

شبیه‌سازی انبساط و گسیختگی پوسته‌ی استوانه‌ی تحت انفجار داخلی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

محمدوهاب موسوی (کارشناس ارشد)

جمال زمانی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۵ (۳۹-۲۹)
دوره‌ی ۳-۲، شماره‌ی ۱، ص. ۳۹-۲۹

در این پژوهش انبساط، گسیختگی و رفتار پس از گسیختگی پوسته‌ی استوانه‌ی ساخته شده از مس بدون اکسیژن با هدایت بالا (OFHC) تحت انفجار خرج میانی C۴ با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شبیه‌سازی شده است. مزیