\delta}{4\pi\rho^2} = \frac{2\pi\rho(\rho-L)}{4\pi\rho^2} \quad (26-3)$$

به این ترتیب انرژی منتقل شده به ورق به صورت زیر به دست می آید

$$\bar{E}_L = \frac{X.e}{2}(1-\cos\phi) \quad (27-3)$$

البته همه این انرژی به انرژی تغییر شکل مکانیکی تبدیل نمی شود. با در نظر گرفتن بازدهی η که مقدار آن معمولاً بین 0.25 تا 0.5 در نظر گرفته می شود، مقدار انرژی مفید برابر است با:

$$E_L = \eta \frac{X.e}{2}(1-\cos\phi) \quad (28-3)$$

و با توجه به حالت حداکثر بازدهی، $\eta_{\max} = 0.5$ ، انرژی مفید برابر است با

$$E_L \leq \frac{X.e}{4}(1-\cos\phi) \quad (29-3)$$

یا

$$X \geq \frac{4E_L}{e.(1-\cos\phi)} \quad (30-3)$$

با برابر قرار دادن انرژی تغییر شکل در رابطه (3-25) با انرژی مفید اعمالی در رابطه (3-30) نتیجه زیر حاصل می شود

$$X \geq \frac{4\pi a^2 t_1 K}{e.(1-\cos\phi)(1+n)} \left[\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 \right\} \right]^{n+1} \quad (31-3)$$

که در آن X جرم خرج مورد نیاز و e انرژی واحد جرم خرج است. جرم خرج را برای دیگر هندسه های ورق نیز می توان به دست آورد که در آن تنها مولفه های حجم لازم است تغییر کند. در فصل بعد، نتایج آزمونهای تجربی مربوط به چین خوردگی فلانج ورق در شکل دهی انفجاری آورده شده و با نتایج تحلیلی فصل قبل مقایسه شده و مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فشار موج ضربه را می توان با رابطه زیر فرض کرد:

$$p = p_m \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

که در آن p_m فشار بیشینه در نقطه ای از جبهه موج است، t زمان و τ یک ثابت زمانی است - زمانی است که پس از آن فشار به p_m/e افت می کند و برای مواد شدیدالانفجار حدود $30 \mu\text{sec}$ است. این حالت می تواند برای یک ورق فلزی در برابر انفجار ماده شدیدالانفجار زیر آب رخ دهد که می تواند کاربرد مخربی چون انفجار یک مین در مجاورت کشتی ها داشته و یا کاربرد سازنده ای چون فرآیندهای شکل دهی انفجاری فلز داشته باشد.

تراویس در مقاله‌ای در این باره [1] نشان داده که،

$$p_m = 22500 \left(\frac{W^{1/3}}{d} \right)^{1.13} \text{ lb/in}^2 \quad (10)$$

و

$$\tau = 73.5 W^{0.29} d^{1.4} \mu \text{ sec} \quad (11)$$

که در آن W برحسب پوند و d برحسب فوت می‌باشد.

۲-۲- محاسبه سرعت ورق در فرآیند شکل‌دهی انفجاری

یک ورق گرد نازک مسطح آزاد پشت-هوا که در برابر برخورد عمودی موج ضربه‌ای صفحه‌ای نمایی قرار گرفته در نظر گرفته می‌شود و هدف آن است که بیشینه سرعت ورق محاسبه شود. فشار موج ضربه را می‌توان با رابطه زیر فرض کرد [25]:

$$p = p_m \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

که در آن p_m فشار بیشینه در نقطه‌ای از جبهه موج است، t زمان و τ یک ثابت زمانی است- زمانی است که پس از آن فشار به p_m/e افت می‌کند و برای مواد شدیدالانفجار حدود $30 \mu \text{sec}$ است. این حالت می‌تواند برای یک ورق فلزی در برابر انفجار ماده شدیدالانفجار زیر آب رخ دهد که می‌تواند کاربرد مخربی چون انفجار یک مین در مجاورت کشتی‌ها داشته و یا کاربرد سازنده‌ای چون فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری فلز داشته باشد.

موج شوک اعمال شده منعکس شده و فرض می‌شود که ورق همواره سرعت ذرات محیط حامل موج در تماس با آن را می‌گیرد. در زمان t پس از نخستین برخورد با ورق، فشار ناشی از موج فشاری اعمال شده برابر با p و فشار ناشی از موج منعکس شده برابر با p'' است به گونه‌ای که فشار کل ورق برابر با $(p+p'')$ می‌باشد. اگر ورق به فاصله x از موقعیت اولیه خود در زمان $t=0$ حرکت کند، و m نمایانگر جرم ورق بر واحد سطح باشد، معادله حرکت بر واحد سطح برابر است با [26]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = p + p'' \quad (2)$$

با فرض اینکه موج شوک صوتی و خطی باشد (یعنی فشارهای منتقل شده خیلی زیاد نباشد) از تئوری مقدماتی موج ضربه می‌توان نوشت:

$$p = \rho_0 c_0 v \quad \text{و} \quad p'' = \rho_0 c_0 v'' \quad (3)$$

که در آن c_0 سرعت موج الاستیک در محیط حایل و v و v'' سرعتهای ذره در محل تماس ورق با ماده حایل می‌باشد؛ v و v'' در همان جهتی که امواج اعمال شده و منعکس شده حرکت می‌کنند اندازه‌گیری می‌شوند، به گونه‌ای که سرعت ورق برابر است با $dx/dt = v - v''$. بنابراین،

$$\frac{dx}{dt} = v - v'' = (p - p'') / \rho_0 c_0 \quad (4)$$

با افزودن روابط (۲) و (۴) می توان نوشت:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \rho_0 c_0 \frac{dx}{dt} = 2p \quad (5)$$

رابطه (۱) برای p در رابطه (۵) جایگذاری شده و با انتگرالگیری، سرعت ورق به صورت زیر به دست می آید:

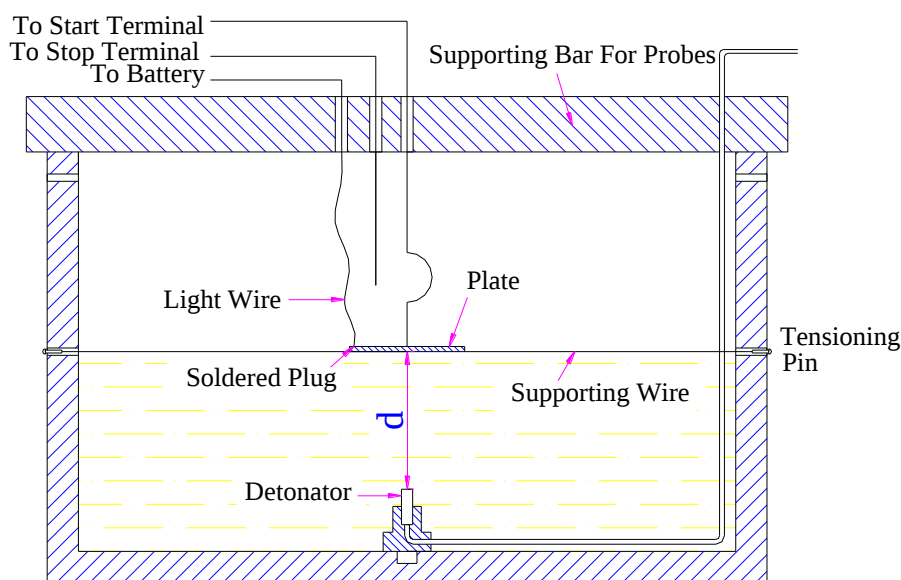
$$\frac{dx}{dt} = \frac{2p_m}{m(1-\beta)} \left[\exp\left(-\beta \frac{t}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (6)$$

و

$$p + p'' = \frac{2p_m}{(1-\beta)} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \beta \exp\left(-\beta \frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (7)$$

که در آن $\beta = \rho_0 c_0 \tau / m$ است. باید در نظر داشت که در $t=0$ ، $p + p'' = 2p_m$ ؛ این مقدار بیشترین فشاری است که بر ورق وارد می شود. فشار روی ورق زمانی که $p + p'' = 0$ باشد به صفر می رسد و از رابطه (۷) می توان زمانی که طول می کشد تا فشار موج وارد بر ورق به صفر برسد را محاسبه نمود؛ لذا،

$$t_c = \frac{\tau \ln \beta}{\beta - 1} \quad (8)$$



شکل ۵ آرایش مربوط به اندازه گیری سرعت ورق در اثر انفجار زیر آب

چنانچه فشارهای منفی یا کششی نتواند به ورق منتقل شود، بیشینه سرعت ورق را می توان با جایگذاری رابطه (۸) در رابطه (۶) به دست آورد:

$$\begin{aligned}
v_{\max} &= \frac{2p_m}{\rho_0 c_0} \frac{\beta}{1-\beta} \left[\exp\left(\frac{\beta}{1-\beta} \ln \beta\right) - \exp\left(\frac{1}{1-\beta} \ln \beta\right) \right] \\
&= \frac{2p_m}{\rho_0 c_0} \frac{\beta}{1-\beta} \left[\beta^{1/(1-\beta)} (\beta^{\beta/(1-\beta)-1/(1-\beta)} - 1) \right] \\
&= \frac{2p_m}{\rho_0 c_0} \beta^{1/(1-\beta)}
\end{aligned} \tag{9}$$

آرایش ساده‌ای برای آزمایش دقت محاسبات فوق در شکل ۵ نشان داده شده است؛ یک ورق فلزی در سطح آب درون یک مخزن قرار گرفته و در فاصله مشخص d زیر آن یک ماده منفجره به وزن W منفجر می‌شود. تراویس در مقاله‌ای در این باره [27] نشان داده که،

$$p_m = 22500 \left(\frac{W^{1/3}}{d} \right)^{1.13} \text{ lb/in}^2 \tag{10}$$

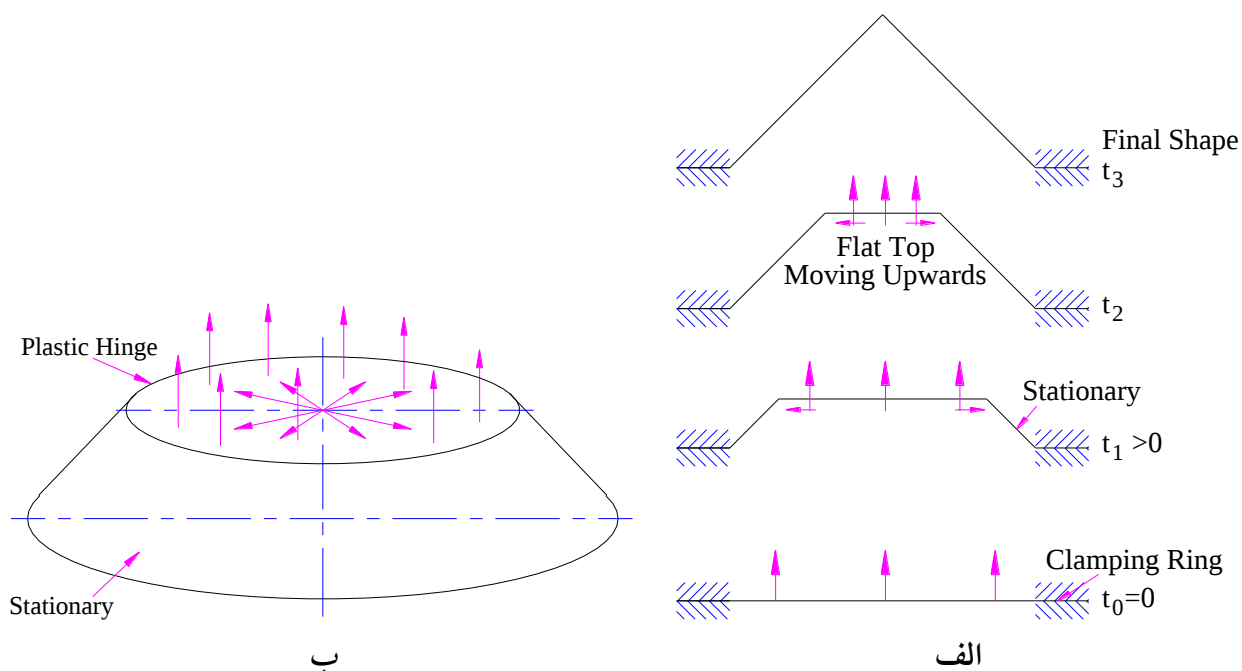
و

$$\tau = 73.5 W^{0.29} d^{1.4} \mu \text{ sec} \tag{11}$$

که در آن W برحسب پوند و d برحسب فوت می‌باشد. هنگامی که خرج منفجر می‌شود، ورق از آب جدا شده و با قراردادن یک پراب روی ورق در فاصله‌ای معین از آن، می‌توان با اندازه‌گیری زمان، سرعت متوسط ورق را اندازه‌گیری کرد. نتایج تجربی به دست آمده توسط تراویس انطباق خوبی با محاسبات فوق دارد.

۳-۲- تغییر شکل دینامیک ورقهای نازک گیره‌بندی شده در لبه بیرونی

در حالتی که ورق نازکی از لبه بیرونی گیره‌بندی شده و تحت بار فشاری دینامیکی قرار گرفته باشد، روشن است که پس از مقدار قابل توجهی تغییر شکل، پدیده اتساع و کشیدگی ورق رخ دهد. تحلیل بشقابی شدن ورقهای فلزی که از لبه گیره‌بندی شده و تحت سرعت عرضی اولیه چند صد فوت بر ثانیه قرار گرفته‌اند توسط هودسون [28] ارایه شده است. مدل هودسون را با رجوع به شکل ۶ می‌توان به سادگی به صورت توصیفی درک کرد. بخش مرکزی ورق سرعت عرضی خود را نگه می‌دارد تا آنکه موج خمشی به صورت شعاعی از لبه ورق به سمت آن حرکت کند. شکل ۶ الف آرایش توصیفی ورق را در بازه‌های زمانی در حین تغییر شکل نشان می‌دهد. مجموعه تصاویر پرسرعت گرفته شده توسط کیوتا [29] از ورق سربی که در هوا به روش انفجاری تغییر شکل پیدا کرده این مدل را تایید می‌کند. شکل ۶ ب حالتی را نشان می‌دهد که چگونه ماده در ناحیه مرکزی به صورت شعاعی کشیده و نازک می‌شود در حالیکه ناحیه مخروطی صلب و ساکن است. هنگامی که تغییر شکل ورق چشمگیر است، فرآیند عمدتاً از نوع اتساع است.



شکل ۶ آرایش توصیفی ورق در بازه‌های زمانی مختلف در شکل‌دهی انفجاری

تئوری گرنی

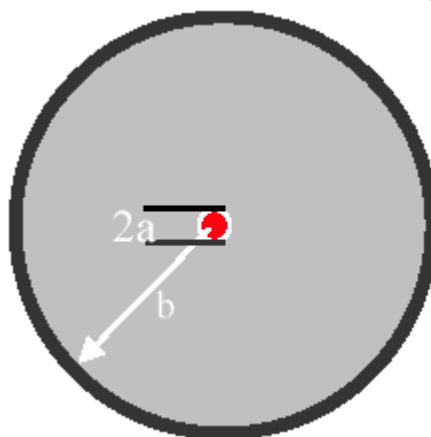
یک برآورد ساده و مرتبه اول از بیشینه سرعت ورق را می‌توان از تئوری گرنی [3] به دست آورد. این تئوری (مبتنی بر توازن انرژی) قادر است بیشینه سرعت ورق‌های فلزی شتاب گرفته در اثر انفجار را برای شکل‌های مسطح، کره و لوله محاسبه کند. سوای از انرژی ویژه ماده منفجره به کار رفته (که انرژی گرنی نوع ماده منفجره E_g نامیده شده) که به روش تجربی تعیین می‌شود، تنها نسبت جرمی خرج (C) و قطعه فلزی (M_p) مورد نیاز است. تئوری اولیه که از مرجع [3] اقتباس شده به یک استوانه کاملاً پر شده از خرج بر می‌گردد. به دلیل وجود آب این تئوری باید اندکی تغییر کند که منجر به رابطه (۱) می‌شود. به این ترتیب سرعت ورق همچنین به جرم آب، شعاع داخلی (a) و خارجی (b) استوانه آب بستگی دارد (شکل ۱ را ببینید).

بسته به فاصله توقف و شکل خرج زیر آب (متمرکز یا خرج طولی) آب تحت شوک شکل کره یا استوانه به خود می‌گیرد. برای مثال، سرعت بیشینه یک استوانه آلومینیومی با شعاع (b_0) 90 mm، ضخامت جداره 2.5 mm و ارتفاع 250 mm محاسبه می‌شود. استوانه با آب پر شده و کورد انفجاری در محور تقارن آن قرار می‌گیرد (چگالی خطی آن 12 g/m از ماده منفجره PETN با شعاع a_0 4 mm است). نخست باید سرعت گرنی PETN را یافت؛ با مراجعه به منابع

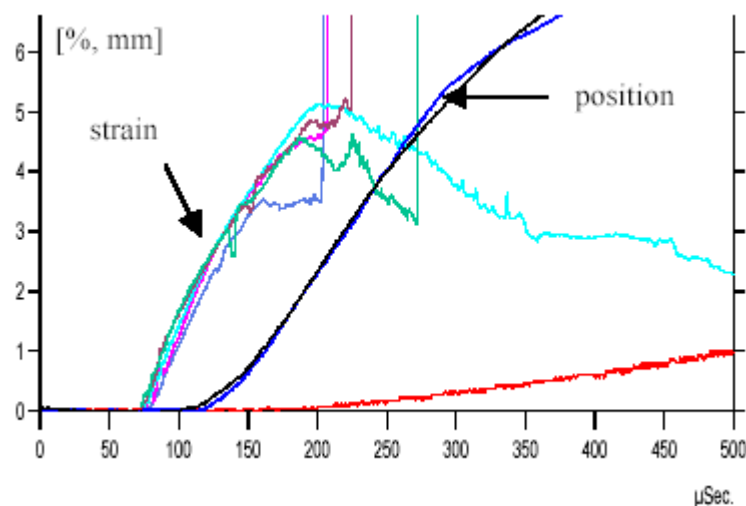
$\sqrt{2E_{g,PETN}}$ برابر **2930 m/s** به دست می‌آید [3]. سپس جرم ورق و آب تحت شوک بایستی محاسبه شود. اگرچه برای ورقهای نازک و فاصله‌های توقف معمولی ($50\text{mm} <$)، جرم آب تحت شوک بسیار بیشتر از جرم ورق بوده و حد بالایی سرعت ورق می‌تواند تنها با استفاده از جرم آب تحت شوک به دست آید. در این حالت موردنظر، استوانه فلزی شکل‌دهی آزاد (بدون قالب) داشته و کاملاً خرج انفجاری را دربرمی‌گیرد. بنابراین بازدهی فرآیند شکل‌دهی بالا خواهد بود. کورد انفجاری یک جبهه شوک استوانه‌ای در آب ایجاد می‌کند که سرعت انتشار آن متناسب با $1/r$ است. حداکثر سرعت آب در محل تماس آب با محصولات انفجار ایجاد می‌شود. آب در این استوانه جرمی برابر **6.4 kg** دارد. جرم استوانه آلومینیومی M_p حدود **1 kg** است. جرم خرج تنها **3 گرم** ($0.25\text{ m} \times 12\text{ g/m}$) است.

$$V_p = \sqrt{2E_g} \left(\frac{M_p}{C} + \frac{M_w}{C} \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \right)^{-1/2} \quad (1)$$

با استفاده از رابطه (۱) سرعت بیشینه اولیه ورق برابر **34 m/s** به دست می‌آید. با انبساط استوانه، توزیع انرژی جنبشی در آب به ورق شتاب بیشتری می‌دهد. در انبساط شعاعی **10 mm** سرعت ورق برابر **43 m/s** است. سرعت اولیه ورق نزدیک **30 m/s** است که به صورت تجربی و با استفاده از روشهای کرنش سنجهای نصب شده بر روی استوانه‌های در حال انبساط و اندازه‌گیری موقعیت صفحه مثلثی لیزری اندازه‌گیری شده است. موقعیت دهنده‌های لیزری مبتنی بر اندازه‌گیری موقعیت بازتاب نور لیزر از سطح ورق (متحرک) عمل می‌کنند.



شکل ۱ آرایش طرحوار شکل‌دهی انفجاری یک استوانه فلزی پر شده از آب (به جرم M) با کورد انفجاری (به جرم C) و فاصله توقف R .

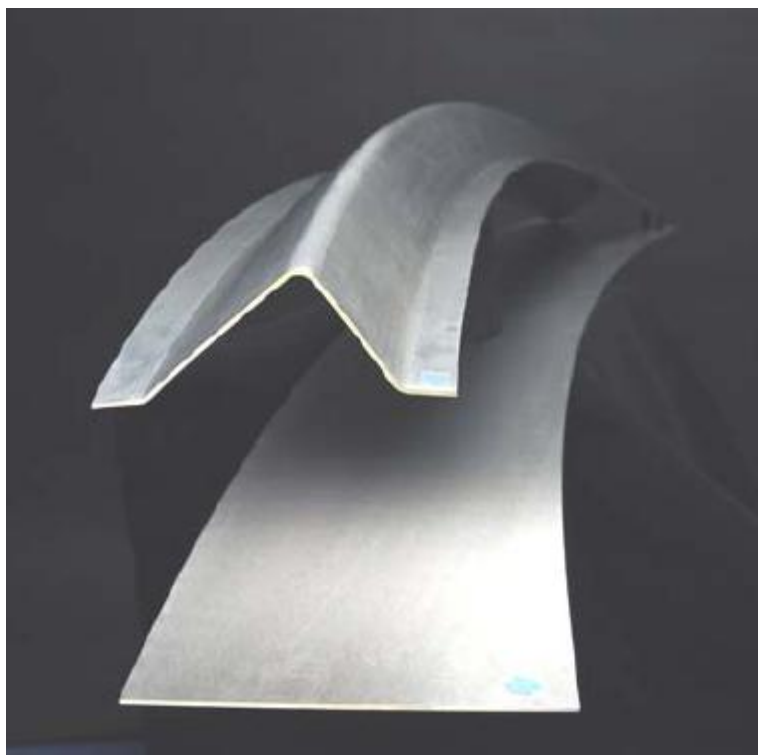


شکل ۲ نتیجه اندازه گیریهای کرنش و موقعیت ورق با استفاده از کرنش سنج و بازتاب لیزر در شکل ۲ نتایج اندازه گیریها ارایه شده است. هر سه کرنش سنج تقریباً به یک میزان کرنش و نرخ کرنش را اندازه گیری کرده اند و دو مکان یاب لیزری مثلی نیز با هم نتیجه یکسانی را نشان می دهند. مکان یاب سوم به دلیل تنظیم نادرست نتایج خوبی نداده است. از شیب خطوط (کرنش و مکان برحسب زمان) می توان نرخ کرنش ($375 s^{-1}$) و سرعت ورق ($30 m/s$) را به دست آورد. سرعت محاسبه شده ورق چندان دور از انتظار نیست اما حد بالایی آن است. اندازه گیریها شتاب گیری بیشتر ورق فلزی را در طی انبساط استوانه نشان نمی دهد. این امر احتمالاً به خاطر گریز انرژی از سیستم استوانه آب است که البته آن هم به دلیل نسبت اندک طول به قطر استوانه به کار رفته چیز عجیبی نیست.

همینکه (حد بالایی) سرعت بیشینه ورق مشخص شد، می توان نرخ کرنش و انرژی جنبشی ورق را برآورد کرد. با دانستن کرنش مورد نیاز برای پیش فرم فلز برای رسیدن به شکل مورد نظر (قالب) و تنش تسلیم فلز، انرژی مورد نیاز برای شکل دهی را می توان با انرژی جنبشی موجود فلز مقایسه کرد. در بسیاری از حالتها، شکل نهایی را تنها در دست کم دو مرحله شکل دهی انفجاری می توان به دست آورد، یک مرحله شکل دهی و یک مرحله کالیبراسیون. مثالها

پژوهشی درباره شکل دهی انفجاری مقاطع یک رینگ تقویت کننده AA2024 از قاب موتور اصلی فضاییمای آریان ۵ انجام شده است. روش تولید متداول آن عبارت است از چکش کاری با استفاده از قالبهای (سربی) متعدد هنگامی که آلیاژ در شرایط بازپخت شده قرار دارد. پس از آن قطعه باید تحت عملیات حرارتی قرار گرفته تا به شرایط پیرسختی پراستحکام (T3) برسد.

با روش شکل‌دهی انفجاری می‌توان این آلیاژ را مستقیماً در شرایط **T3** شکل داده و تنها یک نیمه از قالب مورد نیاز می‌باشد. مقطع رینگ شکل‌دهی شده به روش انفجاری به همراه ورق اولیه آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ مقطع رینگ شکل‌دهی شده به روش انفجاری به همراه ورق اولیه آن (**AA2024-T3**) نمونه دیگری از شکل‌دهی انفجاری قطعات هوافضایی مربوط به شکل‌دهی میکسر گاز موتورهای توربین گاز است. این قطعه نوعاً با جوشکاری تعداد زیادی از تکه‌های شکل‌دهی شده به روش گرم (هر کدام شامل یک چین) تولید می‌شود. البته این قطعه با انحنای دوگانه تنها از یک ورق مسطح با شکل‌دهی انفجاری می‌تواند تولید شود (شکل ۴ را ببینید). ماده خام آن یک دیسک مدور است که به طور ساده‌ای خم می‌شود تا تعداد چین مورد نیاز را به خود بگیرد (شکل ۴ الف). این ورق شکل داده شده درون یک قالب که شکل انحنای دوگانه دارد قرار می‌گیرد. توسط شکل‌دهی انفجاری با یک خرج انفجاری محوری زیر آب، شکل نهایی به دست می‌آید (شکل ۴ ب). این روش تولید بسیار ساده بوده و از ایجاد تعداد زیادی خط جوش پرهیز می‌شود.



ب



الف

شکل ۴ میکسر گاز برای خروجی توربین گاز تولید شده با شکل دهی انفجاری (ب) با استفاده از یک دیسک پیش شکل داده شده (الف). (با تشکر از شرکت **Exploform BV**)
 برای محاسبات مهندسی فرآیند شکل دهی، سرعت ورق را می توان با استفاده از تئوری گرینی برآورد کرد. در این تئوری باید جرم آب و توزیع سرعت آن در نظر گرفته شود.

فصل چهارم

تحلیل موج بلاست انفجار در
محیطهای هوا و آب

۳-۳- استخراج پارامترهای موج بلاست خرج انفجاری هگزوژن در انفجار در محیط آب

مطالعه رفتار موج بلاست و پارامترهای آن در انفجار زیر آب موضوعی است که همواره مورد توجه جامعه علمی شکل‌دهی مواد و طراحان کشتی بوده است. همچنین انفجارهای زیر آب خطرات بالقوه‌ای برای تجهیزات زیر آب یا سکوهاست استخراج نفت و گاز به شمار می‌رود. در این بخش، ابتدا تکنیکهای محاسبه پارامترهای بلاست میدان باز مانند فشار و ایمپالس در انفجارهای زیرسطحی واقع در آب بررسی شده است. سپس، نتایج تجربی به دست آمده برای پارامترهای موج بلاست انفجارهای زیرسطحی نمونه‌های خرج انفجاری هگزوژن ارایه و تحلیل شده است. در این پژوهش، جزئیات منحنی‌های پالس فشار در اثر انفجار زیر آب در فواصل مختلف به دست آمده که می‌توان با استفاده از قوانین مقیاس‌گذاری، از آنها در تحلیل کلیه مسایل و پدیده‌های انفجار زیر آب استفاده کرد. در نهایت، جرم معادل ماده منفجره هگزوژن نسبت ماده منفجره متداول تی‌ان‌تی در شرایط انفجار زیر آب محاسبه شده است.

۳-۳-۱- بررسی مبانی تئوری تحلیل موج ضربه در محیط آب

مطالعه اثرات انفجار زیر آب از زمانی که امکان‌پذیری فرآیند انفجار زیر آب مشخص گردید آغاز شد [۱۱۸]. کیل [۱۱۹] گزارش کرده که نخستین آزمایشها طی سالهای ۱۸۷۰-۱۸۸۰ انجام شد و تلاش برای اندازه‌گیری شدت فشار در نقاط مختلف آب صورت گرفت.

چنگوئینگ و هاو [۱۲۰] اثبات کردند که کارهای تحلیلی-عددی در بررسی پدیده انفجار زیر آب با توجه به ماهیت پیچیده این فرآیند، بسیار دشوار بوده و تنها با فرضیات ساده کننده و تقریبات و خطاهای فراوان می‌توان این پدیده را به صورت تحلیلی یا عددی بررسی کرد. برای نخستین بار ریلی با فرض تراکم‌ناپذیر بودن سیال اطراف حباب به بررسی تحلیلی انفجار زیر آب پرداخت. تیلور و شیفمن نیز با استفاده از معادله انرژی، معادله حرکت حباب ناشی از انفجار در آب را استخراج نمودند که شامل هر دو حرکت انقباضی و انبساطی حباب بود. پلست نیز با استفاده از معادله برنولی و معادله پتانسیل سرعت ناشی از یک منبع در داخل سیال تراکم‌ناپذیر، معادله حرکت انقباضی-انبساطی حباب را به دست آورد [۱۲۱].

پژوهشگران دیگری نیز با فرض تراکم‌پذیر بودن سیال اطراف حباب به بررسی آن پرداختند. هرینگ نخستین کسی بود که با فرض تراکم‌پذیری و انتگرال‌گیری از معادلات ناویر-استوکس در مختصات

کروی و در جهت شعاع توانست معادله و تئوری خود را ارایه کند. کرک‌وود و بث [۱۲۲] با استفاده از فرضیه موج شوک معادله‌ای را ارایه کردند.

از سوی دیگر، ماهیت پدیده انفجار بسیار پیچیده بوده و نتایج تحلیلهای تئوری و عددی در این زمینه به ضرایب متعددی وابسته است. این ضرایب نوعاً متأثر از پارامترهایی مانند چگالی خرج انفجاری، شکل هندسی آن، نوع و ترکیب ماده انفجاری و نحوه دانه‌بندی آن است. از اینرو، همچنان برآورد پارامترهای موج شوک به روشهای تحلیلی یا عددی، به دلیل ماهیت بسیار پیچیده این مساله، معتبر و قابل اعتماد نبوده و با نتایج آزمونهای تجربی سازگاری دقیقی ندارد [۱۲۰]. در این بخش توالی وقایع انفجار زیر آب مورد بررسی قرار گرفته و یکسری روشهایی که امکان استفاده از تمامی این پارامترهای بلاست میدان باز را با استفاده از مقیاس کردن از داده‌های تجربی موجود می‌دهد توصیف شده است.

هدف از تحلیل پدیده انفجار زیر آب عبارت است از تعیین فرافشار موج ضربه و ایمپالس مثبت برحسب توابعی از عمق هدف و فاصله شعاعی از نقطه انفجار. پارامترهای محاسبه شده مورد نیاز برای انفجارهای زیر آب شامل فرافشار و ایمپالس مثبت کل برای موج ضربه و فازهای ضربان حباب^۱ است. این پارامترها لازم است به صورت توابعی از فاصله از نقطه انفجار تعیین شوند. برای این منظور یکسری آزمونهای اندازه‌گیری منحنی فشار-زمان تجربی برای نمونه‌های خرج انفجاری هگزوژن در فواصل گوناگون به دست آمده که نتایج آنها در این بخش مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین، این داده‌های تجربی با روابط تجربی موجود از خرج انفجاری تی‌ان‌تی مقایسه شده و جرم معادل ماده منفجره هگزوژن نسبت ماده منفجره متداول تی‌ان‌تی در شرایط انفجار زیر آب به دست آمده است.

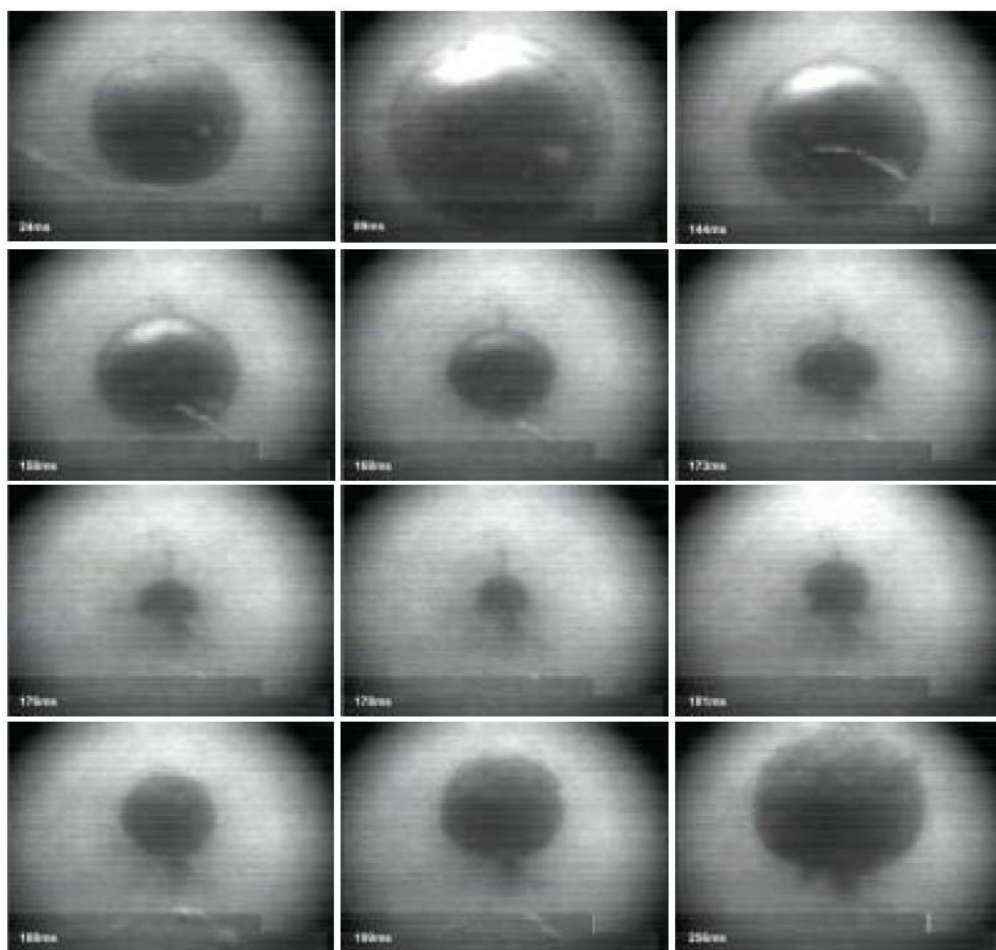
۳-۳-۲- موج شوک

واکنش انفجار خرج منفجره در زیر آب سبب شکسته شدن مولکولهای خرج به مولکولهای محصولات انفجار (از قبیل گازهای H_2 , CH_4 , NO , CO_2 , CO و مواد جامد C , Pb و Al_2O_3) و ایجاد مقادیر زیادی حرارت (1050 kcal به ازای یک کیلوگرم خرج TNT) می‌شود. دمای گازهای حاصله در مجاورت نقطه انفجار، در مرتبه 3000 درجه سلسیوس و فشار آن حدود 5000 MPa است [۱۲۳].

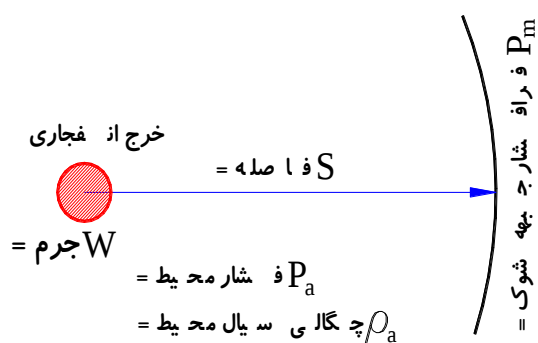
¹ Bubble pulsation

برای یک خرج منفجره معین با ابعاد مشخص، بازدهی انتقال انرژی حاصل از انفجار تا حد زیادی به خواص محیط ناقل انرژی بستگی دارد. آب به دلیل ماهیت تراکم‌ناپذیری آن، بازدهی انتقال انرژی انفجاری بسیار بالاتری نسبت به هوا دارد. در فرآیند انفجار زیر آب، با انفجار خرج منفجره، حباب گاز پرفشاری تولید می‌شود. در اثر تشکیل حباب گاز، یک موج شوک اولیه در آب مجاور حباب تشکیل می‌شود. این شوک در فاصله کوتاهی از منبع آن حدود ۵۰ درصد از انرژی کل خرج را دربر دارد. حباب گاز منبسط می‌شود تا فشار درون آن به زیر فشار آب اطراف کاهش پیدا کند. در نهایت فرآیند انبساط متوقف شده و حباب شروع به منقبض شدن می‌کند تا به ابعاد کمینه خود برسد. هنگامی که فشار به اندازه کافی افزایش می‌یابد کوچک شدن حباب متوقف می‌گردد. با توجه به اینکه فشار حباب از فشار محیط بیشتر شده مجدداً انبساط حباب انجام می‌شود. در ابتدای انبساط دوم، موج شوک ثانویه‌ای در آب ایجاد می‌شود. موج شوک ثانویه هرگاه که حباب به اندازه کمینه برسد آزاد می‌شود که تنها بخش کوچکی از کل انرژی را حمل می‌کند. فرآیند ضربان حباب در شکل ۳-۴ نشان داده شده است [۱۲۴]. برای آنکه بارگذاری مجدد رخ دهد، ارتفاع آب روی خرج باید بیش از دو برابر فاصله از محل انفجار باشد. در غیر این صورت حباب گاز در سطح آب می‌ترکد و فرآیند انتقال انرژی متوقف می‌شود.

در این مساله، پنج متغیر وجود دارد که عبارتند از وزن خرج، W ، فاصله از خرج، S ، چگالی سیال محیط، ρ_a ، فشار سیال محیط، P_a ، و فرافشار موج، P_m (شکل ۳-۵). بعدهای این پارامترها به ترتیب عبارتند از، FT^2/L ، L ، FT^2/L^4 ، F/L^2 و F/L^2 . ملاحظه می‌شود که تنها سه بعد وجود دارد، از اینرو باید دو متغیر بی‌بعد تشکیل داد که عبارتند از (P_m/P_a) و $(S^3\rho_a/W)$.



شکل ۳-۴ ضربان حباب در انفجار زیر آب [۱۲۴].



شکل ۳-۵ پارامترهای تحلیلی ابعادی و مقیاسی در انفجار زیر آب [۱۲۸].

با توجه به تراکم ناپذیری آب به عنوان سیال محیط و ثابت بودن چگالی آن ρ_a می‌توان متغیرهای بی‌بعد را به صورت (P_m/P_a) و $(S^3\rho_a/W)$ بازنویسی کرد. بنابراین تابع مقیاسی به صورت زیر بیان می‌شود

$$(P_m/P_a) = f(S/W^{1/3}) \quad (۳-۲)$$

سرعت انتشار موج شوک، در محدوده ۱۰ برابر شعاع خرج سریعاً به سرعت صوت در آب (حدود 1440 m/s) افت می‌کند [۱۲۵]. موج شوک ایجاد شده زیر آب با فشار هیدرواستاتیک ترکیب می‌شود. تابع فشار برحسب زمان، $p(t)$ ، در یک نقطه ثابت با افزایش ناگهانی فشار به مقدار بیشینه، P_m ، (در مرتبه 10^{-7} s) آغاز شده و با افتی که بخش اول آن با رابطه نمایی زیر (رابطه کول) تقریب زده می‌شود همراه است [۱۲۶]

$$p(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (3-3)$$

که در آن θ زمان افت بوده و رابطه فوق برای $0 < t < \theta$ معتبر است. فرافشار و ثابت افت بستگی به اندازه خرج و فاصله توقف اندازه‌گیری فشار از آن دارد [۱۲۶].

$$P_m = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{1.13} \quad (4-3)$$

$$\theta = 96.5 (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{-0.22} \quad (5-3)$$

که در آن P_m برحسب MPa، θ برحسب میکروثانیه، W برحسب kg ماده منفجره TNT و فاصله توقف، S ، برحسب متر است. این روابط برای هر نوع اندازه خرج، از ابعاد کوچک تا انفجارهای مهیب که در هر عمقی منفجر شده باشد به کار می‌رود و به غیر از منطقه مجاور خرج (تا ۱۰ برابر شعاع خرج)، که در آن فرافشار بیشتر از مقداری است که این رابطه پیش بینی می‌کند، موج شوک را به خوبی توصیف می‌کند. همچنانکه موج شوک از موقعیت ثابتی عبور کرده و مایع آن نقطه را در معرض فشار گذار $p(t)$ قرار می‌دهد، مایع به صورت لحظه‌ای در معرض جریانی با سرعت $v(t)$ در جهت موج قرار می‌گیرد که رابطه آن با فشار گذار به صورت زیر است [۷۰]:

$$p(t) = \rho c v(t) \quad (6-3)$$

با در نظر گرفتن جریان کروی، رابطه فوق اصلاح شده و به صورت زیر در می‌آید

$$v(t) = \frac{p(t)}{\rho c} + \frac{1}{\rho S} \int_0^t p(t) dt \quad (7-3)$$

عبارت نخست، سرعت موج تخت و عبارت اصلاحی، مربوط به «پس-جریان» است. عبارت پس-جریان در نزدیکی انفجار و نیز در بازه‌های زمانی بزرگ قابل توجه است. انرژی موج شوک انفجار متشکل از دو مولفه یکسان است، یکی مربوط به تراکم آب و دیگری مربوط به جریان ناشی از آن است. چگالی انرژی موج شوک E_{sh} برای موج شوک صفحه‌ای عبارت است از [۷۰]

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^t p^2(t) dt \quad (8-3)$$

برای یک موج شوک کاملاً نمایی

$$E = \frac{1}{\rho c} P_m^2 \theta \quad (9-3)$$

کارایی موج شوک بیشتر بستگی به انتگرال زمانی فشار، یا همان ایمپالس داشته تا شکل دقیق منحنی فشار برحسب زمان. ایمپالس واحد سطح جبهه موج شوک در زمان t از ورود آن با رابطه زیر بیان می‌شود [۷۰]

$$I = \int_0^t p(t) dt \quad (10-3)$$

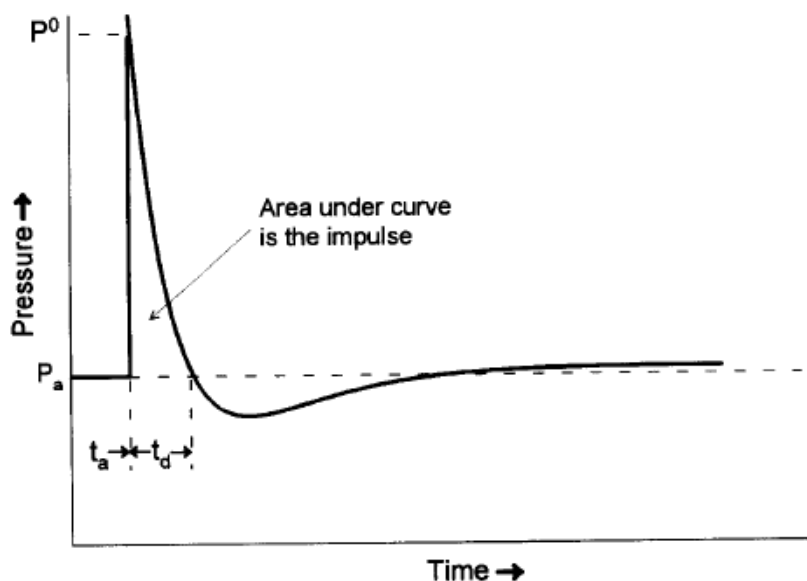
به صورت دقیق، فشار $p(t) - p_0$ که بدون اثر فشار هیدرواستاتیک است باید در این رابطه به کار رود. اما برای بسیاری از موارد، فشار موج شوک $p(t)$ به اندازه‌ای بزرگ است که این اختلاف اهمیتی ندارد. انرژی برای کل طول موج شوک برآورد شده و ایمپالس تا زمان $t = 6.7\theta$ انتگرال‌گیری شده و با رابطه زیر بیان می‌شوند

$$E_{sh} = 98000 (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{2.1} \quad (11-3)$$

$$I = 5760 (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{0.891} \quad (12-3)$$

که در آن E برحسب J/m^2 و I برحسب Ns/m^2 است.

شکل موجی که در نمودار شکل ۳-۶ نشان داده شده برای امواجی که در فاصله‌ای از خرج قرار گرفته‌اند متداول است. بخش منفی موج در اثر اینرسی ماده محیط ناقل انرژی که در جهت انفجار شتاب گرفته ایجاد می‌شود. زمانی که فاز مثبت موج عبور می‌کند، این جرم ماده توسط ماده ساکن پشت آن به عقب کشیده می‌شود.

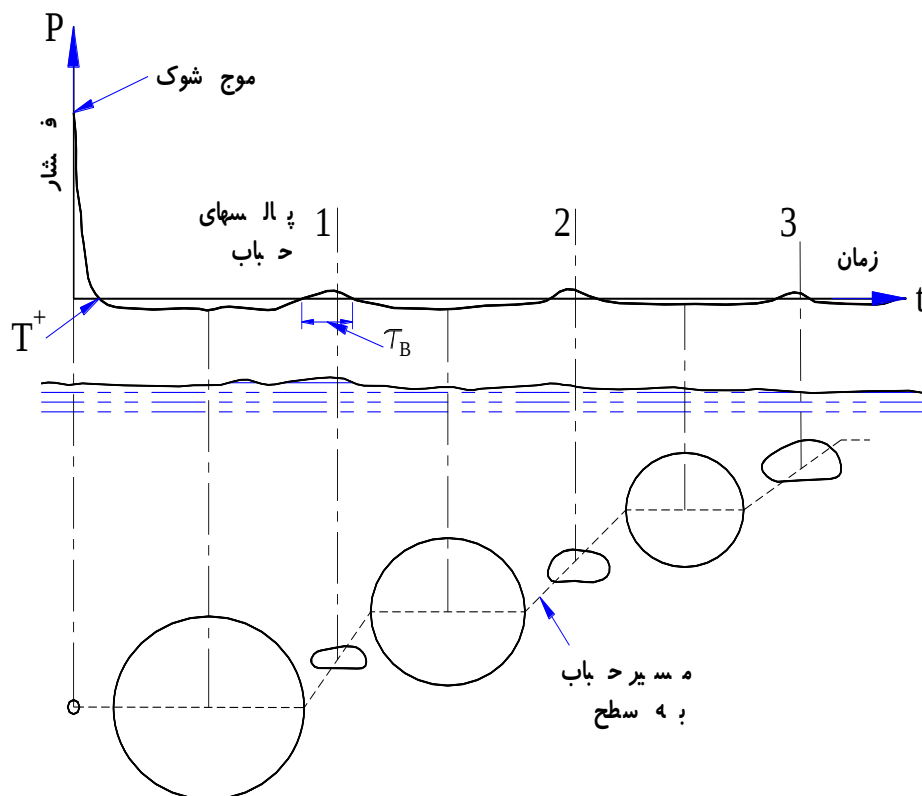


شکل ۳-۶ طرح منحنی موج شوک ایجاد شده در محیط ناشی از انفجار [۱۲۸].

۳-۳-۳- حباب گاز

فشار گاز اولیه پس از انتشار بخش اصلی موج شوک به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد، ولی همچنان بیشتر از فشار هیدرواستاتیک تعادلی است. در اثر انفجار یک چاشنی^۱ به عنوان خرج، تا ۱۲ مرتبه ضربان حباب گاز مشاهده شده است [۱۲۷]. نخستین پالس حباب می‌تواند فرافشاری در حدود ۱۰-۱۵ درصد از فرافشار موج شوک داشته باشد. طی فرآیند ضربان، حباب در اثر تاثیر گرانش به سمت بالا حرکت می‌کند که بیشترین سرعت حرکت آن مواقعی است که حباب حداقل ابعاد را داشته باشد (شکل ۳-۷) [۱۲۵].

¹ Initiator



شکل ۳-۷ تغییرات حباب گاز ناشی از انفجار و اثر آن بر پالس فشار [۱۲۹].

حباب گاز ایجاد شده در اثر انفجار طی فرآیند انبساط و انقباض اولیه تقریباً کروی است. دو پارامتر مشخصه عبارتند از شعاع بیشینه R_{max} در نخستین ضربان و مدت زمان ضربان T (از لحظه انفجار تا نخستین انقباض بعدی). هر دو پارامتر با اندازه خرج انفجاری و عمق به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$R_{max} = 3.3 \left(\frac{W}{Z} \right)^{1/3} \quad (۳-۱۳)$$

$$T = 2.08 \frac{W^{1/3}}{Z^{5/6}} \quad (۳-۱۴)$$

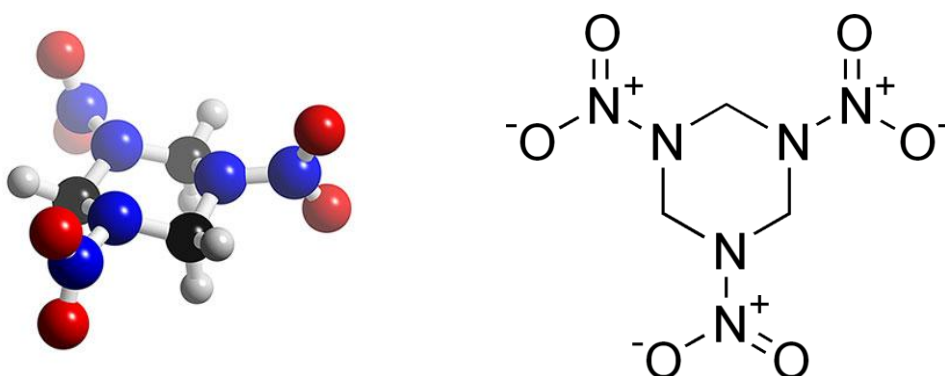
که در آن $Z = D + 10$ بیانگر فشار استاتیکی کل در موقعیت خرج است. در اینجا D عمق انفجار برحسب متر است. نمودگرافی توسط کیل [۱۱۹] بر اساس داده‌های تجربی برای تعیین بیشینه شعاع حباب گاز و مدت زمان نخستین ضربان حباب تهیه شده است.

۳-۳-۴- اندازه‌گیری تجربی موج بلاست برای خرج هگزوزن

در این پژوهش در استخر آبی به ابعاد $۴*۴*۴$ متر، یکسری آزمون انفجاری برای اندازه‌گیری پارامترهای موج بلاست خرج انفجاری هگزوزن^۱ یا سیکلونیت^۱ (با نام شیمیایی سیکلوتتری متیلن-

^۱ Hexogen

تری نیترامین) یا RDX با فرمول شیمیایی $C_3H_6N_6O_6$ انجام شد (شکل ۸-۳). همانگونه که پیشتر نیز اشاره شد، داده‌های تجربی پارامترهای موج بلاست تنها برای خرج انفجاری TNT در منابع گزارش شده است. در عین حال این داده‌ها عمدتاً در حدود ۶۰ سال پیش توسط کول [۱۲۶] یا ۴۰ سال پیش توسط سویسداک [۱۲۸] تهیه شده که با توجه به فناوری قدیمی مورد استفاده در آن زمان دارای یکسری محدودیتها و کاستی‌هایی می‌باشد. از جمله این محدودیتها، می‌توان به عدم ثبت دقیق نمودار فشار-زمان خرج انفجاری اشاره کرد. لازم به ذکر است که طبق گزارش مرجع [۱۲۰]، به دلیل پیچیدگیهای بسیار زیاد این مساله، هنوز نمی‌توان با نتایج شبیه سازی از هیدروکدها جزئیات پالس موج بلاست را به دست آورد. خرج هگزوزن یا سیکلونیت یکی از مواد منفجره شدیدالانفجار بوده که کاربرد صنعتی و نظامی زیادی دارد. خواص انفجاری این خرج، همانند سایر مواد منفجره، وابسته به پارامترهایی چون جرم، چگالی، شکل هندسی، نوع دانه‌بندی و درصد ترکیب شیمیایی آن است.



شکل ۸-۳ ساختار فرمول شیمیایی خرج انفجاری هگزوزن (سیکلونیت) [۱۶].

بررسی اثرات انفجار در محیطهای هوا و آب

احسان کوثری نیا

صنایع شهید نوری، معاونت طراحی و تحقیقات

در این گزارش امواج انفجار یا ضربه در هوا و آب مورد بررسی قرار گرفته و چگونگی پیش بینی رفتار موج به عنوان تابعی از شدت انفجار (وزن خرج) و فاصله از انفجار مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

¹ Cyclonite

مقیاس کردن موج شوک در هوا

غالباً موج شوک در هوا با وزن معادل TNT مقیاس می‌شود که البته به ندرت نیز بر اساس ابعاد خطی خرج انفجاری نیز روش مقیاس اعمال شده است [۱]. مقدار معادل TNT بر اساس انرژی انفجار حاصل از روشهای مختلف به دست می‌آید. روش ترجیحی آن محاسبه تابع کار هیدرودینامیک یا ترمودینامیک است. رابطه وزن معادل TNT به صورت زیر بیان می‌شود

$$w(TNT\ equiv) = w(HE) \times E_{exp}(HE) / E_{exp}(TNT) \quad (۱)$$

سایر روشهای برآورد معادل TNT مبتنی بر مشابه سازی یا آزمونهای تجربی است. یکی از قدیمی ترین روشهای استفاده شده به اواخر قرن نوزدهم بر می‌گردد که توسط برثلوت، یکی از پیشگامان تئوری انفجار، توسعه داده شد. برثلوت بر روی TNT کار نکرد، بلکه روشی برای مشابه سازی انفجارهای فاز گازی با نیتروگلیسرین ارایه کرد. بعد از آن در اوایل قرن بیستم سایر پژوهشگران روش او را به TNT تبدیل کردند [۲].

$$\%(TNT\ equiv) = 840 \times \Delta n(-\Delta H_R^0) / (FM)^2 \quad (۲)$$

که در آن Δn تعداد مولهای گازهای حاصل از انفجار یک مول خرج انفجاری (آب به عنوان یکی گازهای محصول انفجار در نظر گرفته می‌شود)؛ ΔH_R^0 گرمای مولی انفجار (kJ/mole) و FM وزن فرمولی یا مولکولی خرج مورد نظر است. محاسبات برثلوت را می‌توان هم در شرایط دتوناسیون و هم در شرایط گلوله آتش انجام داد، که هر کدام بیانگر کاربرد خاص خود است.

برای مقایسه، انرژی کل حاصل از انفجار TNT بر اساس محاسبه با تابع کار ترمودینامیک برابر 1160 cal/g است. برآورد این انرژی از تابع کار هیدرودینامیک با استفاده از رابطه

$$\left(\frac{1}{2}\right)P_{CJ} / \rho_{CJ} \quad \text{مقدار } 1080 \text{ cal/g را برای TNT به دست می‌دهد. از محاسبه انرژی انفجار بر}$$

مبنای تعداد زیادی از آزمونهای انفجار TNT در هوا، مقدار 1120 cal/g به دست می‌آید [۳].

با استفاده از برآورد هیدرودینامیک از $(1/2)P_v$ در وضعیت CJ و نیز فرض آنکه $P_{CJ} = \rho_0 D^2 / 4$ ، می‌توان برآورد ساده‌ای از معادل TNT به دست آورد. از آنجا که حجم مخصوص v و چگالی ρ عکس یکدیگراند،

$$\frac{1}{2}(Pv)_{CJ} = P_{CJ} / 2\rho_{CJ} \quad (۳)$$

در وضعیت CJ می‌توان نوشت:

$$P_{CJ} = \rho_0 D^2 / 4 \quad \text{و} \quad \rho_{CJ} = \frac{4}{3}\rho_0 \quad (۴)$$

لذا،

$$\frac{1}{2}(Pv)_{CJ} = 3D^2 / 32 \quad (5)$$

و از آنجا رابطه معادل TNT به صورت زیر در می آید

$$TNT \text{ equivalent} = \frac{1}{2}(Pv)_{CJ}(HE) / \frac{1}{2}(Pv)_{CJ}(TNT) = D^2(HE) / D^2(TNT) \quad (6)$$

در رابطه فوق D سرعت دتوناسیون است. اگر از TNT با چگالی 1.64 g/cm^3 به عنوان معیار مقایسه استفاده شود، در این صورت $D(TNT)$ برابر با 6.95 km/s بوده و رابطه معادل TNT به صورت $D^2(HE)/48.3$ در می آید. در جدول ۱ مقادیر معادل TNT برای خرجهای مختلف و روشهای گوناگون محاسبه معادل جهت مقایسه ارائه شده است.

تمامی روشهای محاسباتی، انرژی بالقوه حاصل از خرج را به دست می دهد. البته، همیشه نمی توان به همه این انرژی دست یافت. مقدار انرژی حاصل از خرج بین موج شوک و کار دیگری که انفجار خرج در همان لحظه انجام می دهد تقسیم می شود. مثالی از این مورد، خرج قرار گرفته در یک محفظه است. به عنوان مثال، خرج استوانه ای از TNT که در محفظه فولادی و به نسبت جرم فلز به خرج یک (که برای بمبهای ترکشی نسبت متداولی است) قرار گرفته، در نظر گرفته می شود. پس از انفجار، خرج منبسط شده و محفظه فولادی را به ترکش تبدیل می کند. انرژی به سه صورت به فولاد منتقل می شود: تغییر شکل و شکست، گرمایش شوک، و انرژی جنبشی ترکشها. برهم کنش انفجار با فولاد شوکی در مرتبه 32 GPa تولید می کند. این مساله باعث گرم شدن فولاد تا حدود 300 درجه سانتیگراد شده که به ازای هر گرم فولاد 35 کالری گرما می گیرد. انرژی کرنشی فولاد (بسته به نوع آلیاژ آن) می تواند در حدود 25 تا 150 cal/g باشد. ترکشها (بر اساس روابط کرنی) با سرعت 1.87 km/s پرتاب شده که انرژی جنبشی آنها حدود 415 cal/g است. بنابراین، انرژی حاصل از انفجار یک گرم TNT برابر 1159 cal/g است که مجموعاً 500 cal/g از آن به فولاد منتقل شده است. به این ترتیب تنها 660 cal/g از انرژی به شکل موج ضربه به هوا منتقل می شود. در این حالت تقریباً نیمی از انرژی به موج شوک تبدیل نمی شود. از جمله دیگر موارد افت انرژی می توان به تشکیل حفره در انفجارهای نزدیک سطح زمین اشاره کرد.

جدول ۱ مقایسه روشهای برآورد معادل TNT با نتایج آزمایش [۳، ۴]

پیکرات آمونیم	HBX-3	دینامیت نظامی	پتولیت (۵۰/۵۰)	تورپکس	تریتونال
1.55	1.81- 1.84	1.1-1.3	1.66	1.81	1.72
چگالی (g/cm^3)					

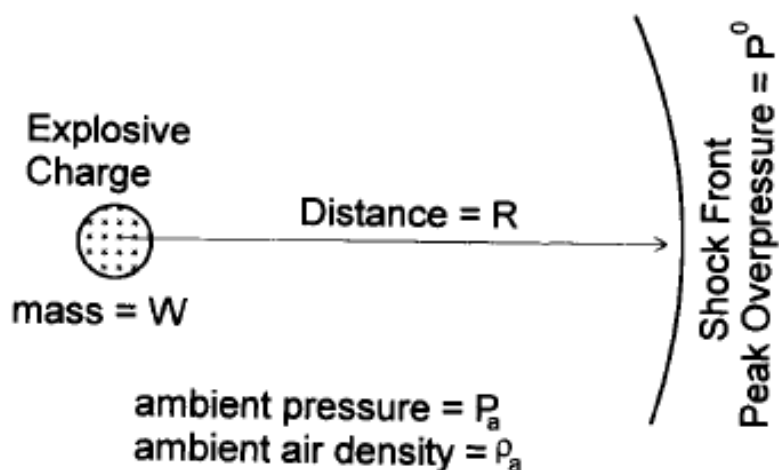
6.475- 6.70	7.6	7.465	6.6-7.2	6.92- 7.01	6.85	سرعت دتوناسیون (km/s)	معادل TNT
0.87- 0.93	1.20	1.15	0.9- 1.07	0.99- 1.02	0.97	$D^2 / 48.3$	
0.89	1.18	1.56	- - -	1.10	0.87	روش برثلوت	
1.07	1.23	1.16	1.05	1.16	0.85	آزمون انفجار در هوا	
1.24	1.38	1.26	1.22	1.11	0.99	آزمون خمپاره بالستیک	
0.93	1.20	1.21	- - -	- - -	0.91	آزمون حفره صفحه	
- - -	1.24	1.16	- - -	0.94	0.82	آزمون فشرده‌گی ماسه	
1.25	1.64	1.22	1.10	- - -	- - -	آزمون ترازول	

با وجود آنکه در انفجار سطح الارضی بخشی از انرژی در اثر تشکیل حفره و انرژی جنبشی پرتاب ذرات خاک از دست می‌رود، ولیکن قدرت موثر انفجار سطحی به دلیل انعکاس شوک از سطح زمین افزایش می‌یابد. اگر هیچ حفره‌ای تشکیل نشده و زمین یک منعکس کننده ایده آل باشد، در این صورت مقدار موج ضربه ایجاد شده در هوا در اثر انفجار روی سطح زمین، نسبت به انفجار در هوای آزاد دو برابر می‌شود. عموماً، قدرت موثر ناشی از انفجار روی سطح زمین حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ درصد می‌باشد. با توجه به موارد فوق، می‌توان ملاحظه کرد که در بهترین شرایط می‌توان تنها به طور تقریبی انرژی حاصل از انفجار در هوا را برآورد کرد. خوشبختانه، پارامترهای انفجار در هوا که به صورت ریشه مکعب از انرژی مقیاس شده در دسترس است.

در این مساله، پنج متغیر وجود دارد که عبارتند از وزن خرج، W ، فاصله از خرج، R ، چگالی هوای محیط، ρ_a ، فشار هوای محیط، P_a ، و فرافشار موج، P^0 . بعدهای این پارامترها به ترتیب

عبارتند از، FT^2/L ، L ، FT^2/L^4 ، F/L^2 و F/L^2 . ملاحظه می‌شود که تنها سه بعد وجود دارد، از اینرو باید دو متغیر بی‌بعد تشکیل داد که عبارتند از

$$\left(\frac{P^0}{P_a}\right) \quad \text{و} \quad \left(\frac{R^3 \rho_a}{W}\right) \quad (7)$$



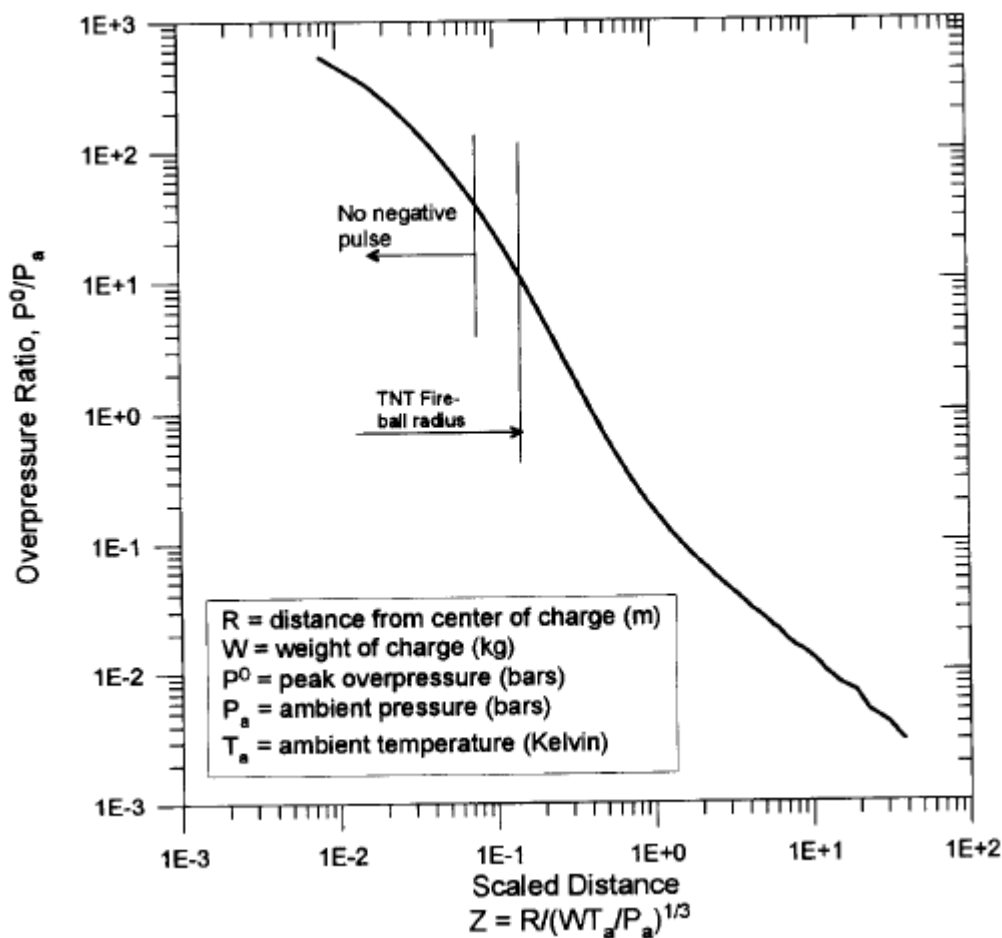
شکل ۱ پارامترهای تحلیل ابعادی و مقیاسی انفجار در هوا

اکنون، به جای محاسبه مقدار ρ_a برای هر شرایط، می‌توان عبارت (P_a/T_a) را جایگزین ρ_a کرد، چراکه طبق قانون گاز ایده آل، $\rho_a = KP_a/T_a$. در این رابطه T_a دمای مطلق هوای محیط است. بنابراین، پارامترهای بی‌بعد مقیاسی به صورت زیر در می‌آیند

$$\left(\frac{P^0}{P_a}\right) \quad \text{و} \quad \left(\frac{R^3 P_a}{W T_a}\right) \quad (8)$$

بنابراین تابع مقیاسی به صورت زیر بیان می‌شود که در شکل ۲ نیز ترسیم شده است.

$$\left(\frac{P^0}{P_a}\right) = f \left[R / \left(\frac{W T_a}{P_a} \right)^{1/3} \right] \quad (9)$$



شکل ۲ نمودار فرافشار بی بعد شده موج ضربه برحسب فاصله مقیاس شده (برمبنای داده‌های [۳])

مثال ۱. فرض می‌شود که ارتفاع زمین از سطح دریا برابر 5300 فوت و دما برابر با 75 درجه فارنهایت است. خرجی به وزن 20 kg از ماده منفجره سیکلوتول 77/23 (در $\rho_0 = 1.755 \text{ g/cm}^3$) منفجر می‌شود. مقدار فرافشار موج ضربه در فاصله ۱۰ متری از مرکز خرج به صورت زیر محاسبه می‌شود.

فشار محیط در ارتفاع 5300 ft از سطح دریا حدود 0.834 bar است و دمای معادل کلوین 75 °F برابر 297 K است. برای مقیاس کردن مطابق با نمودار شکل ۲، لازم است فاصله مقیاس شده Z به صورت زیر به دست آید.

$$Z = R / \left(\frac{W T_a}{P_a} \right)^{1/3}$$

مقدار W برحسب معادل وزن TNT است. سرعت دتوناسیون D برای سیکلوتول 77/23 در $\rho_0 = 1.755 \text{ g/cm}^3$ برابر 8.29 km/s است. بنابراین طبق رابطه (۶) وزن معادل TNT برابر است با

$$TNT \text{ equivalent} = D^2 / 48.3 = (8.29)^2 / 48.3 = 1.42$$

$$Z = 10 / \left(\frac{20 \times 1.42 \times 297}{0.834} \right)^{1/3} = 0.46$$

با مراجعه به نمودار شکل ۲، مقدار $P^0 / P^a = 0.8$ است و

$$P^0 = 0.8 \times P_a = 0.8 \times 0.834 = 0.67 \text{ bar (9.7 psi)}$$

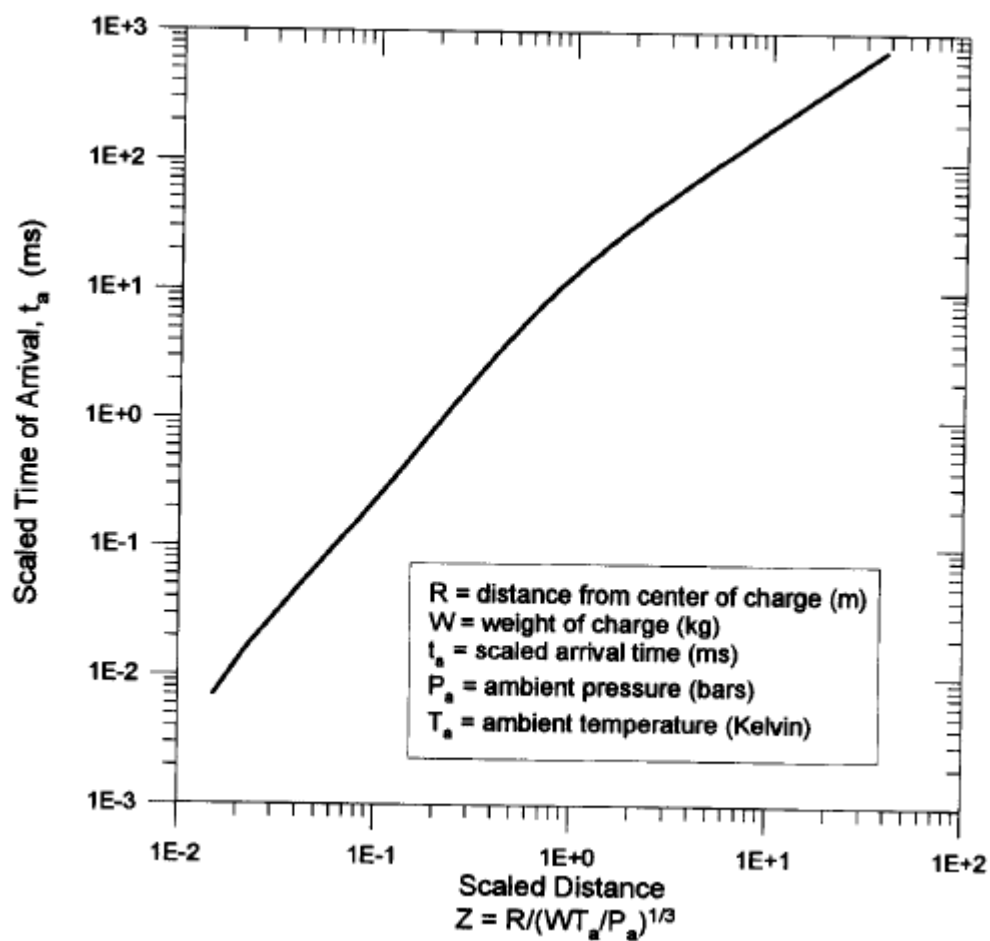
روش استفاده شده توسط کینی و گراهام [۳] برای یافتن زمان ورود موج و مدت زمان پالس مثبت شوک نیز عبارت است از نخست، یافتن زمان مقیاس شده از انفجار مرجع با استفاده از Z ، فاصله مقیاس شده (همانند یافتن فشار) که در تصاویر ۳ و ۵ نشان داده شده است. سپس، زمان مقیاس شده با ضربی از وزن خرج، دما و فشار محیط مطابق با رابطه زیر اصلاح می‌شود.

$$time = (Scaled \text{ time}) \times W^{1/3} / [(P_a / P_0)^{1/3} (T_a / T_0)^{1/6}] \quad (10)$$

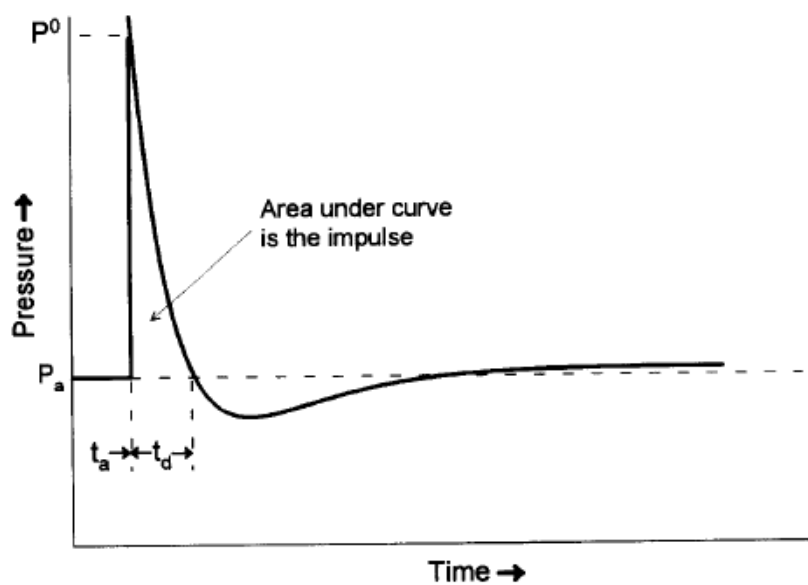
که در آن P_a و T_a شرایط محیطی واقعی و P_0 و T_0 شرایط مرجع می‌باشند (1.01325 bar و 288 K). زمان ورود موج بر اساس میلی ثانیه، و P_a و T_a به ترتیب بر اساس بار و کلوین است. موج انفجار در هوا شکلی مشابه آنچه که در شکل ۴ نشان داده شده دارد.

شکل موجی که در نمودار شکل ۴ نشان داده شده برای امواجی که در فاصله‌ای از خرج قرار گرفته‌اند متداول است. بخش منفی موج در اثر اینرسی هوایی که در جهت انفجار شتاب گرفته ایجاد می‌شود. زمانی که فاز مثبت موج عبور می‌کند، این جرم هوا توسط هوای ساکن پشت آن به عقب کشیده می‌شود. در نزدیک خرج، فاز منفی ایجاد نمی‌شود. فاصله مقیاس شده‌ای که در آن فاز منفی می‌تواند آغاز شود در منحنی‌های مقیاس مختلف نشان داده شده است. منحنی‌ها همچنین شعاع مقیاس شده گلوله آتش TNT را مشخص می‌کند.

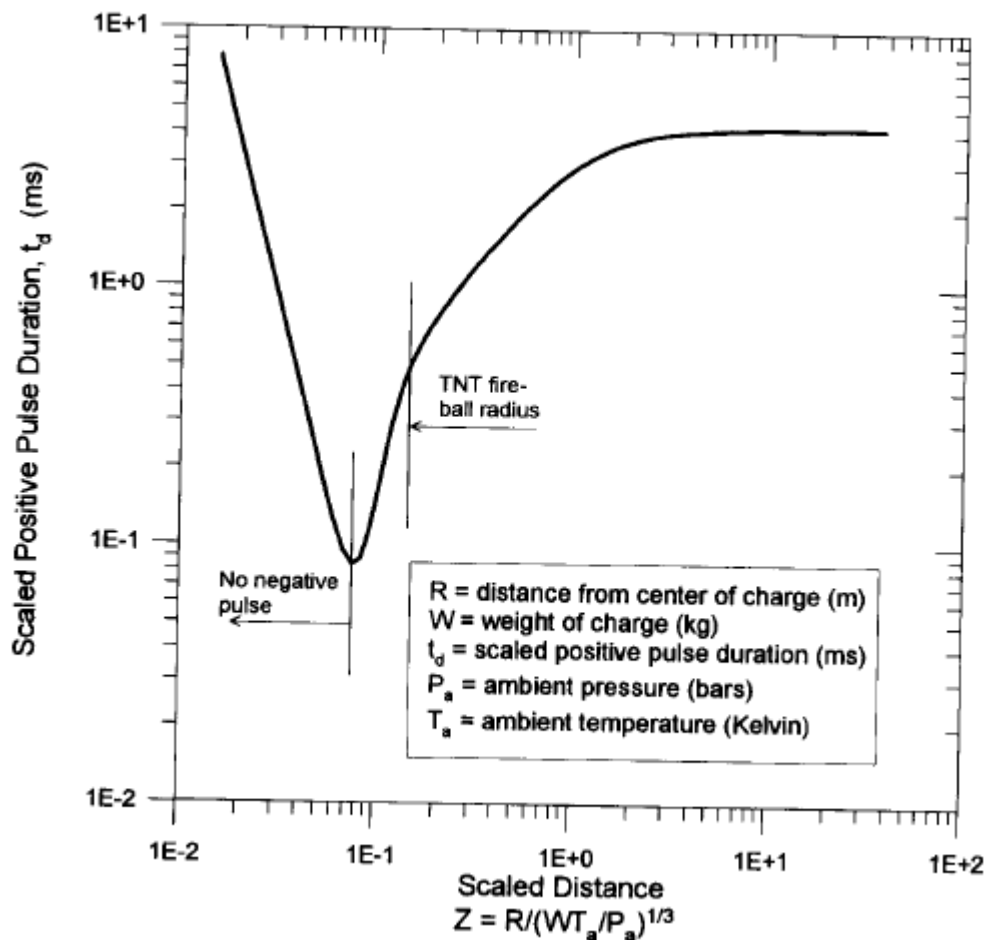
مدت زمان پالس مثبت نیز همانند زمان ورود پالس مقیاس می‌شود که نمودار آن در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۳ زمان مقیاس شده ورود موج بر حسب فاصله مقیاس شده (بر مبنای داده‌های [۳])



شکل ۴ طرح منحنی موج ضربه ناشی از انفجار در هوا



شکل ۵ مدت زمان پالس مثبت مقیاس شده برحسب فاصله مقیاس شده (برمبنای داده‌های [۳]) فرورفتگی منحنی مدت زمان پالس مثبت مربوط به پدیده تشکیل پالس منفی است. مشخصاً نقطه کمینه این نمودار همان نقطه آغاز تشکیل پالس منفی است.

به عنوان مثال، برای خرج و شرایطی که در مثال قبلی بیان شد، زمان ورود موج به فاصله ۱۰ متری از محل انفجار به صورت زیر محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه $Z = 0.46$ است، از نمودار ۳ زمان مقیاس شده برابر با 4.0 ms به دست می‌آید. به این ترتیب، زمان واقعی ورود موج برابر است با

$$\text{time} = (\text{Scaled time}) \times W^{1/3} / \left[(P_a / P_0)^{1/3} (T_a / T_0)^{1/6} \right] = 4.0 \times (20 \times 1.42)^{1/3} (0.834 / 1.01325)^{1/6} (297 / 288)^{1/6} = 11.5 \text{ ms}$$

۲. مقیاس کردن موج شوک در آب

با توجه به اینکه آب محیطی تراکم ناپذیر است، در مقیاس کردن نیازی به وارد کردن فشار یا چگالی محیط نیست. همچنین، آب به دلیل آنکه بلافاصله سرعت ترکشها را کاهش می‌دهد، بخش زیادی از انرژی اعمال شده به پوسته را بازایی می‌کند. بخش زیادی از انرژی گرمایی

گازها نیز بازیابی شده که به تشکیل بخار و حباب کمک می‌کند. رابطه مقیاسی تجربی ساده‌ای برای مقیاس کردن فشار ارایه شده است [۵].

$$P^0 = K \left(\frac{W^{1/3}}{R - R_0} \right)^\alpha \quad (11)$$

که در آن P^0 فرافشار موج ضربه (psi)، K ثابتی است که به نوع خرج بستگی دارد، W وزن خرج (lb)، R فاصله از مرکز خرج (in.)، R_0 شعاع خرج (in.) و α ثابتی است که بستگی به نوع خرج دارد. مقادیر K و α برای خرجهای گوناگون در جدول ۲ ارایه شده است [۶].
مقادیر گرمای انفجار نیز در این جدول داده شده که به نظر می‌رسد ارتباط معناداری میان ثابت K و ΔH_{exp}^0 وجود داشته باشد که در نمودار شکل ۶ ترسیم شده است.

جدول ۲ مقادیر K و α برای مواد منفجره گوناگون [۶]

ΔH_{exp}^0 (kcal/g)	α	K	ماده منفجره
1.41	1.13	3.6×10^5	TNT
1.58	1.13	3.9×10^5	ترکیب A-3
1.51	1.15	3.75×10^5	تتریل
1.65	1.13	3.85×10^5	PETN
1.53	1.13	3.74×10^5	پنتولیت (۵۰/۵۰)
1.84	1.15	4.34×10^5	HBX-1
2.11	1.14	4.55×10^5	HBX-3

برای مثال، خرج کروی ۸ پوندی از TNT ریخته گری شده زیر آب منفجر می‌شود. فرافشار تولید شده در فاصله ۱۲ فوتی از منبع به صورت زیر محاسبه می‌شود. از آنجا که TNT به صورت ریخته گری است، می‌توان چگالی آن را 1.64 g/cm^3 فرض کرد. می‌توان شعاع خرج را از وزن و چگالی آن و رابطه حجم $(\frac{4}{3}\pi R_0^3)$ به دست آورد.

به این ترتیب مقدار R_0 برابر 3.18 in. به دست می‌آید. از جدول ۲ برای TNT مقادیر $K = 3.6 \times 10^5$ و $\alpha = 1.13$ به دست می‌آید. لذا فشار برابر است با

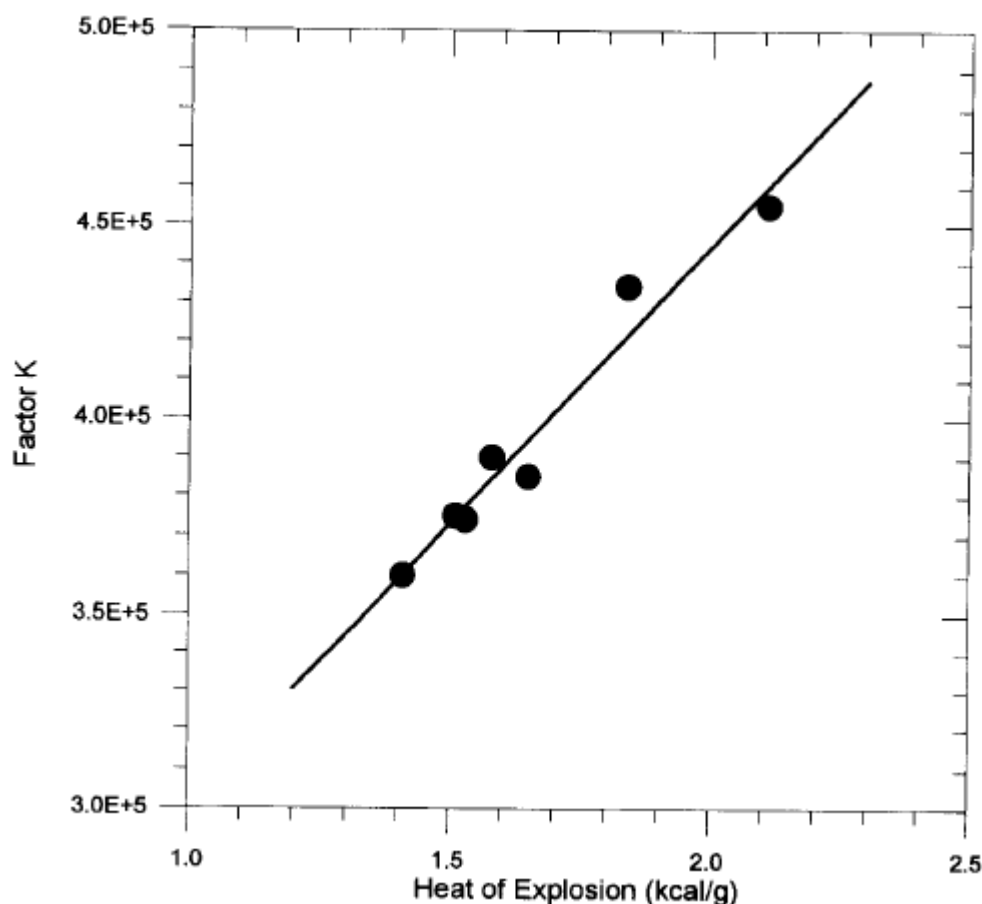
$$P^0 = K \left(\frac{W^{1/3}}{R - R_0} \right)^\alpha = 2940 \text{ psi}$$

می‌توان در رابطه (۱۱) به جای وزن W ، چگالی و حجم معادل آن را قرار داد که به صورت زیر تبدیل می‌شود

$$P^0 = K \left(\frac{(4\pi\rho_0/3)^{1/3}}{(R/R_0)-1} \right)^\alpha$$

تنها مشکل جدی در استفاده از روابط (۱۱) یا (۱۲) برآورد پارامترهای انفجار در نقاط بسیار نزدیک به خرج است. همانگونه که می‌توان مشاهده کرد، با نزدیک شدن R به R_0 ، اختلاف $(R-R_0)$ به صفر میل کرده و فشار به بی‌نهایت میل می‌کند. این مساله هنگامی قابل توجه می‌شود که R/R_0 کمتر از ۱.۶ باشد. برای ناحیه میان سطح خرج و $R/R_0 \approx 1.6$ ، برآورد دیگری باید انجام شود.

فشار در محل تماس خرج و آب را می‌توان با حل برهم کنش موج ضربه میان محصولات انفجار $P-u$ ایزنتروپ و $P-u$ برای آب به دست آورد (برای TNT این مقدار حدود ۱۲۰ kbar است). این نقطه (در $R/R_0=1$) را می‌توان با برونیابی از رابطه (۳) با استفاده از انطباق نمایی (معادل خط راست در نمودار log-log) به دست آورد. این خط باید در P مماس بر منحنی R/R_0 باشد. در شکل ۷ نمودار P برحسب R/R_0 برای TNT زیر آب آورده شده است.



شکل ۶ وابستگی میان K و گرمای انفجار (برمبنای داده‌های [۶])

مقیاس کردن ایمپالس زیر آب را می‌توان با رابطه زیر انجام داد [۸].

$$I = BW^{1/3} \left(\frac{12W^{1/3}}{R - R_0} \right)^F \quad (۱۲)$$

که در آن I ایمپالس ($lb \ s/in.^2$)، W وزن خرج (lb)، R و R_0 برحسب اینچ و B و F ثوابت مشخصه هر خرج انفجاری است. مشکل این رابطه، فقدان داده‌ها برای تعداد قابل توجهی از خرجهای انفجاری مختلف است. در جدول ۳ مقادیر B و F برای سه نمونه خرج انفجاری ارایه شده است.

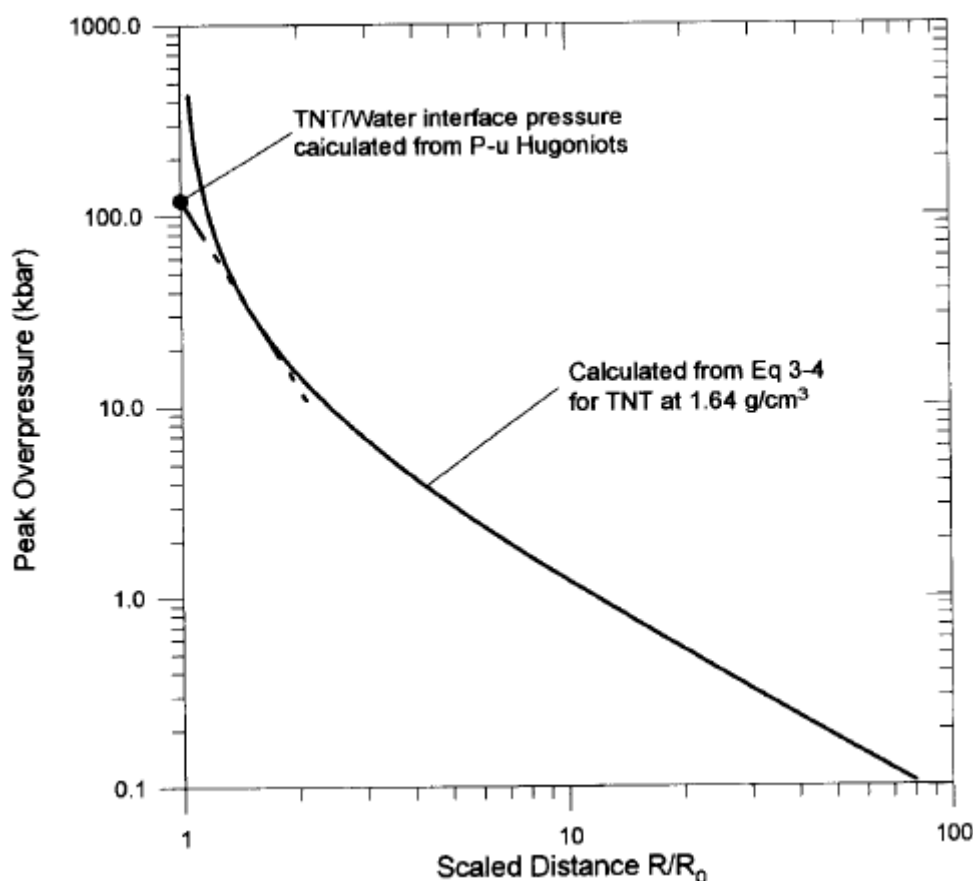
به عنوان مثال، برای همان خرج در مثال پیشین، مقدار ایمپالس در فاصله ۱۲ فوتی به صورت زیر به دست می‌آید. برای TNT، $B=1.46$ و $F=0.89$ است، لذا

$$I = 1.46 \times (8)^{1/3} \left(\frac{12(8)^{1/3}}{144 - 3.18} \right)^{0.89} = 0.6 \ lb \ s/in.^2$$

زمان ورود موج را به سادگی می‌توان محاسبه کرد، زیرا در فشارهای کمتر از ۲~۳ کیلوبار، سرعت موج به سرعت استاندارد صوت ($\sim 1500 \ m/s$) نزدیک است.

جدول ۳ مقادیر ضرایب B و F برای مقیاس کردن ایمپالس از انفجارهای زیر آب

خرج انفجاری	B	F
TNT	1.46	0.89
تتریل	1.73	0.98
پتولیت	2.18	1.05



شکل ۷ فرافشار موج ضربه بر حسب فاصله برای انفجار خرج TNT زیر آب

محاسبه اثر انفجارهای سطحی یا زیر سطحی بر سازه‌ها یا تجهیزات زیر آب پس از حملات تروریستی ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، خطر تهدید سازه‌های زیر آبی در برابر انفجار به صورت خاص مورد توجه قرار گرفته است. انفجارهای سطحی یا زیر آبی خطرات بالقوه‌ای برای تجهیزات زیر آب یا سکوهای استخراج نفت و گاز به شمار می‌رود. حوادث گذشته نشان می‌دهد که امکان حملات تروریستی به زیرساختها از طریق بمب گذاریهای زیر آبی وجود داشته، حال آنکه اطلاعات اندکی درباره تعیین آسیبهای احتمالی آنها موجود است. در این فصل تکنیکهایی برای محاسبه پارامترهای بلاست میدان باز مانند فشار و ایمپالس در انفجارهای سطحی یا زیر سطحی واقع در آب ارایه شده و نشان داده شده که چگونه از این نتایج می‌توان برای برآورد آسیبهای وارد بر تاسیسات با هندسه مشخص بهره گرفت.

در انفجار زیر آبی میدان باز، حباب گاز ناشی از انفجار از همه جهت درون آب مقید می‌ماند. طی انبساط اولیه حباب گاز پس از تشکیل موج شوک، اینرسی آب در حال حرکت باعث ادامه انبساط شده تا فشار گاز درون حباب به کمتر از فشار هیدرواستاتیک در آن عمق برسد. سپس

حباب به حالت پرفشار و متراکمی فشرده شده و مجدداً منبسط می‌شود. بنابراین موج شوک اولیه با یکسری نوسانات حباب همراه بوده که به تدریج از شدت آن کاسته شده تا اینکه در اثر اصطکاک ویسکوز سیال کاملاً میرا می‌شود. هریک از این نوسانات حباب، پالس فشار ثانویه‌ای به آب پیرامون اعمال می‌کند. پالس ناشی از حباب، فرافشار کمتری نسبت به موج شوک اولیه ایجاد می‌کند ولیکن به دلیل بزرگتر بودن مقیاس زمانی این نوسانات، ایمپالس مثبت ناشی از آنها ممکن است قابل مقایسه یا حتی بزرگتر از ایمپالس موج ضربه اولیه باشد. فشار و ایمپالس مثبت تولید شده در اثر نوسانات حباب تابعی از وزن خرج، فاصله و عمق است. به علاوه، شدت موج اولیه بستگی به وزن خرج و فاصله داشته و نیز می‌تواند از انعکاس کف، دیگر سازه‌ها یا سطح آزاد آب تاثیر پذیرد. انعکاس از سطوح سخت، امواج فشاری و انعکاس از سطح آزاد، امواج ترقیق تولید کرده که با شکل موج شوک اولیه ترکیب می‌شود.

در این فصل، یکسری روشهایی که امکان استفاده از تمامی این پارامترهای بلاست میدان باز را با استفاده از مقیاس کردن از داده‌های تجربی موجود می‌دهد توصیف می‌کند که شامل اثرات انعکاس سطح و کف است.

در انفجار سطحی حباب گاز ناشی از انفجار خرج بلافاصله وارد جو شده و لذا پالسهای فشار ناشی از نوسان حباب وجود نخواهد داشت. بنابراین موج شوک، سازوکار انتقال انرژی اولیه درون آب بوده و انعکاس موج شوک از سطح آزاد وجود ندارد. همچنین افت قابل توجه فشار و ایمپالس مثبت در مقایسه با انفجار زیر آب دیده می‌شود. برای انفجارهای سطحی داده‌های بسیار کمتری نسبت به انفجارهای زیر آب وجود دارد. ولیکن همچنان امکان برآورد فرافشار و ایمپالس شوک میدان باز برحسب پارامترهای فاصله و عمق وجود دارد.

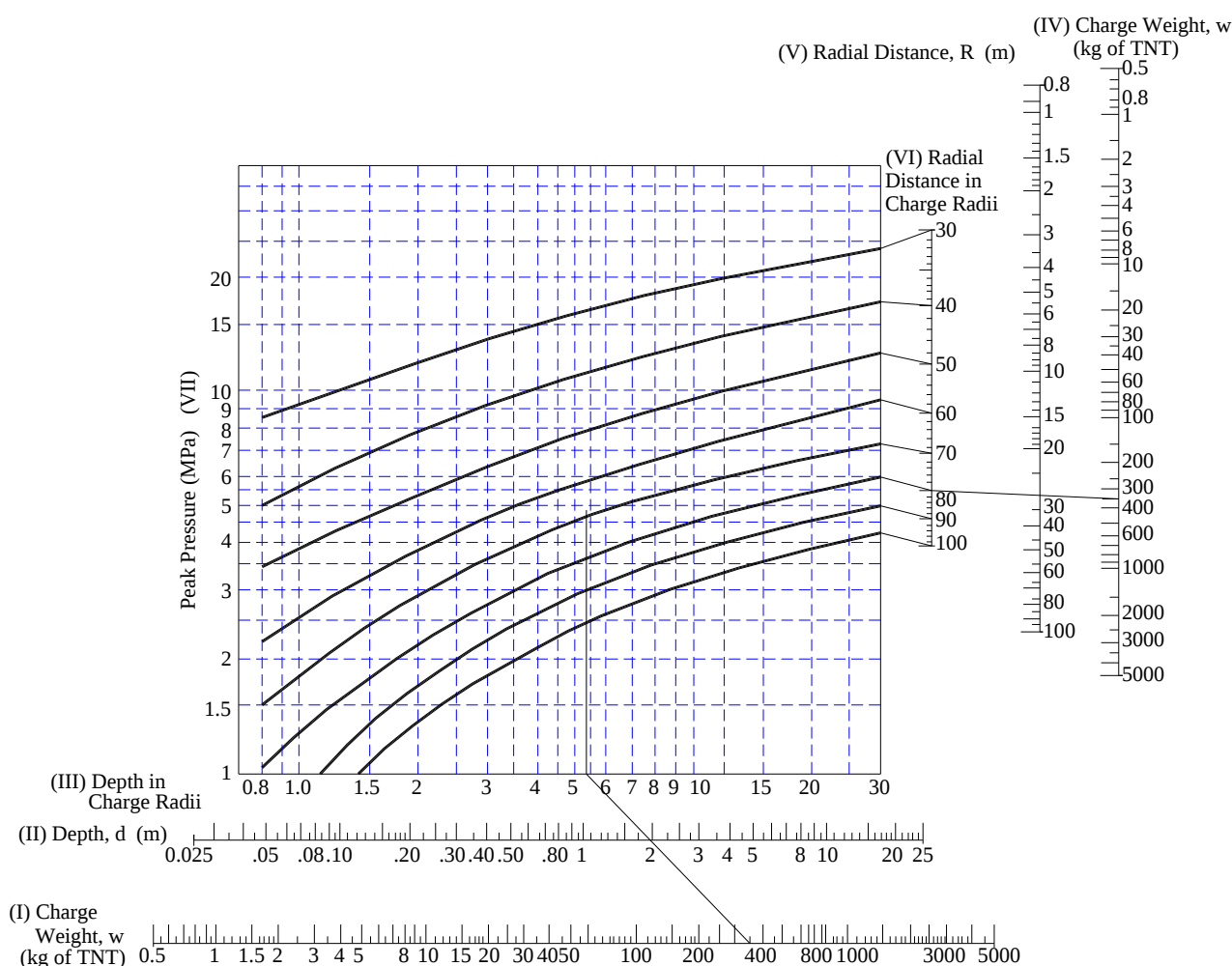
هدف تحلیل انفجار سطحی بمب در قایق عبارت است از تعیین فرافشار موج ضربه و ایمپالس مثبت برحسب توابعی از عمق هدف و فاصله شعاعی از نقطه انفجار. پارامترهای محاسبه شده مورد نیاز برای انفجارهای زیر آب شامل فرافشار و ایمپالس مثبت کل برای موج ضربه و فازهای نوسان حباب است. این پارامترها لازم است به صورت توابعی از فاصله و عمق خرج از فاصله‌ای مجاور نقطه انفجار تعیین شوند.

۲. پارامترهای انفجار سطحی

همانگونه که در بخش مقدمه اشاره شد، در انفجار سطحی گاز حباب تقریباً بلافاصله در اتمسفر تخلیه می‌شود. بنابراین نوسانات حباب رخ نداده و صرفاً پارامترهای موج ضربه مورد توجه قرار می‌گیرد. فرافشار موج ضربه برای این موارد را می‌توان از گزارش NSWC تهیه شده توسط

سویسک [۱] به دست آورد که داده‌های فرافشار آن به صورت نمودگرافی که تابعی از وزن خرج در شکل ۱ نشان داده شده است.

زمانی که داده‌های فاصله موجود در نمودگراف ناکافی باشد، با استفاده از داده‌های کتاب کول (R. C. Cole) در خصوص انفجار زیر آب [۲] و نیز داده‌های آزمایشهای هیدروآکوستیک در مخازن کم عمق [۳،۴] می‌توان برحسب فاصله شعاعی برونیابی کرد. هیچ مبنایی برای برونیابی داده‌های سویسک فراتر از عمقهای مشخصی از هدف وجود ندارد. البته به جز در عمقهای بسیار کم، فرافشار موج ضربه از انفجارهای سطحی تنها به صورت ضعیفی با عمق هدف افزایش می‌یابد. بنابراین پارامترهای انفجار سطحی برای هر وزن خرج بر روی بقیه فاصله از بیشترین عمق هدف در داده‌های سویسک تا ۱۰۰ فوت ثابت فرض می‌شود.



شکل ۱ داده‌های تجربی سویسک [۱] برای فرافشار انفجارهای سطحی

مطابق با روابط کول [۲] برای انفجارهای میدان باز زیر آب TNT، فرافشار موج ضربه (برحسب psi) و ایمپالس بر واحد سطح (بر حسب psi.s) با روابط زیر به دست می‌آید:

$$P_m = 2.16 \times 10^4 (W^{1/3} / R)^{1.13} \quad (1)$$

$$I / A = 1.46 W^{0.63} / R^{0.89} \quad (2)$$

که در آن W وزن خرج برحسب پوند و R فاصله برحسب فوت است. بنابراین، برای یک وزن خرج مشخص فرافشار موج ضربه به صورت $(1/R)^{1.13}$ تغییر می‌کند. انفجارهای سطحی به دلیل اتلاف انرژی در اتمسفر و موجهای ترقیق منعکس شده از سطح آزاد آب، تا حدی افت بیشتری با فاصله از این دارند. در برخی از آزمایشهای هیدروآکوستیک روسی که توسط انوا و همکارانش گزارش شده [۳، ۴]، خرجهای ۱۰۰ کیلوگرمی TNT بر روی سطح و در عمقهای مختلف در یک استخر به عمق ۳ متر منفجر شد. نمودارهای کامل فشار-زمان برای این آزمایشها در فواصل مختلفی از خرج تهیه و در منابع منتشر شد. بر مبنای مقایسه شکل موجها در فواصل ۱۵ و ۳۰ متری از انفجار سطحی، با تغییر فاصله از ۱۵ متر به ۳۰ متری از خرج، مقادیر فرافشار علاوه بر تاثیر مقیاسی معمولی $(1/2)^{1.13} = 0.457$ با ضریب دیگری در حدود ۰.۶ تا ۰.۸ نیز افت می‌کند. زمانی که نیاز به انجام برونیابی از نمودگراف سویسداک باشد از ضریب افت سطحی ۰.۷ برای دو برابر شدن فاصله شعاعی استفاده می‌شود. سویسداک در گزارش خود هیچ داده‌ای برای ایمپالس مثبت ناشی از انفجارهای سطحی ارائه نکرد. البته، می‌توان این کمیت را با استفاده از نتایج فرافشار وی به همراه روابط کول و داده‌های انوا برآورد کرد. مقایسه نمودارهای فشار-زمان انفجار سطحی و زیر آب [۳، ۴] نشان می‌دهد که در این موارد شکل و مدت زمان موج تاثیر اندکی از افت سطحی پذیرفته است. در عوض تنها دامنه پالس با ضریب نسبتاً ثابتی کاهش یافته است. از آنجا که ایمپالس مثبت اعمال شده به هدف، انتگرال زمانی این شکل موج است، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب افت سطحی نیز می‌تواند ضریب بیرون انتگرال شود. به این ترتیب، انتگرال باقیمانده همان ایمپالس منحنی فشار-زمان میدان باز است که می‌تواند از رابطه کول (رابطه (۲)) به دست آید. بنابراین هنگامی که فرافشار موج ضربه انفجار سطحی از طریق برآورد یا برونیابی $P_{m, Swisdak}$ از نمودگراف سویسداک به دست آمد، ایمپالس مثبت مربوطه می‌تواند محاسبه شود. ابتدا، با استفاده از معادلات کول در روابط (۱) و (۲)، پارامترهای بلاست میدان باز باید در همان فاصله و وزن خرج محاسبه شود تا $P_{m, Cole}$ و $(I/A)_{Cole}$ به دست آید. به این ترتیب ایمپالس مثبت موج شوک برای انفجار سطحی به این صورت به دست می‌آید

$$I / A = (I / A)_{Cole} (P_{m, Swisdak} / P_{m, Cole}) \quad (3)$$

برای نشان دادن پارامترهای انفجار سطحی که می‌تواند با این روش محاسبه شود، در جدول ۱ فرافشارهای موج ضربه و ایمپالسهای مثبت مورد انتظار در عمقها و فواصل شعاعی مختلف از

انفجار سطحی خرج ۱۰۰۰ پوندی TNT آورده شده است. نتایج مشابه به طور گرافیکی نیز در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. به عنوان مثالی از روند محاسبه، فرافشار موج ضربه 899 psi در فاصله ۵۰ فوت و عمق صفر از نمودار سویسک در شکل خوانده می‌شود. با محاسبه فرافشار موج ضربه میدان باز و ایمپالس بر واحد سطح (روابط ۲ و ۳) برای این وزن خرج و فاصله، مقادیر $P_{m, Cole} = 3504 \text{ psi}$ و $(I/A)_{Cole} = 3.4855 \text{ psi.s}$ به دست می‌آید. بنابراین:

$$I/A = 3.4855(899/3504) = 0.894 \text{ psi.s}$$

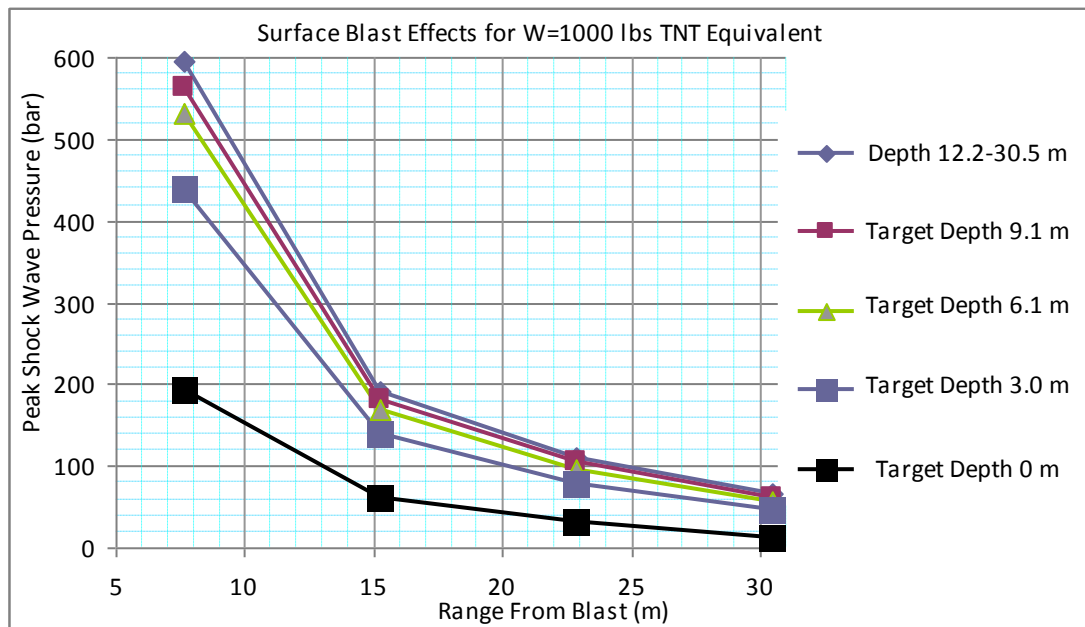
البته فاصله ۲۵ فوت در عمق صفر خارج از مقیاس نمودار است، که برونمایی از مقدار 899 psi در فاصله ۵۰ فوت بر مبنای نسبت $(1/R)^{1.13}$ از رابطه (۱) و ضریب افت سطحی 0.7 انتظاری از دو برابر شدن فاصله امکان پذیر است. بنابراین در فاصله ۲۵ فوت:

$$P_m = 899(2)^{1.13}/0.7 = 2811 \text{ psi}$$

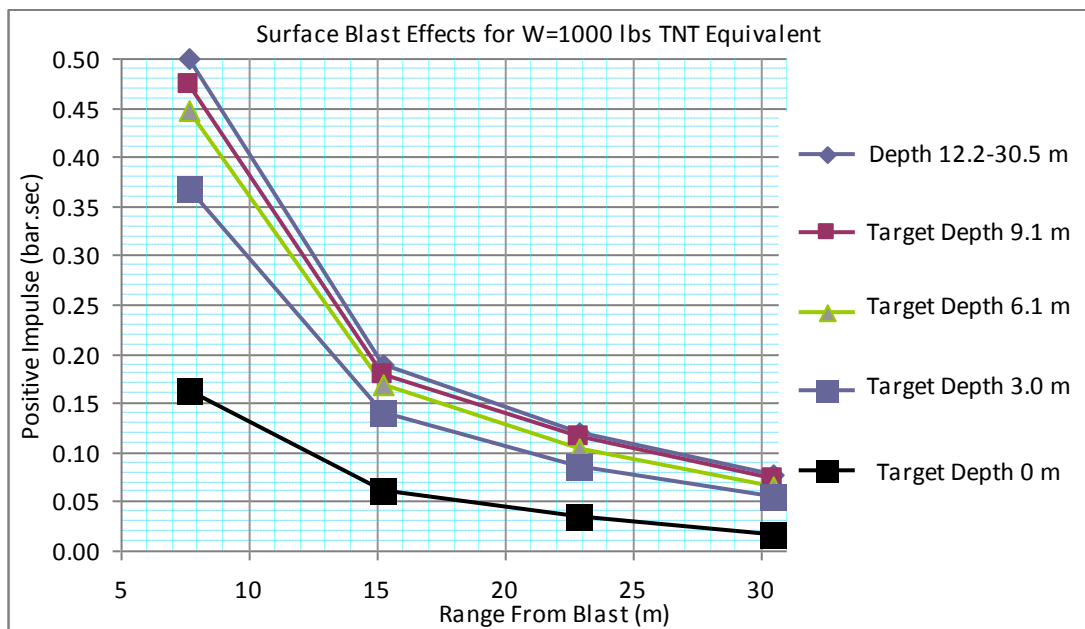
جدول ۱ اثرات انفجار سطحی برای وزن ۱۰۰۰ پوند (۴۵۳٫۶ کیلوگرم) معادل ماده منفجره TNT

ایمپالس مثبت موج ضربه		فرافشار موج ضربه		فاصله		عمق	
(bar.s)	(psi.s)	(bar)	(psi)	(m)	(ft)	(m)	(ft)
0.1632	2.367	193.81	2811	7.6	25	0	0
0.0616	0.894	61.98	899	15.2	50		
0.0340	0.493	31.03	450	22.9	75		
0.0153	0.222	13.03	189	30.5	100		
0.3687	5.348	437.82	6350	7.6	25	3.0	10
0.1393	2.02	140.03	2031	15.2	50		
0.0855	1.24	77.98	1131	22.9	75		
0.0558	0.809	47.50	689	30.5	100		
0.4477	6.493	531.59	7710	7.6	25	6.1	20
0.1691	2.453	170.02	2466	15.2	50		
0.1042	1.511	95.01	1378	22.9	75		
0.0658	0.954	55.99	812	30.5	100		
0.4740	6.875	562.82	8163	7.6	25	9.1	30
0.1791	2.597	180.02	2611	15.2	50		
0.1151	1.67	105.01	1523	22.9	75		
0.0728	1.056	61.98	899	30.5	100		
0.5004	7.257	594.12	8617	7.6	25	12.2-30.5	40-100

0.1890	2.741	190.02	2756	15.2	50
0.1206	1.749	109.97	1595	22.9	75
0.0764	1.108	65.02	943	30.5	100



شکل ۲ فرافشار موج ضربه انفجار سطحی برای وزن ۱۰۰۰ پوند (۴۵۳٫۶ کیلوگرم) معادل ماده منفجره TNT



شکل ۳ ایمپالس مثبت موج ضربه انفجار سطحی برای وزن ۱۰۰۰ پوند (۴۵۳٫۶ کیلوگرم) معادل ماده منفجره TNT

۳. پارامترهای انفجار زیر آب

در انفجار زیر آب، حباب گاز ایجاد شده معمولاً بلافاصله وارد اتمسفر نمی‌شود، به گونه‌ای که نوسانات حباب منبع پالسهای فشار ثانویه می‌شود. به این ترتیب برای هر ترکیب از وزن خرج و عمق، چهار چیز لازم است تعیین شود: فرافشار موج ضربه، ایمپالس مثبت موج ضربه، فرافشار پالس حباب و ایمپالس مثبت پالس حباب. رابرت کول در کتاب «انفجارهای زیر آب» (مرجع [۲]) بر مبنای آزمایش خرجهای ۳۰۰ پوندی TNT تا عمق حدوداً ۱۰۰ فوتی آب، داده‌های تجربی سودمندی برای این پارامترها ارائه کرده است. این داده‌ها به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که زمانی که خرج کف استخر منفجر شود پارامترهای موج شوک افزایش می‌یابد و فشارهای پالس حباب نیز در عمق حدود ۲۰ فوتی برای خرجی در این ابعاد به طور غیرعادی افزایش پیدا می‌کند. افزایش پالس حباب در ارتفاع مذکور ممکن است در اثر مکش هوای اتمسفر به حباب گاز طی نخستین فرآیند انبساط باشد (که باعث تشدید واکنش شیمیایی انفجار و افزایش انرژی آن در تراکمهای بعدی می‌شود)، اما در حال حاضر توجیه کاملاً قانع کننده‌ای برای این مشاهده تجربی وجود ندارد.

جدول ۲ فشارهای موج ضربه و پالس حباب برای فاصله $R = 60 \text{ ft}$ از خرج ۳۰۰ پوندی TNT در استخری به عمق ۱۰۰ فوت آب [۲]

	عمق خرج		فرافشار		ایمپالس مثبت	
	(ft)	(m)	(psi)	(bar)	(psi.s)	(bar.s)
موج ضربه	40	12.2	1770	122.04	1.15	0.079
	100	30.5	1940	133.76	1.41	0.097
پالس حباب	20	6.1	428	29.51	1.1	0.076
	26	7.9	71	4.90	0.84	0.058
	45	13.7	56	3.86	1.5	0.103
	65	19.8	84	5.79	4	0.276
	96	29.3	81	5.58	1.2	0.083

داده‌های جدول برای فاصله توقف ۶۰ فوت بوده و شامل اثرات انعکاس کف (که سبب افزایش فرافشار و ایمپالس کل شده) و افت ترقیق سطحی (افت سریع در فرافشار ناشی از انعکاس موج ترقیق از سطح آزاد آب) است. نتایج این آزمایشها به ویژه برای برآورد تهدید تاسیسات زیر آبی بسیار مناسب است زیرا وزن خرج TNT و عمق آب در محدوده مورد نظر است. روابط مورد نیاز برای مقیاس کردن این داده‌ها در مرجع [۲] آورده شده است:

فرا فشار موج ضربه به صورت $(W^{1/3}/R)^{1.13}$ تغییر می کند. فشار پالس حباب به صورت $W^{1/3}/R$ تغییر می کند. ایمپالس مثبت موج ضربه به صورت $W^{0.63}/R^{0.89}$ تغییر کرده و ایمپالس مثبت پالس حباب به صورت $W^{2/3}/R$ تغییر می کند.

فصل پنجم

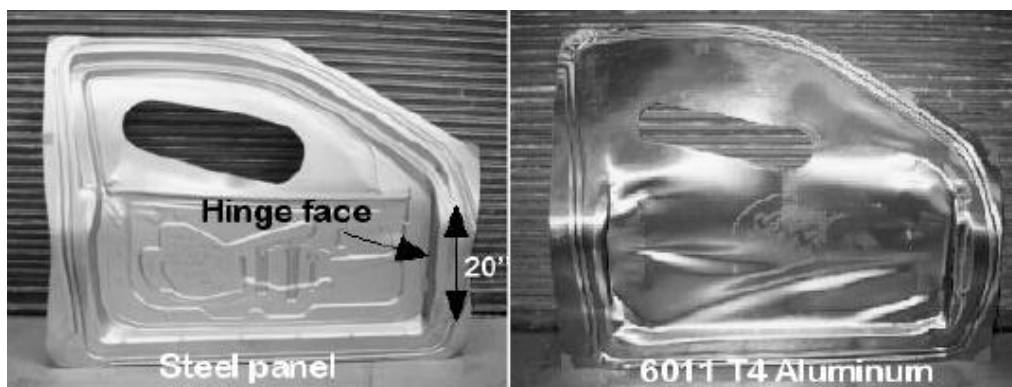
اثرات مکانیکی و متالورژیکی
شکل دهی انفجاری بر خواص ورق

قابلیتهای فرآیند شکل دهی پرسرعت و عوامل موثر بر شکل پذیری ورق در سرعتهای بالا در این فصل دو هدف عمده مدنظر قرار گرفته است. در ابتدا، طی مقدمه‌ای جامع، ضرورت توسعه فناوری شکل دهی پرسرعت، که می‌تواند در قالب شکل دهی الکترومغناطیس باشد، مورد بحث قرار گرفته است. این فرآیند که می‌تواند به همراه با فرآیند شکل دهی متداول به کار رود، در کنار سایر مزایای آن، می‌تواند شکل پذیری ورق را به نحو چشمگیری بهبود بخشیده، چین خوردگی را کاهش داده و برگشت فنری ورق را کم کند. در این فصل عوامل مهمی که منجر به بهبود شکل پذیری ورق در سرعت بالا می‌شود مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خاص، سرعت بالای ورق می‌تواند مانع از رشد گلویی شدن شود. این مساله به ابعاد ورق نیز وابستگی دارد و نمونه‌های بزرگتر شکل پذیری بهتری نسبت به نمونه‌های کوچکتر دارند. این موارد تاحدودی در مدل جدید فروند و شنوی بیان شده است. به علاوه، شرایط مرزی و ضربه برخورد با قالب می‌تواند اثرات مهمی بر شکل پذیری بگذارد.

مقدمه

آلومینیوم از قابلیت بالایی برای کاهش وزن خودروها برخوردار است. یکی از مهمترین چالشهای استفاده از این فلز، شکل دادن آن بدون وقوع پارگی (مشابه شکل ۱) است. در حال حاضر این مشکل با مونتاژ چند تکه ورقهای آلومینیومی یا بهره‌گیری از طراحیهای غیر بهینه برطرف می‌شود. مدت زیادی است مشخص شده که فلزات را می‌توان در سرعتهای بالا تا کرنشهای بیشتری نسبت به سرعتهای شبه ایستا تحت کشش قرار داد. بخش زیادی از کارهای پژوهشی در این زمینه را می‌توان در مرجع [Error! Reference source not found.] یافت.

یکی از پرجاذبه ترین روشهای شکل دهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکل دهی الکترومغناطیس است. این فرآیند را می‌توان در آرایشهای متنوعی به کار گرفت و از آن به همراه فرآیندهای شکل دهی متداول استفاده کرد. با به کارگیری همزمان این روش با روشهای متداول شکل دهی، می‌توان بسیاری از قطعات را با تعداد عملیات کمتر تولید کرد و ساخت بسیاری از قطعات با جنسهای دشوار مانند آلومینیوم امکان پذیر می‌شود. این امر در نهایت می‌تواند منجر به کاهش وزن قطعات و افزایش بازدهی خودروها و محصولات صنعت هوافضا شود.



شکل ۱ نتایج شکل دهی یک نمونه قاب درب خودرو از جنس فولاد و جنس آلومینیوم (قطعه مرحله ای) با استفاده از قالبی که برای جنس فولاد طراحی شده است. وزن قاب آلومینیومی ۵٫۲ کیلوگرم بوده در حالیکه وزن قاب فولادی ۱۱٫۸ کیلوگرم می باشد.

شکل دهی الکترومغناطیس با اعمال نیروی لورنتس انجام می شود که با عبور پالس جریان از سیم پیچ ابزار و قطعه کار هادی الکتریسته در مجاورت آن بین آنها ایجاد می شود. اصولاً، هرگاه جریان الکتریکی به طور ناگهانی از یک هادی الکتریسته عبور کند، اطراف آن یک میدان مغناطیسی ایجاد می شود. تغییر در میدان مغناطیسی سبب القای جریان اِدی در رسانای مجاور در خلاف جهت اولیه (مشابه عمل ترانسفورماتور) می شود. این جریان اِدی میدان مغناطیسی دیگری ایجاد کرده و باعث ایجاد نیروی دافعه بین قطعه و ابزار می شود. این روش برای قطعات با جنسهای با رسانایی الکتریکی بالا مناسب است و فرکانس پالس جریان باید به اندازه کافی بالا باشد (معمولاً زمان خیز پالس کمتر از ۳۰ میکروثانیه است). توزیع مکانی فشار را می توان با آرایش سیم پیچ ابزار کنترل کرد و شدت نیروی حاصله عمدتاً با انرژی تخلیه کنترل می شود. توضیحات بیشتر درباره مبانی این روش در مراجع [Error! Reference source not found. found. Error! Reference source not found.] آمده است.

بهره گیری از روشهای عمومی شکل دهی سریع (مانند شکل دهی انفجاری) و شکل دهی الکترومغناطیس به طور خاص، سرگذشت طولانی دارد. از دهه ۱۹۶۰، صدها خازن برای تولید انبوه میلیونها قطعه با مزیت ایمنی بالا و عدم آسیب رسیدن به پرسنل، تولید شده و مورد استفاده قرار گرفته اند. بخش عمده ای از فرآیندهای شکل دهی الکترومغناطیس انجام شده در گذشته مربوط به انقباض یا انبساط ساده متقارن محوری لوله ها به عنوان بخشی از فرآیند مونتاژ بوده است. بهبود شکل پذیری و کاهش چین خوردگی در فرآیندهای شکل دهی سریع موضوعی

است که در گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چند مطالعه مروری بر پژوهشهای انجام شده در زمینه شکل‌دهی سریع انجام شده است [Error! Reference source not found.].

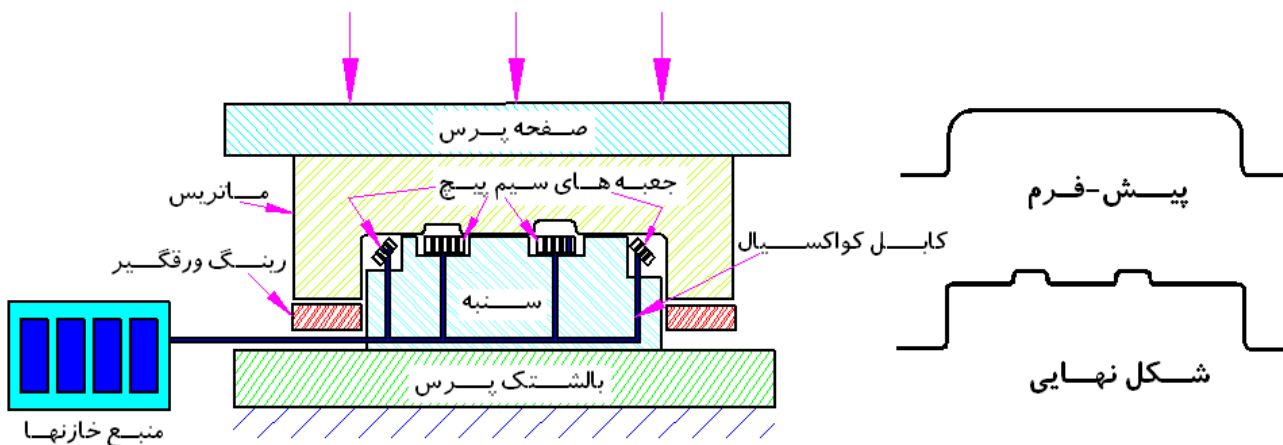
شکل‌دهی سریع مزایای مهمی دارد که می‌توان از آنها در کاربردهای فعلی و آتی شکل‌دهی فلزات بهره گرفت. این مزایا عبارتند از:

(۱) بهبود قابلیت شکل‌پذیری. در شکل‌دهی سریع آلومینیوم در دمای اتاق و شرایط کرنش صفحه‌ای، تغییر طول نسبی بیش از ۱۰۰ درصد مشاهده شده است. این مساله در بخشهای بعدی این فصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

(۲) بهبود خواص در اثر ضربه ورق به قالب. هنگامی که ورق فلزی با سرعت بالا به سطح قالب برخورد می‌کند، تنشهای فشاری بالایی در آن ایجاد می‌شود. این امر می‌تواند سبب کاهش برگشت فنری، بهبود صافی سطح و افزایش شکل‌پذیری ورق شود.

(۳) کاهش چین خوردگی. زمانی که ورق با پروفیل سرعت مشخصی حرکت می‌کند، هر جزء از ورق تمایل دارد که در جهت جریان خود حرکت کند. از آنجا که چین خوردگی معمولاً با تغییر جهت حرکت همراه است، در سرعت بالا، به دلیل اینرسی ماده، چین خوردگی کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، با استفاده از پالس الکترومغناطیس، می‌توان قطر رینگهای باریک را تا نسبت دو برابر و یا بیشتر کاهش داد.

استفاده همزمان از شکل‌دهی الکترومغناطیس و کشش عمیق می‌تواند مزایای زیادی داشته باشد. هر دو فرآیند را می‌توان در یک پرس تقریباً معمولی انجام داد. عملگرهای الکترومغناطیس را می‌توان در حین حرکت سنبه قالب به صورت پالسی فعال کرد و یا آنکه در انتهای کورس پرس با یک ایمپالس فعال نمود. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده، عملگرهای الکترومغناطیس متعددی را می‌توان در یک پرس به طور مستقل کنترل کرد.



شکل ۲ تصویر طرحوار قالب پرس با چند عملگر الکترومغناطیسی

شکل‌دهی ترکیبی به دو روش معمولی و الکترومغناطیسی می‌تواند مزایای متعدد ذیل را داشته باشد:

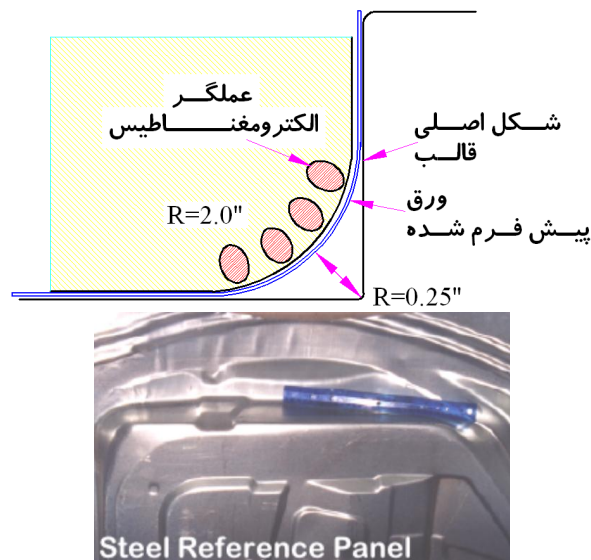
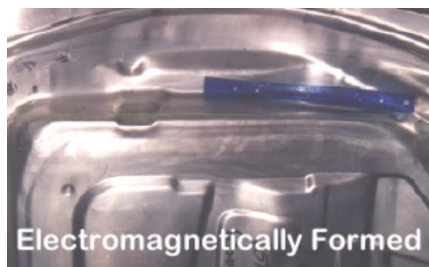
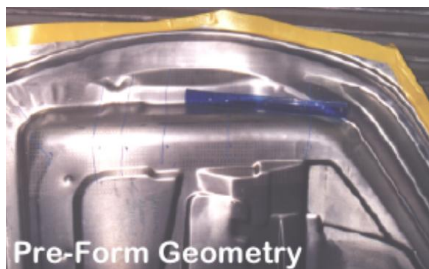
بهبود شکل‌پذیری - منحنیهای حد شکل‌دهی می‌تواند در سرعتهای بالا به نحو چشمگیری بهبود یابد.

بهبود توزیع کرنش - علاوه بر بهبود قابلیت شکل‌دهی، امکان توزیع بهتر کرنش در این روش، به ویژه در قسمتهایی از ورق که به دلیل اصطکاک تحت کرنش قرار نگرفته‌اند وجود دارد. کاهش چین خوردگی - به این ترتیب محدودیت در انجام فرآیندهایی چون لبه زنی کاهش پیدا می‌کند.

کاهش برگشت فنی - استفاده پالسهای ضربه‌ای در انتهای کورس پرس، برگشت فنی قطعه را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد.

به حداقل رسیدن اعوجاج در فرمهای موضعی - فشارهای تماسی و سرعتهای بالای فرآیند الکترومغناطیسی می‌تواند اعوجاجها در فرمهای موضعی را به حداقل برساند.

نمونه‌ای از کاربرد این روش برای تولید یکپارچه قاب داخلی درب آلومینیومی خودروی کوالیر شرکت جنرال موتورز مورد استفاده قرار گرفته است. قطعه پیش‌فرم که گوشه‌های آن نرم شده، در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی به فرم نهایی شکل داده شده است. تولید این قطعه از جنس آلومینیوم با روشهای متداول امکان‌پذیر نیست [Error! Reference source not found.] (شکل ۳).



شکل ۳ فرآیند شکل دهی تکمیلی الکترومغناطیس که بر روی قاب درب خودرو انجام شده است. تصاویر نشان می دهد که قطعه آلومینیومی پیش فرم شده نرم شده که با روش الکترومغناطیس شکل دهی شده است بسیار مشابه نمونه فولادی آن است.

شکل دهی در سرعت بالا

به منظور درک بهتر نکات بخش قبل، در این بخش، سازوکارهای شکل پذیری در سرعت های بالا و نیز معیارهای ساده شده ای که می تواند در طراحی فرآیندهای شکل دهی پرسرعت به کار رود مورد بررسی قرار می گیرد. پیشرفتهای انجام شده در زمینه های شکل دهی سستی و شکل دهی سوپرپلاستیک، می تواند به عنوان مبنایی برای اصول فنی و قواعد طراحی مهندسی مورد نیاز در شکل دهی پرسرعت مورد استفاده قرار گیرد.

در فرآیند شکل دهی سستی، معمولاً مهمترین چالشهای طراحی قالب آن است که ورق فراتر از حدود کشش خود کشیده نشود و عمق کشش ورق در ماتریس نیز به اندازه ای نباشد که منجر به چین خوردگی آن شود. مبنای تئوری ناپایداری ورق در اثر کشش به کارهای پژوهشگرانی چون کانسیدر [Error! Reference source not found.]، سویفت [Error! Reference source not found.] و مارسینیاک و کوزینسکی [Error! Reference source not found.] برمی گردد. با توسعه نمودارهای حد کشش (FLD)، توسط محققانی چون کیلر و گودوین، این پژوهشها کاربردهای عملی و گسترده ای یافت [Error! Reference source not found.]. این نمودارها وابسته به رفتار کرنش سختی ورق، ناهمسانگردی، ریزساختار و پارامترهای متعدد دیگری (از قبیل پدیده

پیچیده مسیرهای کرنش غیر تناسبی) است. علیرغم این پیچیدگیها، این روش تا حد زیادی مبنای روش تحلیل کاربردی فرآیندهای شکل‌دهی ورق می‌باشد.

به طور مشابه در شکل‌دهی سوپرپلاستیک مطالعات تحلیلی متعدد و ارزشمندی درباره ارتباط حساسیت نرخ کرنش ماده و درصد ازدیاد طول نسبی ماده انجام گرفته است [Error! Reference source not found.].

همچنین داده‌های تجربی نشان داده که نرخ حساسیت به کرنش، عامل مهمی در تعیین مقدار کرنش شکست کشش تک محوری است [Error! Reference source not found.]. بر همین اساس، در تحلیل مهندسی شرایط فرآیند شکل‌دهی سوپرپلاستیک، نرخ کرنش و دما به گونه‌ای انتخاب می‌شود که حساسیت به نرخ کرنش ماده به حداکثر برسد. برای مطالعه دقیقتر این فرآیند، باید تکامل ریزساختار با زمان و کرنش و نیز وضعیت کرنش چند محوره در فرآیندهای عملی را مورد بررسی قرار داد. البته در کاربردهای مهندسی، به دلیل عدم وجود این مطالعات، از فرضیات ساده‌کننده‌ای برای تحلیل فرآیندها استفاده شده که تا حدود زیادی با موفقیت همراه بوده است. در کاربردهای عملی شکل‌دهی الکترومغناطیس نیز استفاده از روشهای تحلیل طراحی ساده سازی شده اجتناب ناپذیر است. در ادامه، روشهای تئوری برای تحلیل فرآیند مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که انطباق مناسبی با داده‌های تجربی دارد.

برای بررسی شکل‌پذیری ماده در سرعت‌های بالا، سه روش تحلیلی وجود دارد. نخست آنکه، هو و داهن [Error! Reference source not found.] از روش المان محدود یک بعدی برای مطالعه شکست حلقه‌های باریک و نمونه‌های کشش در برابر کشش پرسرعت استفاده کردند. این مطالعه به بررسی ناپایداری ناشی از گلوئی منفرد ناشی از یک عیب محدود می‌شود. در این پژوهش نشان داده شده که در فرآیند انبساط حلقه، کرنش شکست به طور یکنواخت با سرعت انبساط افزایش می‌یابد که این پدیده به صورت تجربی نیز با آزمایشهای آلتینوا و همکارانش صحت‌گذاری شد [Error! Reference source not found.]. تفاوت مهم میان کشش تک محوره و انبساط حلقه را باید مورد توجه قرار داد. در حالت نخست، موج بارگذاری می‌تواند سبب پارگی نمونه از انتهای در حال حرکت، در کرنشهای بسیار پایین شود. این مساله که توسط ون کارمن و دوئز [Error! Reference source not found.] مورد مطالعه قرار گرفته نشان می‌دهد که شرایط مختلف شتاب گرفتن نمونه می‌تواند بر شکل‌پذیری ورق تاثیر

بگذارد. به طور مشابه، ضربه ناشی از کاهش شتاب نمونه هم می‌تواند تأثیرات مثبت یا منفی بر شکل‌پذیری داشته باشد، که متعاقباً مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شنوی و فروند [Error! Reference source not found.] روشی تحلیلی برای انشقاق گلولی شدن در نرخ کرنشهای بالا برای انبساط کرنش صفحه‌ای یک ماده وابسته به نرخ کرنش ارائه کرده‌اند. این روش مبتنی بر قاعده انشقاق است که توسط هیل بیان شد [Error! Reference source not found.]. تحلیل آنها نشان می‌دهد که برای ماده‌ای که طی شتاب گرفتن اولیه آن در معرض امواج تنش قرار نگرفته، ناپایداری در اثر نیروهای اینرسی به تاخیر می‌افتد. همچنان که سرعت افزایش می‌یابد طول موجی که در آن ناپایداری رشد می‌کند کاهش یافته، به گونه‌ای که در سرعت‌های بالای نمونه، گلولی‌های چندگانه رخ می‌دهد. این مساله دو وجه دارد. نخست آنکه، همچنانکه یک گلولی رشد می‌کند، تمایل دارد تا نواحی مجاور خود را بی‌بار کند، به گونه‌ای که با افزایش تغییر شکل، تنش افزایش می‌یابد. دوم آنکه، با شکل‌گیری گلولی، شتاب شعاعی ایجاد شده، که به نوبه خود مجدداً باعث افزایش تنش می‌شود. در این تحلیل، نمونه نسبت طول به عرض مشخصی داشته و در جهت بعد سوم بی‌نهایت فرض شده است. آنها دریافتند که همچنانکه نسبت عرض به طول نمونه‌ها افزایش می‌یابد، دوره تناوب وضعیت غالب گلولی کاهش یافته و تنش دینامیکی که نمونه می‌تواند تحمل کند افزایش می‌یابد. به همین دلایل، انتظار می‌رود که با افزایش ابعاد مقطع و سرعت تغییر شکل، شکل‌پذیری بهبود یابد.

مشاهدات تجربی انطباق خوبی با این مدل دارد. پژوهش آلتینوا و همکارانش [Error! Reference source not found.] نشان داده که کرنش شکست در انبساط حلقه می‌تواند تا دو برابر نسبت به حالت شبه ایستا برای آلومینیومهای 6061-T4، 6061-T6 و مس OFHC بازپخت شده افزایش یابد. همچنین دوره تناوب گلولی شدن با افزایش سرعت انبساط کاهش چشمگیری می‌یابد. لازم به ذکر است که در سرعت‌های بسیار بالای انبساط، حلقه تبدیل به ترکش می‌شود.

آزمایشهایی نیز انجام شده که در آن برای جلوگیری از پارگی نمونه از یک قالب فولادی که نمونه را دربر گرفته استفاده شده است. در این موارد، نمونه از سرعت بالا به طور ناگهانی متوقف شده و در نمونه کرنشهای بالایی ایجاد می‌شود. در انبساط حلقه بدون قالب، چنانچه حلقه دچار پارگی نشود، سرعت آن، با تبدیل انرژی جنبشی به کار پلاستیک، به صفر می‌رسد. این امر بیانگر آن است که: (۱) انجام آزمایشهای با سرعت انبساط ثابت دشوار است و (۲) برای

برآورد بهبود شکل‌پذیری در سرعت‌های بالا، ممکن است برای مهار نمونه استفاده از قالب مورد نیاز باشد.

تامهان و همکاران [Error! Reference source not found.] تاثیر ارتفاع حلقه و لوله را برای حلقه‌هایی با ضخامت ۱ میلیمتر، قطر ۳۱ میلیمتر و ارتفاع ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلیمتر مورد بررسی قرار دادند. این دسته از آزمایشها نشان داده که شکل‌پذیری نمونه‌های مهار نشده با افزایش ارتفاع حلقه افزایش می‌یابد. کرنشهای محیطی بیش از ۶۰ درصد در نمونه‌های بلند مشاهده شده، در حالیکه در نمونه‌های با ارتفاع ۱ میلیمتر این مقدار تنها به ۳۰ درصد می‌رسد. با وجود آنکه نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته به لحاظ هندسی با مدل کرنش صفحه‌ای شنوی و فروند کاملاً متفاوت است، اثر اندازه نمونه بر گلوئی شدن آن مشابه است. همچنین، با بزرگ شدن ارتفاع نمونه، تعداد ترکشها کاهش می‌یابد. در سرعت ۱۳۵ متر بر ثانیه، نمونه با ارتفاع ۴ میلیمتر به ۱۰ عدد ترکش تبدیل می‌شود، در حالیکه نمونه با ارتفاع ۱۶ میلیمتر سالم باقی می‌ماند.

اگرچه میان نتایج آزمایش و مدل شنوی و فروند ارتباط معناداری وجود دارد، ولیکن مقایسه مستقیم این مدل با نتایج تجربی تا حدودی دشوار است. نخست آنکه، آزمایشها می‌گویند مقادیر تمامی ابعاد نمونه مهم است و نمی‌توان آنها را در این مدل در نظر گرفت. دوم آنکه، بررسی تغییرات سرعت پیچیده و غیر یکنواخت (از قبیل اثر ون کارمن) حایز اهمیت است. سوم آنکه، سرعت آزمون با زمان ثابت نیست. این موارد را می‌توان با روش المان محدود مورد بررسی قرار داد. پاندولف، کریستل و اوریتز [Error! Reference source not found.] کاربرد روش المان محدود با وابستگی به نرخ بارگذاری را در مساله انبساط حلقه نشان داده‌اند.

آخرین نکته‌ای که در این مساله نیاز به توجه دارد، تاثیر ضربه میان قطعه و قالب است. همانگونه که پیشتر نیز اشاره شد، قالب می‌تواند حرکت نمونه را پیش از شکست مهار کند. همچنین، زمانی که قطعه با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه یا بیشتر به قالب برخورد می‌کند، فشارهای ضربه بسیار بالایی (در مرتبه تنش جریان قطعه) ممکن است ایجاد شود. در صورت وجود ناپیوستگی، ممکن است اثر «حفره زنی اینرسی» ایجاد شده، که در آن قطعه پاره شود. اگرچه، بر روی یک سطح منحنی هموار، ضربه می‌تواند تنش فشاری بزرگی در ضخامت ایجاد کند که می‌تواند باعث انبساط صفحه‌ای نمونه (مشابه حالتی که در فرآیند اتوکشی رخ می‌دهد) شود. به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن این تاثیر برای توجیه شکل‌پذیری بسیار بالا (بیش از ۱۰۰ درصد، نزدیک به حالت کرنش صفحه‌ای) که در آلومینیوم، مس و آلیاژهای آهنی در

آزمایشهای بلانتریمان و داهن [Error! Reference source not found.] در این آزمایشها، ورقهای [Reference source not found.] مشاهده شده، ضروری باشد. در این آزمایشها، ورقهای تخت در قالبهای مخروطی با سرعت بالا کشیده می‌شود. نمونه با سرعتی در مرتبه ۱۰۰ متر بر ثانیه به قالب مخروطی برخورد کرده و آثار سطح قالب بر روی نمونه حک شده که مشابه پدیده سکه زنی است. مباحث مربوط به افزایش پایداری و شکل‌پذیری در اثر مقاومت گلوئی شدن اینرسی تنها حدود دو برابر حد شکل‌دهی را می‌تواند افزایش دهد، حال آنکه در اینجا تقریباً پنج برابر افزایش شکل‌پذیری مشاهده شده است. به نظر می‌رسد که در این مورد تاثیر مثبت وضعیت تنش فشاری ناشی از ضربه را بر شکل‌پذیری باید در نظر گرفت.

شواهد تجربی و تحلیلی زیادی وجود دارد که شکل‌پذیری ورق در سرعتهای بالا می‌تواند به نحو چشمگیری حد شکل‌دهی ماده را افزایش دهد. همچنین راهکارهایی برای بهره‌گیری از این ویژگی در حوزه ساخت و تولید در حال شکل‌گیری است. به منظور طراحی موثر فرآیندهای کاربردی ساخت و تولید، شناخت کمی شکل‌پذیری در شرایط پیچیده بارگذاری ضروری است. در حال حاضر این مساله به عنوان یکی از زمینه‌های نوین در شکل‌دهی ورقهای فلزی مطرح بوده و مطالعه و بررسی تجربی و تئوری آن (به ویژه به روش المان محدود) مورد توجه پژوهشگران قرار دارد.

۵. خواص مکانیکی قطعات شکل‌دهی شده به روش انفجاری

خواص مواد پس از شکل‌دهی انفجاری را نمی‌توان به صورت یک عنوان کلی توصیف کرد. بسیاری از مواد، همانند موادی که با روشهای مشابه شکل‌دهی متداول فرم گرفته باشند، استحکام آنها افزایش می‌یابد. غالب فولادهای کربنی و ضد زنگ رفتاری به این صورت دارند. این افزایش استحکام، علاوه بر الگوهای تنش یکنواختی که معمولاً مشخصه قطعات شکل‌دهی شده به روش انفجاری است، غالباً اشکالی باکیفیت‌تر از قطعات مشابهی ایجاد می‌کند که به روش مکانیکی تولید شده‌اند. آلیاژهای آلومینیوم با شکل‌گیری انفجاری، بدون تغییر می‌مانند. استحکام حد نهایی آنها تقریباً ثابت مانده و افزایش استحکام تسلیم آنها بسیار اندک است.

سخت شدن انحلالی (**Precipitation Hardening**) فولادهای ضدزنگ، که در دمای اتاق آستنیته بوده و موقع تغییر شکل مارتنزیتی می‌باشند، باعث افزایش چشمگیر استحکام تسلیم و حد

نهایی پس از شکل دهی انفجاری می شود. این افزایش استحکام، که در بخش ۱۰ به طور مفصلتر بدان پرداخته شده، چنانچه تغییر شکل در دماهای بسیار سرد انجام شود، تقویت می شود.

مقایسه ای از تاثیرات شکل دهی انفجاری و متداول برای سه ماده، فولاد کم کربن، **AISI 304-L** و **HY100** توسط افای ون ولی انجام شد. گنبد های قطور از ورق هایی با ضخامت ۱۲ میلیمتر از هر ماده با دو روش پرسکاری سرد و شکل دهی انفجاری تولید شد. ون ولی به عنوان نتیجه آزمون های متعددی که بر روی شکل دهی این سه ماده انجام داد به جمع بندی های زیر رسید:

(۱) الیاف بیرونی قطعات شکل دهی شده به روش انفجاری، تنش های فشاری را نشان می دهد؛ در حالیکه در همان موقعیتها، بر روی قطعات تولید شده به روش پرسکاری تنش های کششی مشاهده می شود.

(۲) کارسختی شدیدی در بخش دامنه گنبد های پرسکاری شده می شود؛ در حالیکه کارسختی روی تمام شکل گنبد های تولید شده به روش شکل دهی انفجاری به صورت یکنواخت توزیع شده است.

(۳) چقرمگی اساساً برای هر دو نوع قطعات پرسکاری و شکل دهی انفجاری یکسان است.

(۴) مقاومت به خوردگی و تردی هیدروژنی برای هر دو روش تقریباً یکسان بود. نتایج این مطالعه (برای این مواد) نشان می دهد که شکل دهی انفجاری قطعاتی تولید می کند که به لحاظ مکانیکی، برابر یا احتمالاً بهتر از قطعات پرسی می باشند، زیرا کرنش در آنها یکنواخت تر است.

۵. خواص مکانیکی فلز پس از شکل دهی انفجاری

با در نظر گرفتن نوع قطعات و آرایش های تجربی، لازم است خواص فلزات را پس از شکل دهی انفجاری مورد بررسی قرار داد. در این بخش تغییرات سختی، استحکام، خستگی، شکل پذیری و چقرمگی فلزات تغییر شکل یافته به طور خلاصه مورد بررسی قرار می گیرد تا شاخصی از خواص مکانیکی قطعات شکل داده شده به روش انفجاری به دست آید.

۵.۱. سختی

در جدول ۳ برخی از مقادیر سختی به صورت مقایسه ای آورده شده است. این مقایسه بین جنس های آهن [۳۲]، فولاد کم کربن [۳۳، ۳۴] و آلومینیوم در دو حالت تحت کرنش تک محوری استاتیک و دینامیک انجام شده است. برای آهن و فولاد، داده ها نشان می دهد که به غیر از یک مورد استثناء،

سختی و بالتبع کارسختی ناشی از تغییر شکل دینامیک در محدوده نرخ کرنش 10^{-1} تا 10^3 s کمتر از موارد مشابه با تغییر شکل استاتیک با کرنش برابر می‌باشد. نتایج مشابهی نیز در شرایط شکل‌دهی گزارش شده است. سختی فولاد کم کربن $0.025\% \text{ C}$ که به روش انفجاری آزاد تا 10 و 40% کاهش ضخامت شکل داده به ترتیب به اندازه 8 و 4 درصد کمتر از موارد مشابه است که به روش هیدرولیک شکل داده شده‌اند [۳۵]. ویلیامز [۳۶] نیز کرنش سختی کمتری را برای فولاد کم کربن $0.08\% \text{ C}$ و تیتانیوم خالص با خلوص تجاری گزارش کرده است. در یک مورد استثناء، افزایش سختی برای فولاد $0.05\% \text{ C}$ پس از بارگذاری دینامیک توسط هریس و وایت [۳۴] گزارش شده است. پیشنهاد شده که پیرسختی یا توزیع غیریکنواخت کرنش ممکن است عامل این نتیجه نامتشابه باشند.

جدول ۳ مقایسه سختی پس از پیش-کرنش تک محوره استاتیک یا دینامیک

ماده	روش اعمال	درصد کرنش	مقادیر سختی			درصد اختلاف
			اندازه‌گیری سختی	کرنش استاتیک	کرنش دینامیک	
آهن آرمکو	فشار	2.6	ویکرز	105	95	-9.5
فولاد کم کربن ($0.05\% \text{ C}$)	کشش	5.5	ویکرز	162.4	212.0	+30.5
فولاد کم کربن ($0.2\% \text{ C}$)	کشش	8.0	ویکرز	155	151	-2.6
فولاد کم کربن ($0.24\% \text{ C}$)	فشار	4.1	برینل	126	113	-10.3
آلومینیوم	گزارش نشده	35	ویکرز	32.3	33.8	+4.6

* درصد اختلاف سختی = ((سختی نمونه پیش-کرنش شده دینامیک منهای سختی نمونه پیش

کرنش شده استاتیک) تقسیم بر سختی نمونه پیش-کرنش شده استاتیک) ضربدر ۱۰۰

از سوی دیگر، آلومینیوم، جدول ۳، مس [۵۹]، آلیاژهای نیکل [۳۶] و فولاد ضدزنگ آستینیتی Cr-Ni [۳۸، ۳۹، ۶۰-۶۲] در اثر شکل‌دهی انفجاری کارسختی بیشتری نسبت به شکل‌دهی با نرخ

کرنش پایین پیدا می‌کنند. سختی آلیاژهای آلومینیوم سختی پذیر به روش انحلالی پس از تغییر کرنش به روشهای استاتیک و دینامیک تقریباً برابر است [۴۰، ۴۱، ۶۰، ۶۳]. این مساله نشان می‌دهد که هنگامی که نابجاییهای ریزساختار یا دیگر عیوب شبکه نقش کمی در سخت شدن دارند، سختی چندان نسبت به نرخ کرنش حساس نیست. رفتار فولادهای آستنیتی **Cr-Ni** به دلیل اثرات مربوط به شکل‌گیری وابسته به نرخ ساختار **hcp** فاز ϵ و مارتنزیت **bcc** پیچیده‌تر است.

۵.۲. استحکام

برای مقایسه استحکام مواد، مقاومت به تغییر شکل یا شکست، مقایسه اندازه‌گیریهای تنش جریان، مقاومت به تغییر شکل پلاستیک بدون اصطکاک انجام شده است [۳، ۳۱]. نمونه‌های هر ماده جداگانه تا کرنش مشخصی، ستون پیش-کرنش جدول ۴، تحت کرنش قرار می‌گیرند. سپس تنشهای جریان استاتیک هر نمونه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار کل کرنش که برابر با مجموع پیش-کرنش و کرنش تنش جریان است، در ستون کرنش کل جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر تنشهای جریان برای نمونه‌های پیش-کرنش شده استاتیک و دینامیک، به ترتیب در ستونهای چهار و پنج آمده است. همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، آهن و فولاد کم کربن با پیش-کرنش استاتیک، از تنش جریان بالاتری نسبت به نمونه‌های با پیش-کرنش شده دینامیک برخوردارند. این پدیده نیز مستقیماً به نتایج سختی که در بخش قبل توصیف شده مرتبط است. آلیاژ کارسختی پذیر **Al-Mg** رفتاری مشابه آهن و فولاد کم کربن از خود نشان می‌دهد. البته بخش زیادی از داده‌های مربوط به سختی موجود برای آلومینیوم با خلوص بالا روند معکوسی را نشان می‌دهد. بیشترین مزیت برای استحکام نهایی آلومینیوم از پیش-کرنش دینامیک را می‌توان در کرنشهای اضافی کوچک مشاهده کرد، مانند آلومینیوم ۹۹٫۹۵٪ با پیش-کرنش ۱۴٫۲٪ و کرنش کل ۱۵٪ یا آلومینیوم ۹۹٫۹۹٪ با پیش-کرنش ۵٪ و کرنش کل ۷٪ (جدول ۴).

جدول ۴ مقایسه تنشهای جریان پس از پیش-کرنش استاتیک یا دینامیک

ماده	پیش-کرنش (%)	کرنش کل (%)	تنش جریان استاتیک از نمونه‌های با پیش-کرنش استاتیک (MPa)	تنش جریان دینامیک از نمونه‌های با پیش-کرنش دینامیک (MPa)	اختلاف تنشهای جریان استاتیک و دینامیک در نمونه‌های پیش-کرنش *

شده						
-8.0	-17.9	206.2	224.1	2.7	2.5	آهن آرمکو
-12.4	-32.4	229.6	262.0	8.0	7.8	فولاد معمولی (0.025% C)
-18.3	-56.5	252.4	308.9	15.9	15.7	
-18.9	-62.1	266.8	328.9	4.4	2.9	فولاد معمولی (0.2% C)
-6.2	-22.1	334.4	356.5	5.9	2.9	
-8.0	-74.5	288.2	362.7	1.6	1.2	فولاد معمولی (0.2% C)
-3.8	-45.5	337.9	383.4	2.0		
-20.5	-42.1	490.2	532.3	5.0	4.2	
-11.9	-28.3	572.3	600.6	7.0		
0.8	-3.5	339.9	343.4	5.2	5.0	فولاد ضدزنگ (AISI 304)
10.7	50.3	519.2	468.9	15.2	15.0	
4.6	2	47.2	45.2	15.0	14.2	آلومینیوم (۹۹,۹۵٪)
2.7	1.3	49.6	48.3	30.0		
10.9	5.4	54.1	48.7	7.0	5.5	آلومینیوم (۹۹,۹۹٪)
3.5	2	58.8	56.8	11.0		
-5.4	-13.1	228.2	241.3	5.2	5.0	آلیاژ Al-2.5Mg (5056-O)
-2.3	-8.3	355.1	363.4	15.2	15.0	

* درصد اختلاف تنشهای جریان = ((تنش جریان نمونه پیش-کرنش شده دینامیک منهای تنش

جریان نمونه پیش کرنش شده استاتیکی) تقسیم بر تنش جریان نمونه پیش-کرنش شده استاتیکی)

ضربدر ۱۰۰

شکل پذیری نسبی نیز که با تغییر طول نسبی و کاهش سطح مقطع در شکست اندازه گیری می شود، مورد بررسی قرار گرفته است. قاعده کلی ای برای مرتبط کردن شکل پذیری با نرخ پیش-کرنش برای یک گروه آلیاژی وجود ندارد. به همین ترتیب ارتباطی کلی نیز میان رابطه پیش-کرنش و استحکام با شکل پذیری یک آلیاژ مشخص وجود ندارد.

۵.۳. چقرمگی شکست

بر مبنای مشاهدات موجود که به طور مختصر در ذیل اشاره شده، شکل‌دهی انفجاری تاثیر قابل توجهی بر چقرمگی شکست ندارد. اگریکولا و همکاران [۴۴] مقایسه‌ای میان مواد شکل‌دهی نشده و شکل‌دهی شده به روش انفجاری که تحت عملیات حرارتی یکسان قرار گرفته بودند انجام دادند. عملیات حرارتی پس از شکل‌دهی اعمال شده بود. مقادیر چقرمگی شکست کرنش صفحه ای، **KIc**، برای آلومینیوم **7039-T62** و فولادهای ابزار **HP9-4-25** و **D6AC** و فولادهای **12Ni-5Cr-3Mo** و **18% Ni** که تحت عملیات حرارتی انحلالی و پیرسختی مصنوعی قرار گرفته بودند به دست آمد. شکل‌دهی بر روی یک قالب مادگی کف-تخت انجام شد. تغییرات در مقادیر چقرمگی شکست برای آلومینیوم **7039-T62** ثبت شده است. البته تغییرات قابل مشاهده‌ای که ناشی از شکل‌دهی باشد در نتایج ایجاد نشده بود. تحلیل آماری انجام شده بر روی نتایج حاصل از فولاد **18% Ni** نشان می‌دهد که اختلاف در مقدار **KIc** بین ورقهای اصلی و شکل‌دهی شده ناچیز است. همین نتیجه برای سایر فولادهای مورد آزمایش نیز به دست آمده است.

۵.۴. رفتار خستگی

شناخت اثر فرآیند تولید بر روی عمر خستگی قطعه برای امر طراحی موضوع حایز اهمیتی است. علاوه بر مقادیر مطلق مقاومت به خستگی، مقایسه نتایج فرآیندهای خاص نیز اهمیت دارد. مایکسل [۴۵] نمونه‌های آلومینیوم **2014-T6** که به روشهای انفجاری و پرس آرام با لاستیک شکل داده شده بود را با یکدیگر مقایسه کرد. تحلیل آماری نتایج نشان داد که عمر خستگی تاثیر چندانی از فرآیند شکل‌دهی نپذیرفته و فارغ از نوع فرآیند، عمر خستگی مواد شکل‌دهی شده اختلاف اندکی با مواد شکل‌دهی نشده داشته است.

به طور مشابه، افستول و همکاران [۴۶] اثر شکل‌دهی هیدرولیک معمولی و شکل‌دهی انفجاری با فاصله توقف را بر حد دوام فولادهای ضدزنگ **304**، **316** و **347** مقایسه کردند. آنها دریافتند که قطعات شکل‌دهی شده به روش انفجاری از فولادهای ضدزنگ **304** و **307** بیش از ۱۰ درصد از حد دوام بالاتری نسبت به قطعات شکل‌دهی شده به روش معمولی برخوردارند. البته نتایج به دست آمده برای فولاد ضدزنگ **316** اختلافی را میان استحکام خستگی بین دو روش نشان نمی‌دهد. مطالعات انجام شده درباره خستگی با تعداد پایین، توسط باودری و کوپر [۴۷]، بهبود در خواص خستگی فولادهای منگیزی آستنیتی را پس از شکل‌دهی انفجاری در مقایسه با شکل‌دهی معمولی نشان می‌دهد.

ویلیامز گزارش کرده که استحکام خستگی ۱۴ نوع فلز و آلیاژ فلزی که به روش انفجاری شکل دهی شده‌اند عموماً مشابه شکل دهی استاتیک است. موارد مورد مطالعه عبارت بودند از هفت نوع فلز پایه، پنج نوع آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر و دو آلیاژ غیر قابل عملیات حرارتی که مجموعاً سه نوع ساختار اصلی را دارا بودند: مکعبی وجوه مرکز پر (fcc)، مکعبی مرکز پر (bcc) و شش وجهی متمرکز (hcp). آزمایش تصادفی از دیگر قطعات شکل دهی شده به روش انفجاری نیز این نتیجه را تایید کرده است [۴۸]. به طور خلاصه، مشاهدات گزارش شده بیانگر آن است که شکل دهی انفجاری در مقایسه با روشهای معمولی، بر خواص خستگی آلیاژهای آلومینیوم تاثیر کمی دارد، در حالیکه بهبود قابل توجهی را بر استحکام خستگی فولادهای ضدزنگ نشان می‌دهد.

۶. ریزساختار پس از شکل دهی انفجاری

به منظور درک بهتر ریزساختار ماده شکل دهی شده به روش انفجاری لازم است تا عواملی که بر ریزساختار تاثیر می‌گذارند را تفکیک نمود. موج شوک عبوری از محیط حایل و برخورد آن به فلز، موج شوک ایجاد شده در فلز در اثر برخورد با قالب یا موج ایجاد شده در اثر انفجار خرج در مجاورت ورق در روش تماسی همگی اثراتی بر روی ریزساختار فلز ایجاد می‌کنند. برای بررسی موج ضربه عبوری از محیط ناقل انرژی، نوعاً از آرایش شکل دهی آزاد با فاصله توقف استفاده می‌شود که تا حد قابل توجهی اثر تماس ورق با قالب حین شکل دهی در آن حذف می‌شود. در این آرایش شکل دهی، فرافشار موج ضربه در مرتبه **100-500 MPa** بوده و نرخ کرنش نیز در مرتبه **102-103 s-1** است. تفاوت در ریزساختار پس از شکل دهی انفجاری و شکل دهی با سرعت پایین را می‌توان در تراکم و توزیع عیوب شبکه مانند نابجاییها، حفره ها، عیوب پشته ای، دوقلوییهای مکانیکی و مقدار محصولات استحاله‌های ناشی از کرنش در آلیاژهایی که به این تغییرات حساس اند، مشاهده نمود. در بخشهای بعد، دوقلویی شدن، عیوب نقطه‌ای و انتقالهای فاز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۶.۱. دوقلویی شدن

عموماً پذیرفته شده که هنگامی که نرخ تغییر شکل افزایش می‌یابد، دوقلویی شدن می‌تواند وضعیت تغییر شکل ترجیحی در بسیاری از فلزات باشد چراکه باعث آزاد شدن تنشهای داخلی موضعی می‌شود در حالیکه در نرخ کرنشهای پایین، سازوکار لغزش باعث آزاد شدن تنشهای داخلی موضعی می‌شود. فلزات با ساختار **bcc** در اثر شکل دهی انفجاری آزاد عمدتاً به روش دوقلویی تغییر شکل می‌دهند [۲۲]. دوقلویی در فولاد کم کربن شکل داده شده به روش انفجاری مشاهده شده ولی در

فولادهای پرکربن‌تر چنین نیست. ابراز شده که آهن و فولاد کم کربن با کربن کمتر از 0.2% در نرخ کرنشهای فرآیند شکل‌دهی انفجاری با سازوکار دوقلویی تغییر شکل می‌دهند. ویلیامز [۳۶] و هالینگام [۳۷، ۴۹] در فولاد کم کربن شکل‌دهی شده به روش انفجاری آزاد، دوقلویی مشاهده کردند در حالیکه در موارد مربوط به فرآیندهای کم سرعت هیچ دوقلویی مشاهده نشده بود. در فولاد 0.1% کربن شکل داده شده به روش انفجاری نیز دوقلویی مشاهده شده است [۵۰]. به علاوه، تغییر شکل با سازوکار دوقلویی در سرعت‌های مربوط به شکل‌دهی انفجاری در تنگستن (bcc) و کروم (bcc) انتظار می‌رود ولی در مولیبدن (bcc)، نیوبیم (bcc)، وانادیم (bcc) و تانتالیم (bcc) این گونه نیست. فولادهای پراستحکام کم آلیاژی و پرآلیاژی نیز این نوع سازوکار تغییر شکل را در شکل‌دهی پرسرعت از خود نشان نمی‌دهند.

در خصوص وجود دوقلویی شدن در فولادهای ضدزنگ آستینیتی کروم-نیکل (سری AISI 300) که به صورت دینامیک تغییر شکل یافته و انرژی عیب پشته پایینی دارند همچنان اختلاف نظر وجود دارد. از سویی ون ولی و وربراک [۵۱] علایمی بر روی بشقابهای فولاد ضدزنگ 304 که به روش انفجاری شکل داده شده بودند مشاهده کردند و آن را به عنوان تغییر شکل دوقلویی در نرخ کرنش بالا و بدون ضربه با قالب تفسیر کردند. از سوی دیگر در فولادهای ضدزنگ 301، 304، 316 و 347 پس از شکل‌دهی انفجاری دوقلویی وجود ندارد. شکل‌دهی انفجاری آزاد فولاد ضدزنگ 321 منجر به آن شده که 10-30٪ از ریزساختار دوقلویی شود در حالیکه در شکل هیدرواستاتیک این رقم در حدود 1-4٪ است. دوقلویی در بشقابهای فولاد ضدزنگ 321 که به روش انفجاری با قالب با فاصله توقف شکل‌دهی شده بودند به روش میکروسکوپ الکترونی عبوری شناسایی شده است [۵۲].

ویلیامز [۵۳] در مطالعه تیتانیوم با خلوص تجاری (hcp) دریافت که دوقلویی شدن در روش شکل‌دهی آرام تنها اندکی از روش شکل‌دهی انفجاری با کرنش یکسان کمتر است. تفاوت در رفتار دوقلویی شدن فلزات می‌تواند مربوط به تفاوت در اصطکاک شبکه و انرژی عیب پشته باشد. انرژی تماسی، انرژی عیب پشته، پایتتر باعث کاهش انرژی آغازش برای آغاز دوقلویی شدن می‌شود. شکل‌دهی انفجاری انرژی بیشتری نسبت به شکل‌دهی آرام اعمال می‌کند و این امکان برای برخی از فلزات وجود دارد که انرژی ورودی از انرژی مورد نیاز برای آغازش دوقلویی بیشتر شود. در حالیکه برای فلزات دیگری که انرژی عیب پشته بالاتری دارند و به انرژی بالاتری برای آغازش دوقلویی نیاز دارند، انرژی ورودی از شکل‌دهی انفجاری ممکن است همچنان برای القای آغازش دوقلویی کافی نباشد.

عامل دیگر، اصطکاک شبکه ماده است. هرچه اصطکاک شبکه بیشتر باشد تنشهای داخلی موضعی تولید شده هنگام شکل‌دهی انفجاری نیز بالاتر بوده و احتمال دوقلویی شدن بیشتر می‌شود.

۶,۲. عیوب نقطه ای

مشخص شده که نابجاییهای سریعتز، از تعداد بیشتری از حفره ها، بین نشینیها و دیگر عیوب نقطه ای موجود عبور می کنند [۳۵]. از این مساله برای توجیه نفوذ بیشتر و بالتبع اثرات پیرسختی بهتر و ایجاد تراکم بالاتر حفره ها در شکل دهی انفجاری نسبت به شکل دهی معمولی استفاده شده است. ون تورن و اوت [۵۴] نتیجه گرفته اند که رشد حلقه های نابجایی در بازپخت آلومینیوم **2219-O** شکل داده شده به روش انفجاری گواه محکمی برای وجود تراکم غیرتعدادی حفره ها است. از آنجا که مقایسه ای با ماده شکل دهی شده در سرعت پایتتر انجام نشده، وابستگی این عیوب به نرخ کرنش را نمی توان به طور مشخص بیان کرد.

۶,۳. انتقالهای فاز

آلیاژی که در اثر کرنش دچار استحاله فاز می شوند در نرخ کرنشهای گوناگون پاسخهای متفاوتی می دهند. هنگامی که فولاد ضدزنگ ۳۰۱ در کشش تک محوری دینامیک تغییر شکل می دهد [۵۵]، محصولات استحاله حتی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نیز شناسایی نمی شود. البته وجود مارتنزیت مکعبی مرکز پر آشکار شده با پراش پرتو ایکس، بیشتر از نمونه های تغییر شکل یافته در سرعت های پایین بوده است. از طرفی، بارگذاری تک محوری کششی فولادهای ضدزنگ ۳۰۲ [۳۶] و ۳۰۴ [۳۷] باعث ایجاد مارتنزیت کمتر در بارگذاری دینامیک نسبت به استاتیک می شود. مطالعات جامعتر بر روی فولاد ضدزنگ ۳۲۱ اختلافهای مشابهی را آشکار کرده است. ویلیامز [۵۳] مارتنزیت زوارشکل مکعبی مرکز پر را به عنوان یکی از انواع اصلی مارتنزیت در ماده شکل دهی شده به روش انفجاری مشاهده کرد. با شکل دهی آرام همان ماده مارتنزیت کمتری مشاهده کرد. البته هالینگام [۳۷] گواهی برای وابستگی مقدار این فاز به نرخ کرنش نیافت. ون ولی و وربراک [۵۱] فاز مارتنزیت مکعبی مرکز پر را در بشقابهای ۳۲۱ شکل دهی شده به روش انفجاری با قالب و با فاصله توقف و نیز در روش شکل دهی انفجاری تماسی مشاهده کردند. در مقابل، داگانو و پفانر [۴۲، ۴۳، ۵۶] ویژگیهای تغییر شکل مشابهی در فولاد ۳۲۱ شکل دهی شده به روش انفجاری و الکترویدرولیک را به عنوان دوقلویی مکانیکی توصیف کردند.

مور و گراس [۵۷] کشف کردند که ویژگیهای تغییر شکل نوعاً فشردگی استاتیک، نورد سرد یا شکل دهی انفجاری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ عبارتند از انباشتگی نابجایی، ورقه های مارتنزیتی مکعبی مرکز پر یا ریزدوقلویی. علاوه بر این، دوقلویی در فشارهای شوک کمتر از **1.5*104 MPa** رخ نداده است. در این فشارهای پایین، افزایش فشار تنها با افزایش عیب پشته و چگالی نابجایی

مشخص می‌شود. نتیجتاً پیشنهاد شده که اعمال نرخ کرنشهای بالا در شکل‌دهی انفجاری، در مقایسه با اعمال نرخ کرنشهای شکل‌دهیهای معمولی با همان میزان کرنش، منجر به ایجاد چگالی بالاتری از عیوب پشته، فاز ϵ شش وجهی متمرکز بیشتر و مارتنزیت مکعبی مرکز پر کمتر می‌شود. این مساله همچنان تحت اعتبارسنجی تجربی بوده و می‌تواند زمینه‌ای برای پژوهشهای آتی باشد.

بین خواص استحکامی و رفتار ریزساختار فولاد ضدزنگ ۳۰۴ تناقض وجود دارد. همانگونه که پیشتر بیان شد، در کرنش دهی دینامیک این ماده مارتنزیت کمتری نسبت به کرنش دهی استاتیک وجود دارد. از آنجا که مارتنزیت اثر استحکام بخشی قابل توجهی دارد، انتظار می‌رود که استحکام فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پس از تغییر شکل دینامیک کمتر از تغییر استاتیک باشد. البته، همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شد، استحکام فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پس از تغییر شکل دینامیک بزرگتر از آن پس از تغییر شکل استاتیک است. این مساله نشان می‌دهد که باید عوامل ریزساختار دیگری که موثر در خواص اند نیز وجود داشته باشد. پژوهش دقیقی در این خصوص تاکنون انجام نشده است.

همانگونه که پیشتر گفته شد در فرآیندهای شکل‌دهی که خرج در تماس با قطعه نبوده و قطعه به قالب برخورد نمی‌کند، مقدار فرافشار در مرتبه **100-500 MPa** است. نرخ کرنش نیز در محدوده **102-103 s-1** خواهد بود. از سوی دیگر، هنگامی که خرج در تماس با قطعه قرار می‌گیرد، فشار شوک می‌تواند در محدود **103** تا **2*104 MPa** باشد. نرخ کرنش در این حالت در حدود **104-107 s-1** است. در بخش بعد تاثیر امواج ضربه تولید شده در سطح فلز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۷. تاثیر متالورژیکی امواج شوک در فلزات

امواج تنش را می‌توان به انواع الاستیک، پلاستیک و امواج شوک دسته‌بندی کرد. امواج الاستیک تنها تغییر شکل الاستیک در فلز ایجاد می‌کنند. چنانچه دامنه موج تنش الاستیک از مقدار بحرانی تنش تسلیم ماده فراتر رود، در آن نرخ کرنش خاص ابعاد جسم تغییر خواهد کرد. به این موج، موج پلاستیک گفته می‌شود که می‌تواند طولی یا برشی باشد. اگر هندسه جسم به گونه‌ای باشد که کرنش تک محوری ایجاد شود، سرعت انتشار موج پلاستیک با افزایش فشار افزایش می‌یابد چرا که جریان عرضی فلز نمی‌تواند وجود داشته باشد. موجی که جبهه تیزی داشته باشد به عنوان موج شوک شناخته شده و نیازمند کرنش تک محوری است چرا که در این حالت امکان افزایش مولفه هیدرواستاتیک تنش تا سطوح بالا وجود دارد. هنگامی که این مولفه هیدرواستاتیک به اندازه چندین برابر تنش جریان دینامیک افزایش یابد، می‌توان فرض کرد که جامد مقاومتی در برابر برش نداشته و مدول برشی برابر صفر است (فرض هیدرواستاتیک). ریزساختار و خواص مواد در اثر شوک در برآورد عملکرد مواد شکل داده شده به روش انفجاری بسیار مهم است.

بدون استثناء، در جبهه شوک نابجایی ایجاد می‌شود. نابجاییهای تولید شده، ریزساختار نسبتاً پایداری پشت پالس شوک برجا می‌گذارند، اگرچه تاحدی تغییر آرایش، تکثیر یا تقلیل ممکن است در قسمت دنباله پالس یا پشت جبهه آن رخ دهد. در انرژیهای عیب پشته بالا (بیش از 70 mJ/m^2)، نابجاییها نمی‌تواند به اندازه محسوسی بزرگ شوند و لغزش عرضی پدیده غالب است. با فراهم بودن زمان کافی در پالس ضربه، این پدیده از ساختار سلولی شکل که به ویژه در نیکل قرار گرفته تحت بار ضربه غالب است، آرایه‌های نابجایی تولید می‌کند. همچنانکه آلیاژ شدن باعث کاهش انرژی عیب پشته می‌شود، لغزش عرضی و نابجاییهای آرایه‌های صفحه‌ای که شامل عیوب پشته‌ای امتداد یافته در صفحات $\{111\}$ fcc است، دشوار یا غیر ممکن می‌شود. در بسیاری از مواد، آرایه‌های منظم یا متناوب از عیوب پشته می‌تواند رژیمهای فاز جدید یا دوقلویی تولید کند. چگالی ریزساختاری و تغییرات در ریزساختار با افزایش فشار بیشینه افزایش می‌یابد. در مورد مواد مکعبی وجوه مرکز پر با انرژی آزاد عیب پشته بالا، افزایش تراکم نابجاییها با افزایش فشار بیشینه شوک سبب افزایش تراکم نابجایی در سلول می‌شود. این امر تنها زمانی می‌تواند رخ دهد که اندازه متوسط سلول کاهش یافته یا تعداد نابجاییهای تشکیل دهنده جداره‌های سلول افزایش یابد.

استحاله فاز ناشی از فشار در آهن و فولاد قابل توجه است. در فشار 13 GPa فاز α مکعبی مرکز پر به فاز ϵ شش وجهی متمرکز استحاله می‌یابد. سینتیک این تحول به قدری سریع است که با موج شوک انجام می‌شود. این استحاله‌های فازی به طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۵۹، ۶۰].

بارگذاری ضربه‌ای پدیده‌ای منحصر به فرد است چرا که سخت شدن و افزایش استحکام چشمگیری ناشی از موج انتشار موج شوک ایجاد می‌شود، در حالیکه کرنشهای پسماند کوچک و حتی ناچیزاند. هنگام مقایسه روشهای شکل‌دهی سرد معمولی مانند نورد سرد با تغییر شکل ضربه‌ای با معیار بهبود خواص مکانیکی ماده و بالتبع ریزساختار، در نورد سرد کرنشهای حقیقی بزرگتری نسبت به تغییر شکل ضربه‌ای مورد نیاز است. به علاوه، به نظر می‌رسد که برخلاف غالب روشهای شکل‌دهی معمولی، بافت سطحی خاصی به واسطه امواج ضربه ایجاد نمی‌شود.

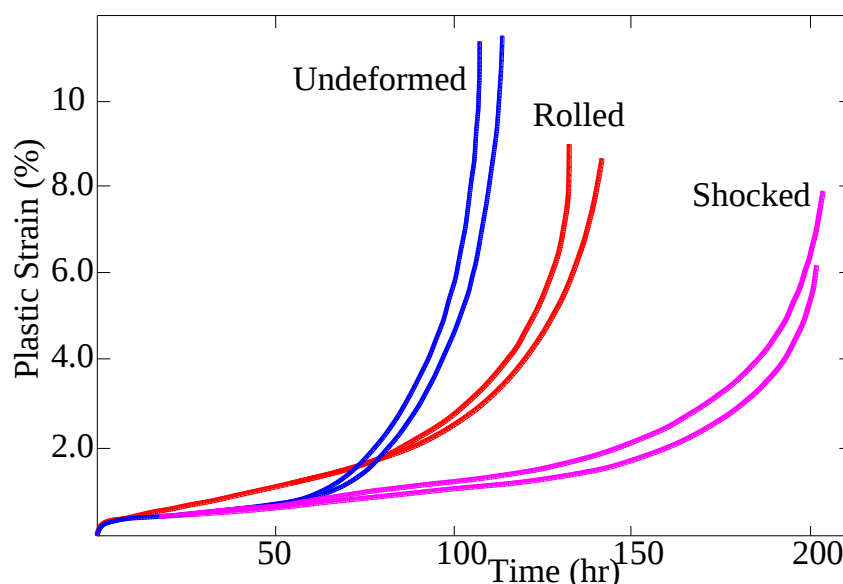
ایجاد فاز ثانوی به واسطه پیرسختی یا دیگر عملیات ناشی از بارگذاری ضربه‌ای، یا فرآیندهای ترمومکانیکی مشابه حاصل از شوک می‌تواند خواص متالورژیکی منحصر به فردی ایجاد کند. نمونه‌ای از آن با خواص خزش در سوپرآلیاژهای پایه نیکل مانند اودمیت ۷۰۰ [۳۰، ۶۱] و اینگنل ۷۱۸ [۶۲، ۶۳] نشان داده شده است (شکل ۱۹). این مزیتها عمدتاً از توسعه نسبت حجمی بالای رسوبهای کاملاً پراکنده (γ') و ریزساختار با نابجاییهای کاملاً پراکنده و پایدار شده حرارتی حاصل می‌شود.

۸. مدلها و مدلسازی شکل دهی انفجاری

با استفاده از مدلسازی و شبیه سازی همه فرآیندها را بهتر می توان درک نمود. مدلسازی و شبیه سازی مربوط به شکل دهی انفجاری را می توان به سه دسته تقسیم کرد: مدلسازی فیزیکی، مدلسازی موج ضربه و مدلسازی دینامیک مولکولی.

۸.۱. مدلسازی فیزیکی

غالباً پیش از ساخت قالبهای با ابعاد اصلی، نمونه هایی در مقیاس کوچک ساخته می شود. برای موفق بودن نمونه های مقیاس کوچک ضریب مقیاس از نمونه کوچک به اندازه واقعی باید دقت قابل قبولی داشته باشد. برای نیل به این مقصود، لازم است قواعد ذیل الذکر درباره ضرایب مقیاس و الزامات شباهت سازی رعایت گردد.



شکل ۱۹ منحنی خزش نیرو-ثابت برای آلیاژ اینکل ۷۱۸ در دمای ۶۴۹ درجه سانتیگراد.

جرم خرج انفجاری اصلی باید n_1^3 برابر جرم خرج مدل باشد. که در آن n_1 نسبت دهانه قالب اصلی به دهانه قالب مدل است. الزامات شباهت سازی عبارتند از:

۱. شباهت هندسی باید کاملاً رعایت شود.

۲. جنس ورق برای نمونه های اصلی و مدل باید یکسان باشد.

۳. نوع خرج و روش تولید آن (ریخته گری یا پرس) به همراه چگالی آن باید در نمونه های اصلی و مدل یکسان باشد.

۴. ماده ناقل انرژی باید در نمونه های اصلی و مدل یکسان باشد.

۵. سفتی گیربندی قالب در محیط ورق باید n_1 برابر سفتی مربوط به مدل باشد.

۶. چنانچه قالب بر روی ضربه گیر نصب شده، سفتی فنرهای قالب اصلی باید n_1 برابر مقدار مربوط به مدل باشد.

۷. نیروی ورقگیر قالب اصلی باید n_1^2 برابر مقدار مربوط به مدل باشد.

۸. جرم قالب اصلی باید n_1^3 برابر جرم قالب نمونه باشد.

۹. جنس قالب و استحکام آن باید برای نمونه‌های اصلی و مدل یکسان باشد.

۱۰. فشار هوا در حفره قالب پیش از شکل‌دهی باید برای نمونه‌های اصلی و مدل یکسان باشد.

۱۱. ضریب اصطکاک میان ورق و سطوح قالب باید تقریباً یکسان باشد.

۱۲. شکل‌پذیری جنس ورق در مدل نباید بیشتر از مقدار نمونه اصلی باشد.

۱۳. اختلاف دماهای مدل و نمونه اصلی تاثیر قابل توجهی بر خواص ورق یا مقدار انرژی آزاد شده از خرج ندارد.

قواعد ضرایب مقیاس و الزامات شباهت سازی فوق با انجام شکل‌دهی انفجاری روی یک مدل با قطر **24 in. (609.6 mm)** و نمونه واقعی گنبد با قطر **120 in. (3048 mm)** مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده موفقیت‌آمیز بوده است. خرج انفجاری واقعی به وزن **12.2 kg** طبق مقیاس به اندازه خرج مدل به وزن **97.5 g** کاهش یافت. مقایسه‌ای از مقادیر کرنشهای پیش بینی شده و مشاهده شده در جدول ۵ آورده شده است.

مشاهده می‌شود که قواعد مقیاس و الزامات شباهت سازی باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوطه به کار رود. اگرچه قواعد مقیاس در پیش بینی وزن خرج کاربردهای بزرگ (اعم از شکل‌دهی آزاد یا با قالب) بسیار سودمند است، ولی تنها از آن می‌توان به عنوان تقریب اولیه برای تعیین مقدار خرج استفاده کرد، چراکه اثرات برخی از پارامترها به ویژه برای شکلهای دشوار، بسیار پیچیده است. جزئیات مربوط به استخراج قواعد مقیاس، الزامات شباهت سازی و ضرایب مقیاس در شکل‌دهی انفجاری را می‌توان در مرجع [۱] یافت.

جدول ۵ مقایسه‌ای از کرنشهای نمونه اصلی با مقادیر پیش بینی شده در نمونه مدل [۱]

کرنش در مدل یک پنجم (%)	کرنش پیش بینی شده در نمونه اصلی (%)	کرنش مشاهده شده در نمونه اصلی (%)
کرنش سطح	7.0 ~ 8.2	4.0 ~ 6.3
کرنش ضخامت	-14.0 ~ -16.5	-8 ~ -12.5

۸،۲. مدلسازی امواج شوک در فلزات

تحلیل ارایه شده توسط هوگونیت و رانکین برای سیالات، عموماً درباره امواج شوک نیز به کار می‌رود. اساساً فرض می‌شود که مدول برشی فلز برابر صفر بوده و پاسخ آن به موج همانند مایعات می‌باشد؛ از اینرو این تحلیل محدود به فشارهای بسیار بالا است.

وضعیت کرنش تک محوری باعث ایجاد تنشهای برشی شده که نمی‌توان از آنها در تحلیلهای دقیقتر صرف نظر نمود. مشکل دیگر مربوط به تحلیل ریاضی امواج شوک است چراکه سرعت، چگالی، دما و فشار در جبهه شوک ناپیوسته است. معادلات دیفرانسیلی که این فرآیندها را توصیف می‌کنند غیرخطی بوده و در گام از محاسبات نیازمند انجام سعی و خطا است. نمان و ریچنیر یک عبارت ویسکوزیته مصنوعی معرفی کرده و به نتایج ریاضی بهتری دست یافتند [۵۸]. عبارت ویسکوزیته مصنوعی به منظور هموار کردن جبهه تیز شوک و ساده کردن معادلات دیفرانسیل و روشهای تفاضل محدود مطرح شد. موج شوک تاحدی از سلول شبکه تفاضل محدود بزرگتر است. سازوکارهای اتلاف در جبهه شوک رخ می‌دهد و می‌توان آن را به صورت ریاضی با یک عبارت ویسکوزیته بیان کرد. از این روش تحلیل در گستره‌ای از مسائل دربرگیرنده انتشار دینامیکی اغتشاشها استفاده شده است. نتایج شبیه سازی برای انفجار ماده منفجره در تماس با یک بلوک مسی نشان می‌دهد که چنانچه از فرض هیدرودینامیک استفاده شود، اثر ایجاد حفره بسیار بزرگتر بوده و غیر واقعی می‌باشد. از اینرو در اینگونه مسایل از سطح تسلیم استفاده می‌شود. ویلکینز [۶۴] برای در نظر گرفتن جریان پلاستیک از معیار فون میسز استفاده کرده است. کدهای متعددی بر مبنای سیستمهای مختصات اولیری و لاگرانژی تهیه شده است. نمونه‌هایی از کدهای تفاضل محدود لاگرانژی عبارتند از **TOODY** [۶۵]، **HEMP** [۶۴] و **WONDY** [۶۶]، در حالیکه در کد **OIL** [۶۷] از روش اولیری استفاده شده است. در جدول ۶ جزئیات مربوط به شرکتهای ارایه کننده کد که مناسب بودن نرم افزارهایشان را برای شکل‌دهی انفجاری ابراز کرده‌اند ارایه شده است. اگرچه اغلب این کدها منحصرأ در توسعه تسلیحات، سرچنگیها و برای درک بهتر انفجارهای هسته‌ای به کار برده شده اند، می‌توان از آنها در طراحی فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری نیز بهره گرفت.

جدول ۶ بسته‌های نرم افزارهای تجاری مناسب برای شبیه سازی شکل‌دهی انفجاری

شرکت	محصول
Century Dynamics	AUTODYN-2D, AUTODYN-3D
MSC-Software	MSC-Dytran

۸,۳ رفتار متالورژیکی ماده تحت شوک

رفتار متالورژیکی فلزات تحت شوک موضوع پیچیده‌ای بوده و اگرچه تاحدودی سازوکار آن توصیف شده ولیکن مشاهده تجربی آن به دلیل مقیاسهای زمانی کوچک، امکان پذیر نیست. به نظر می‌رسد که برای مدلسازی این رفتار علاقه زیادی وجود دارد. البته تا این اواخر هم توان محاسباتی لازم برای مدلسازی دقیق دینامیک مولکولی با پتانسیلهای بین اتمی واقعی وجود نداشت. در ۱۹۹۷ نتایج شبیه سازیهای پاسخ عیوب منفرد به شوک ارایه شد [۶۸]. در ۲۰۰۱ از شبیه سازیهای دینامیک مولکولی چند میلیون اتمی امواج شوک در آهن مارتنزیتی (bcc) برای نشان دادن استحکام شوک فراتر از آستانه تغییر شکل پلاستیک ریزدانه‌های آستنیتی (fcc, hcp) که در زمینه مارتنزیتی جوانه می‌زنند استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که رشد و راستای دو ریزدانه آستنیتی کاملاً وابسته به جهت کریستالوگرافی شوک و قدرت شوک است [۶۹]. حجم قابل توجهی از تحلیل دینامیک مولکولی که شامل کار با دینامیک مولکولی غیرتعادلی در یک تک کریستال نیکل (fcc) است گزارش شده است [۷۰].

- [1] Mynors, D. J.; Zhang, B., "Applications and Capabilities of Explosive Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126, pp. 1–25, 2002.
- [2] Daehn, G.S., "High velocity metal forming—a historical background", http://er6s1.eng.ohio-state.edu/_daehn/pictures/introduction.htm, Accessed on 2008/05/18.
- [3] Thomas J.D., Seth M., Daehn G.S., Bradley J.R., Triantafyllidis N., "Forming limits for electromagnetically expanded aluminum alloy tubes: Theory and experiment", *Acta Materialia*, vol. 55, pp. 2863-2873, 2007.
- [4] Seth, M.; Vincent, J. V.; Daehn, G. S., "Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact", *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 168, p.p. 390 - 400, 2005.
- [5] Daehn G. S., "**High velocity sheet metal forming: state of the art and prognosis for advanced commercialization**", NSF Engineering Center for Net Shape Manufacturing at The Ohio State Univ., Report No. ERC/NSM-S-94-15, Columbus, OH, 2007.
- [6] Beerwald, C., Brosius, A., Homberg, W., Kleiner, M., Klocke, M., Kulig, S., "Extended Finite Element Modeling of Electromagnetic Forming", *Proc. of the 10th Int. Conf. on Sheet Metal*, pp. 559-566, 2003.
- [7] Henselek, A., Beerwald, M., Beerwald, C., "Design and Adaptation of EMF Equipment", *1st Int. Conf. on High Speed Forming*, Dortmund, 2004.
- [۸] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی سازوکارهای فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس و پارامترهای آنها»، *مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران*، اصفهان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲۹-۳۰ بهمن ۱۳۸۷، ص ۱۰۷.
- [9] Rinehart, J.S., Pearson, J., "**Explosive Working of Metals**", Pergamon Press, Oxford, 1963.
- [10] Ezra, A.A., "**Principles and Practice of Explosive Metalworking**", Garden City Press Limited, 1973.
- [۱۱] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی کاربردی شکل‌دهی پرسرعت و عوامل موثر بر شکل‌پذیری ورق در سرعت‌های بالا»، *مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید*، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۶-۷ آبان ۱۳۸۸، ص ۷۶.
- [۱۲] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «مروری بر فناوری شکل‌دهی انفجاری ورق‌های فلزی و کاربردهای آن»، *مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید*، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۶-۷ آبان ۱۳۸۸، ص ۷۵.
- [13] Defense Advanced Research Projects Agency Technology Transition Report, pp. 27-29, <http://www.darpa.mil/body/pdf/transition.pdf>, Accessed on 2010/08/09.
- [14] Blazynski, T. Z., "**Explosive Welding, Forming and Compaction**", Applied Science Publishers Ltd., New York, 1983.
- [15] Cooper, P. W., "**Explosive Engineering**", Wiley-VCH Inc., New York, pp. 27-29, 2002.
- [16] Meyer, R., "**Explosives**", Weinheim; VCH Inc., New York, pp. 186-188, 2010.
- [17] Zukas, J.A., Walters, W.P., "**Explosive Effects and Applications**", Springer-Verlag, New York, pp. 42-43, 2001.

- [18] Bulson P.S., “**Explosive Loading of Engineering Structures**”, Chapman & Hall, London, pp. 162-163, 2003.
- [19] Zhang R., Iyama H., Fujita M., Zhang T.S., “Optimum structure design method for non-die explosive forming of spherical vessel technology”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 85, pp. 217–219, 1999.
- [20] Hung C.F., Hsu P.Y., Hwang-Fuu J.J., “Elastic shock response of an air-backed plate to underwater explosion”, *Int. J. Impact Eng.* Vol. 31, no. 2, pp. 151-168, 2005.
- [21] Rajendran R., Narasimhan K., “Linear elastic shock response of plane plates subjected to underwater explosion”, *Int. J. Impact Eng.* Vol. 25, pp. 493–506, 2001.
- [22] Carton, E. P.; Stuivinga, M.; Verbeek, H. J., “Explosive Forming of Aerospace Components”, *Shock Compression of Condensed Matters*, American Institute of Physics, pp. 1249–1252, 2006.
- [23] Teotia A.P.S., “Cost of explosive forming facilities”, in: **Proceedings of the Fourth International Conference of the Centre for High Energy Forming**, Colorado, USA, July 1973.
- [24] Swift K.G., Booker J.D., “**Process Selection from Design to Manufacture**”, Arnold, Paris, 1997.
- [25] Iyama, H.; Hinata, T.; Otsuka, M.; Itoh, S., “Numerical Simulation of Explosive Forming”, *Computational Methods*, pp. 1897–1901, Netherlands, 2006.
- [26] Harris D.R., White M.P., *J. Appl. Mech.* Vol. 21, No. 2, pp. 194–195, 1954.
- [27] Weertman J., in: Shewmon P.G., Zackay V.F. (Eds.), “**Response of Metals to High Velocity Deformation**”, Vol. 196, Interscience, New York, pp. 205–247, 1961.
- [28] Williams T., *Sheet Met. Ind.* Vol. 39, pp. 487–494, 1962.
- [29] Dieter G.E., in: Shewmon P.G., Zackay V.F. (Eds.), “**In Response of Metals to High Velocity Deformation**”, Interscience, New York, p. 419, 1961.
- [30] Williams T., Finnic T.M., “The Explosive Formabilities of Some Typical Sheet Aluminium Alloys”, **RARDE Memorandum 16165**, AD 464 436, May 1965.
- [31] Mukai, T.; Masataka, K.; Kenji, H., “Strain-Rate Dependence of Mechanical Properties in AA 5056 Al-Mg Alloy Processed by Equal-Channel-Angular-Extrusion”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 247, p.p. 270-274, 1998.

[۳۲] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «اثرات شکل‌دهی انفجاری بر خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق‌های

فلزی»، مجموعه مقالات نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، ۱۵-

۱۳ اسفند ۱۳۸۷، ص ۴.

- [33] Seth, M.; Vincent, J. V.; Daehn, G. S., “Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact”, *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 168, p.p. 390 - 400, 2005.
- [34] Agricola K.R., et al., “**Advanced Explosive Forming Processes (HERF)**”, AFML-TR-67-70, 1967.
- [35] Mikesell R., in: Ezra A.A. (Ed.), **Proceedings of the Second International Conference of the Centre for High Energy Forming**, University of Denver, pp. 1.3.1–1.3.17, 1969.
- [36] Eftestol B., et al., “High Energy Rate Working of Metals”, **Proc. NATO Advanced Study**, pp. 296–311, 1998.
- [37] Baudry R.A., Cooper G.D., *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. 87, pp. 245–263, 1965.
- [38] Hollingum S.W., “High energy rate working of metals”, **Proc. NATO**

- Advanced Study**, pp. 278–287, 1998.
- [39] Dieter, G., “**Mechanical Metallurgy**”, McGraw-Hill, New York, pp. 350-353, 2002.
- [40] van Torne L.I., Otte H.M., *ASM Met. Eng. Quart.*, vol. 6, pp. 34–37, 1966.
- [۴۱] کوثری‌نیا، احسان، «مروری بر فناوری و کاربردهای پرتابه‌های شکل داده شده انفجاری»، **مجموعه مقالات پنجمین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشراانه**، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شیمیایی، بهمن ۱۳۸۶، ص ۲۴۳–۲۵۳.
- [42] Belak J., “Atomistic response of metals with defects to shock loading”, in: **Proceedings of the 12th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter**, Atlanta, GA, June 24–29, 2001.
- [43] Kadau K., Germann T.C., Lomdahl P.S., Holian B.L., “Shock-induced structural phase transformations studies by molecular-dynamics simulations”, in: **Proceedings of the 12th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter**, Atlanta, GA, June 24–29, 2001.
- [۴۴] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «مروری بر روند طراحی و ملزومات فرآیند تولید ورق‌های فلزی به روش شکل‌دهی انفجاری»، **مجموعه مقالات همایش ملی مهندسی مکانیک**، اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۳۰–۲۹ آبان ۱۳۸۷، ص ۹۸.
- [45] Ezra, A. A.; Penning, F. A., “Development of Scaling Laws for Explosive Forming”, **Experimental Mechanics**, pp. 234-239, August 1962.
- [46] Hudson, G. E., “Theory of the Dynamic Plastic Deformation of a Thin Diaphragm”, **Journal of Applied Physics**, p. 221, 1951.
- [47] Otto, H. E.; Dowling, A. R.; Sullivan, R. W., “A Comparison of the Effects of Explosive Forming and Static Deformation on the Mechanical Properties of Pressure Vessel Steels”, **Metallurgical Transactions**, Vol. 4, pp. 657-664, March 1973.
- [48] Khadzhiev, R. R.; Epshtein, G. N., “Annealing of Iron Deformed by Rolling and Explosive Forming”, Translated from ***Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*** (Russia), No. 8, pp. 16-21, 1978.
- [49] Krishtal, M. A.; Lyuchkov, A. D.; Verkhovskii, S. N.; Vakhrusheva, V. S.; Yushkevich, P. M., “Hardening of Quenched Low-Carbon Steel During Explosive Forming”, Translated from ***Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*** (Russia), No. 6, pp. 57-60, June, 1978.
- [50] Iyama H., Hinata T., Otsuka M., and Itoh S., “Numerical simulation of explosive forming”, G. R. Liu et al. (eds.), **Computational Methods**, pp. 1897-1901, 2006.
- [51] Martin, W. C., “Similitude in Exploding Wires”, **Experimental Mechanics**, pp. 49-55, February 1975.
- [52] Bazaikin, V. I.; Peretyat'ko, V. N.; “Stress-Strain State of a Circular Diaphragm in Dynamics”, Translated from ***Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tekhnicheskoi Fiziki***, No. 4, pp. 157-163, July-August, 1975.
- [53] Il'ina, V. P.; Egovtsev, E. V., “Tendency to Brittle Failure in Annealed 28Kh3SNMVFA-Sh Sheet Steel”, Translated from ***Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov***, No. 8, pp. 37-39, August, 1992.
- [54] Zhou, M.; Zhang, Y. K.; Cai, L., “Ultrahigh-strain-rate plastic deformation of a stainless-steel sheet with TiN coatings driven by laser shock waves”, **Applied**

Physics A, Materials Science & Processing, 77, pp. 549–554, 2003.

- [55] Kosing, O. E.; Skews, W., “An Investigation of High-Speed Forming of Circular Plates in a Liquid Shock Tube”, **Int. J. Impact Engineering** Vol. 21, No. 9, pp. 801–816, 1998.
- [56] Kleiner, M.; Beerwald, C.; Homberg, W., “Analysis of Process Parameters and Forming Mechanisms within the Electromagnetic Forming Process”, **1st Int. Conf. on High Speed Forming**, Dortmund, 2005.
- [57] Javabvar, D., “Theoretical and Experimental Study of Cone Explosive Forming and Control of Wrinkling Due to Instability”, PhD Thesis, Tarbiat Modarres University, 2001.
- [58] Ghaderi, S. H.; Naeini, H. M.; Liaghat, G. H., “Numerical analysis of plastic deformation of a circular sheet metal subjected to transverse impact loading”, **International Journal of Impact Engineering**, 34, pp. 668–680, 2007.
- [59] Raghukandan K., Rathinasabapathi M., Vajdyanathan P.V., and Balasubramanian, “An Experimental Investigation on the Effect of h/D Ratio on Dynamic Form-Cladding of Domes”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 63, pp. 55-59, 1997.
- [60] Zaera R., Arias A., and Navarro C., “Analytical modeling of metallic circular plates subjected to impulsive loads”, **International Journal of Solids and Structures**, vol. 39, pp. 659-672, 2002.
- [61] Gupta N.K., Nagesh, “Deformation and tearing of circular plates with varying support conditions under uniform impulsive loads”, **International Journal of Impact Engineering**, vol. 34, pp. 42–59, 2007.
- [62] Nariman-Zadeh N., Darvizeh A., Jamali A., Moeini A., “Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modeling and prediction of explosive forming process”, **Journal of Materials Processing Technology**, No. 164–165, pp. 1561–1571, 2005.
- [63] Akbari Mousavi S.A.A., Riahi M., Hagh Parast A., “Experimental and numerical analyses of explosive free forming”, **Journal of Materials Processing Technology**, No. 187–188, pp. 512–516, 2007.
- [64] Wijayathunga V.N., Webb D.C., “Experimental evaluation and finite element simulation of explosive forming of a square cup from a brass plate assisted by a lead plug”, **Journal of Materials Processing Technology** No. 172, pp. 139–145, 2006.
- [65] Fengman H., Zheng T., Ning W., Zhiyong H., “Explosive forming of thin-wall semi-spherical parts”, **Materials Letters**, vol. 45, pp. 133–137, 2000.
- [66] Wang A. J., “The Permanent Deflection of a Plastic Plate Under Blast Loading”, **J. Appl. Mech.**, Vol. 22, Trans. ASME, Vol. 77, pp. 375-376, 1955.
- [67] Cristescu, N., “**Dynamic Plasticity**”, North Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 4, Amsterdam, 1976.
- [68] Jones N., “Impulsive Loading of a Simply Supported Circular Rigid Plastic Plate”, **Trans. ASME, J. Appl. Mech.**, Vol. 3, pp. 59-65, 1968.
- [69] Osaka H., Fujita M., Hansaka K., Fujinaka Y., “A Numerical Analysis of Plates Under Transverse Impact Loading”, **J. JSTP**, Vol. 27, No. 301, pp. 288-294, 1986.
- [70] Rajendran, R.; Narasimhan, K.; “Deformation and fracture behavior of plate specimens subjected to underwater explosion—a review”, **International Journal of Impact Engineering**, 32, pp. 1945–1963, 2006.
- [71] Tardif, H. P., “Explosive Forming of Cones by Metal Gathering”, **Metal**

- Progress**, Volume 76, No. 3, September 1959, pp. 84-89.
- [72] Chu E., and Xu Y., “An elastoplastic analysis of flange wrinkling in deep drawing processes”, **Int. J. Mech. Sci.**, Vol. 43 pp. 1421–1440, 2001.
 - [73] Geckler, J.W., “Plastische knicken der wandung von hohlzylindern und einige andern faltungserscheinungen”, **ZAMM** 8, pp. 341–352, 1928.
 - [74] Hill R., “A General Theory of Uniqueness and Stability in Elastic/Plastic Solids”, **Journal Mech. Phys. Solids**, vol. 6, pp.236-249, 1958.
 - [75] Hutchinson J.W., “Plastic Buckling”, **Advances in Applied Mechanics**, vol. 14, pp. 67-144, 1974.
 - [76] Hutchinson J.W., and Neale K.W., “Wrinkling of Curved Thin Sheet Metal”, Plastic Instability, Paris: **Presses Ponts et Chaussées**, pp. 71-78, 1985.
 - [77] Triantafyllidis N., “Puckering instability phenomena in the hemispherical cup test”, **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, vol. 33, no. 2, pp. 117, 1985.
 - [78] Tomita Y. “Simulations of plastic instabilities in solid mechanics”, **Applied Mechanics Review**, part I, vol. 47, no. 6, pp. 171-205, 1994.
 - [79] Senior B.W., “Flange Wrinkling in Deep-Drawing Operations”, **Journal Mech. Phys. Solids**, vol. 48, pp. 235-246, 1956.
 - [80] Yu T.X., and Johnson W., “The Buckling of Annular Plates in Relation to the Deep-Drawing Process”, **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 24, pp. 175-188, 1982.
 - [81] Triantafyllidis N., and Needleman A., “An Analysis of Wrinkling in the Swift Cup Test”, **Journal of Engineering Materials and Technology**, vol. 102, pp. 241-248, 1980.
 - [82] Cao J., and Boyce M., “Wrinkling Behavior of Rectangular Plates Under Lateral Constraint”, **International Journal of Solids & Structure**, Vol. 34, No. 2, pp. 153-176, 1997.
 - [83] Baldwin W.M., Howald T.S., “Folding in the cupping operation”, **Transactions of American Society for Metals**, Vol. 38, pp. 75-88, 1947.
 - [84] Kaftanoglu B., “Plastic analysis of flange wrinkling in axisymmetrical deep drawing”, **Proceedings of 21st International Machine Tool Design and Research Conference**, Swansea, vol. 1, p. 21, 1980.
 - [85] Kawai N., “Critical conditions of wrinkling in deep drawing of sheet metals”, **Bulletin of JSME**, vol. 4, pp. 169-192, 1961.
 - [86] Timoshenko S.P., Gere J.M., “**Theory of elastic stability**”, New York, McGraw-Hill, 1981.
 - [87] Zhang L.C., Yu T.X., “The plastic wrinkling of an annular plate under uniform tension on its inner edge”, **International Journal of Solids Structures**, Vol. 24, No. 5, pp. 497-503, 1988.
 - [88] Yossifon S, Tirosh J. “The maximum drawing ratio in hydroforming processes”, **Journal of Engineering for Industry**, vol. 112, pp. 47-56, 1990.
 - [89] Havranek J., “Wrinkling limit of tapered pressing”, **J. Aust. Inst. Met.**, Vol. 20, No. 2, pp. 114–119, 1975.
 - [90] Szacinski A.M., Thomson P.F., “Investigation of the existence of a wrinkling-limit curve in plastically-deforming metal sheet”, **J. Mater. Process. Technol.**, Vol. 25, pp. 125–137, 1991.
 - [91] Hardt D.E., Lee C.G.Y., “Closed-loop control of sheet metal stability during stamping”, **Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference**, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, pp. 315–322, 1986.

- [92] Doege E., Sommer N., "Optimierung der niederhalterkraft beim tiefziehen rechteckiger teile", **Stahl Eisen**, vol. 103, no. 3, pp. 139–142, 1983.
- [93] Mansfield E.H., "On the buckling of an annular plate", **Quart. J. Appl. Math.**, vol. 13, pp. 16–23, 1960.
- [94] N. Friedl, F.G. Rammerstorfer and F.D. Fischer, "Buckling of stretched strips", **Comput. Struct.** Vol. 78, pp. 185–190, 2000.
- [95] Cerda E., and Mahadevan L., "Geometry and physics of wrinkling", **Phys. Rev. Lett.**, Vol. 90, pp. 1–4, 2003.
- [96] Cerda E., "Mechanics of scars", **Journal of Biomechanics**, Vol. 15, pp. 117–126, 2005.
- [97] G'eminard J.C., Bernal R., and Melo F., "Wrinkle formations in axis-symmetrically stretched membranes", **Eur. Phys. J. E.**, Vol. 15, pp. 117–126, 2004.
- [98] Coman, D. C., and Haughton, D. M., "On some approximate methods for the tensile instabilities of thin annular plates", **Journal of Engineering Mathematics**, Vol. 56, pp. 79–99, 2006.
- [99] Gilabert A., Sibillot P., Sornette D., Vanneste C., Maugis D., and Muttin F., "Buckling instability and patterns around holes or cracks in thin plates under a tensile load", **Eur. J. Mech., A/Solids**, Vol. 11, pp. 65–89, 1992.
- [100] Abedrabbo N., Zampaloni M.A., Pourboghra F., "Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming", **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 47, pp. 333–358, 2005.
- [101] Gharib H., Wifi A.S., Younan M., Nassef A., "Optimization of the blank holder force in cup drawing", **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Vol. 18, Issue 1-2, pp. 291-296, 2006.
- [102] Yagami T., Manabe K., Yamauchi Y., "Effect of alternating blank holder motion of drawing and wrinkle elimination on deep-drawability", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 187, pp. 187–191, 2007.
- [103] Zhang W., Shivpuri R., "Probabilistic design of aluminum sheet drawing for reduced risk of wrinkling and fracture", **Reliability Engineering and System Safety**, Vol. 18, pp. 28-37, 2008.

[۱۰۴] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «برآورد نسبت حد کشش ورقهای فلزی در فرآیند شکل‌دهی عمیق»، **مجموعه مقالات دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران**، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۰-۱۲ اسفند ۱۳۸۸، ص ۱۲۴.

[105] Slaughter W.S., "The Linearized Theory of Elasticity", Birkhauser, Boston, pp. 260-267, 2002.

[106] Alfutov N.A., "Stability of Elastic Structures", Springer-Verlag, Berlin, pp. 173-176, 2000.

[۱۰۷] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «تحلیل ناپایداری کششی الاستیک ورقهای گرد نازک»، **مجموعه مقالات کنفرانس دانشجویی مهندسی مکانیک**، مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، آبان ۱۳۸۸، ص ۳۶.

[108] Cao J., Wang X., "An analytical model for plate wrinkling under tri-axial loading and its application", **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 42, pp. 617-633, 2000.

[۱۰۹] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی چین خوردگی پلاستیک در شکل‌دهی ورقهای فلزی با استفاده از معیار C-B»، **مجموعه مقالات همایش ملی مهندسی مکانیک**، اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۲۹-۳۰ آبان ۱۳۸۷، ص ۶۴.

- [110] Zhang L.C., Yu T.X., Wang R., “Investigation of sheet metal forming by bending – part II, Plastic wrinkling of circular sheets pressed by cylindrical punches”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 321, pp. 301-308, 1989.
- [111] Zhang L.C., Yu T.X., “Modified adaptive dynamic relaxation method and its application to elastic-plastic bending and wrinkling of circular plates”, *Computers and Structures*, Vol. 33, pp. 609-614, 1989.
- [112] Kadkhodayan M., Zhang L.C., Sowerby R., “Analyses of wrinkling and buckling of elastic plates by DXDR method”, *Computers and Structures*, Vol. 65, pp. 561-574, 1997.
- [113] Yoon H., Alexandrov S., Chung K., Dick R. E., and Kang, T. J., “Prediction of critical blank holding force criterion to prevent wrinkles in axi-symmetric cup drawing”, *Materials Science Forum*, Vols. 505-507, pp. 1273-1278, 2006.
- [114] Jawad M. H., “**Design of plates and shell structures**”, The American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York, NY 10016, pp. 174-175, 2004.
- [115] Doig A., “**Military Metallurgy**”, British Crown, Oakdale Printing Company, London, pp. 67-71, 2003.
- [116] Datta J., “**Key to Aluminum Alloys**”, Aluminum Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, pp. 114, 2011.
- [117] ASTM E 8M, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”, Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.01 Metals - Mechanical Testing, Elevated and Low-Temperature Tests, Metallography, USA, 2011.
- [118] Stromsoe E., Eriksen S.W., “Performance of high explosives in underwater applications. Part 1: CHNO explosives”, *Propell. Explos. Pyrot.*, Vol. 15, pp. 48–51, 1990.
- [119] Keil A.H., “The response of ships to underwater explosions”, *Trans. Soc. Naval Archit. Mar. Eng.*, Vol. 69, pp. 366-410, 1961.
- [120] Chengqing W., and Hao H., “Modeling of Simultaneous Ground Shock and Air blast Pressure on Nearby Structures From Surface Explosions”, *Int. Journal of Impact engineering*, Vol. 31, pp. 699-717, 2005.
- [121] Keicher T., Happ A., Kretschmer A., Sirringhaus U., Wild R., “Influence of Aluminium/Ammonium Perchlorate on the Performance of Underwater Explosives”, *Propell. Explos. Pyrot.*, Vol. 24, pp. 140-143, 1999.
- [122] Kirkwood J. G., and Bethe H. A., “**Basic Propagation theory**”, OSRD, pp. 588-595, 1942.
- [123] Geers, T. L. and Hunter, L. S., “An Integrated Wave-Effects Model for an Underwater Explosion Bubble”. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 4, pp.1584-1601, 2002.
- [124] Brett, J. M.; Buckland, M.; Turner, T.; Killoh, C. G.; and Kiernan, P.; “**An Experimental Facility for Imaging of Medium Scale Underwater Explosions**”, DSTO-TR-1432, DSTO Platforms Sciences Laboratory, Australia, 2003.
- [125] Tsarev, A. S.; “**Underwater Movement of Obstacles Due to Explosive Detonation**”, University of Maryland, College Park, MSc Thesis, 2007.
- [126] Cole R. H.; “**Underwater explosions**”, Princeton University Press, NJ, USA, 1948.
- [127] Krueger, S. R., “**Simulation of Cylinder Implosion Initiated by an Underwater Explosion**”, Naval Postgraduate School Thesis, Monterey,

California, 2006.

[128] Swisdak, M. M.; "Explosion Effects and Properties: Part II – Explosion Effects in Water" NSWC/WOL/TR 76- 116, Naval Surface Weapons Center, Dahlgren, VA, February 1978.

[۱۲۹] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی تجربی پارامترهای موج بلاست در انفجار زیر آب خرج هگزوژن»، **مجموعه مقالات سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران**، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اسفند ۱۳۸۸، ص ۶۹.

[۱۳۰] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «تحلیل موج بلاست در محیط آب با استفاده از آنالیز ابعادی و آزمونهای تجربی»، **مجموعه مقالات نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران**، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۹-۲۱ بهمن ۱۳۸۸، ص ۳۱۹-۳۲۲.

[۱۳۱] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «تحلیل عددی کمانش الاستیک ورقهای گرد با استفاده از روش انرژی»، **مجموعه مقالات نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران**، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۹-۲۱ بهمن ۱۳۸۸، ص ۱۵۵.

[۱۳۲] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی تحلیلی تاثیر ناهمسانگردی نرمال ورق فلزی بر عیوب شکل‌دهی»، **مجموعه مقالات دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران**، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۰-۱۲ اسفند ۱۳۸۸، ص ۱۲۵.

[۱۳۳] لیاقت، غلامحسین، و جواب‌ور، داریوش، «شکل‌دهی مخروطها به روش انفجاری»، **ششمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک**، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۷۸، ص ۱۵۰۷.

[۱۳۴] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی تحلیلی حد شکل‌دهی ورقهای فلزی و پارامترهای آن»، **مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید**، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۶-۷ آبان ۱۳۸۸، ص ۷۳.

[135] Hill R., "A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals", Proc. R. Soc. London, Ser. A 193, p. 281, 1948.

[۱۳۶] لیاقت، غلامحسین، و جواب‌ور، داریوش، «تحلیل تغییر شکل ناپایدار ورق فلزی مدور در قالب مخروطی در هنگام شکل‌دهی انفجاری»، **هفتمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک**، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، ۱۳۷۸.

[۱۳۷] کوثری‌نیا، احسان، و علیزاده، یونس، «بررسی تحلیلی کمانش الاستیک ورق تحت اثر نیروی مهار جانبی»، **مجموعه مقالات دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران**، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۰-۱۲ اسفند ۱۳۸۹، ص ۲۰۹.

[۱۳۸] لیاقت، غلامحسین، و جواب‌ور، داریوش، «مبانی شکل‌دهی انفجاری»، انتشارات سازمان صنایع هوافضا، تهران، ۱۳۸۳.

[139] Kowsarinia E., Alizadeh Y., "Experimental Evaluation of Blast Wave Parameters in Underwater Explosion of Hexogen Charges", *International Journal of Engineering*, Vol.25, No.1, pp. 65-72, 2011.

Acoustic Impedance	امپدانس آکوستیک
Age Hardening	پیرسختی
Anisotropy	ناهمسانگردی
Austenite	آستنیت
Bead	آویزه
Bifurcation	انشقاق، دو شاخه شدن
Binder	ورقگیر
Blank Holding Force (BHF)	نیروی ورقگیر
Blast	موج ضربه انفجار، بلاست
Body centered cubic (bcc)	مکعبی مرکز پر
Bridge-wire	سیم پُل
Bubble Pulsation	ضربان حباب
Cavitation	کاویتاسیون (خلاء)
Cladding	پوشش دهی
Cyclonite	سیکلونیت
Deflagration	سوزش
Detonation	ترکیدن، دتوناسیون، انفجار
Dislocation	نابجایی
Dynamic Relaxation	رهايش ديناميك
Electro-hydraulic Forming (EHF)	شکل دهی الکترو هیدرولیک
Electromagnetic Forming (EMF)	شکل دهی الکترومغناطیس
Explosive Charge	خرج انفجاری
Explosive Forming	شکل دهی انفجاری
Ferrite	فریت
Formability	شکل پذیری
Forming Limit Diagram (FLD)	نمودار حد شکل دهی
Hexogen	هگزوزن
Hexagonal closed packed (hcp)	شش وجهی فشرده
High Explosive	ماده شدیدالانفجار
High Velocity Forming (HVF)	شکل دهی پرسرعت
Impulse	ایمپالس، تکانه

Incremental	جزیی، افزایشی
Inductance	اندوکتانس، ظرفیت القایی
Initiator	آغازگر، چاشنی
Isotropy	همسانگردی
Lattice	شبکه ریزساختار
Martensite	مارتنزیت
Microstructure	ریزساختار
Moire's Fringes	نوارهای مویر
Overpressure	فرا فشار، بیشینه فشار موج شوک
Phase Transformation	استحاله فاز
Propellant	پیشران
Proportional Loading	بارگذاری تناسبی
Reduced Modulus	مدول کاسته شده
Regression	برازش
Resonance Current	مدار تشدید (رزونانس)
Saturn	ساترن
Shock Tube	لوله شوک
Shock Wave	موج شوک
Similitude	شباهت سازی
Singular	تکین
Specific Resistivity	مقاومت ویژه
Spring back	برگشت فنری
Stand off Distance	فاصله توقف
TNT	تری نیترو تولوئن (تی ان تی)
Toughness	چقرمگی
Twinning	دوقلوایی شدن
Wrinkling	چین خوردگی، چروکیدگی
Wrinkling Limit Diagram (WLD)	نمودار حد چین خوردگی

واژه نامه فارسی به انگلیسی

Austenite	آستنیت
Initiator	آغازگر، چاشنی
Bead	آویزه
Phase Transformation	استحاله فاز
Acoustic Impedance	امپدانس آکوستیک
Inductance	اندوکتانس، ظرفیت القایی
Bifurcation	انشقاق، دو شاخه شدن
Impulse	ایمپالس، تکانه
Proportional Loading	بارگذاری تناسبی
Regression	برازش
Spring back	برگشت فنری
Cladding	پوشش دهی
Age Hardening	پیرسختی
Propellant	پیشران
Detonation	ترکیدن، دتوناسیون، انفجار
TNT	تری نیترو تولوئن (تی‌ان‌تی)
Singular	تکین
Incremental	جزیی، افزایشی
Toughness	چقرمگی
Wrinkling	چین خوردگی، چروکیدگی
Explosive Charge	خرج انفجاری
Twinning	دوقلویی شدن
Dynamic Relaxation	رهایش دینامیک
Microstructure	ریزساختار
Saturn	ساترن
Deflagration	سوزش
Cyclonite	سیکلونیت
Bridge-wire	سیم‌پُل
Similitude	شبهت سازی

Lattice	شبکه ریزساختار
Hexagonal closed packed (hcp)	شش وجهی فشرده
Formability	شکل پذیری
Electro-hydraulic Forming (EHF)	شکل دهی الکترو هیدرولیک
Electromagnetic Forming (EMF)	شکل دهی الکترومغناطیس
Explosive Forming	شکل دهی انفجاری
High Velocity Forming (HVF)	شکل دهی پرسرعت
Bubble Pulsation	ضربان حباب
Stand off Distance	فاصله توقف
Overpressure	فرا فشار، بیشینه فشار موج شوک
Ferrite	فریت
Cavitation	کاویتاسیون (خلاء)
Shock Tube	لوله شوک
High Explosive	ماده شدیدالانفجار
Martensite	مارتنزیت
Resonance Current	مدار تشدید (رزونانس)
Reduced Modulus	مدول کاسته شده
Specific Resistivity	مقاومت ویژه
Body centered cubic (bcc)	مکعبی مرکز پر
Shock Wave	موج شوک
Blast	موج ضربه انفجار، بلاست
Dislocation	ناجایی
Anisotropy	ناهمسانگردی
Wrinkling Limit Diagram (WLD)	نمودار حد چین خوردگی
Forming Limit Diagram (FLD)	نمودار حد شکل دهی
Moire's Fringes	نوارهای مویر
Blank Holding Force (BHF)	نیروی ورق گیر
Hexogen	هگزژن
Isotropy	همسانگردی
Binder	ورق گیر

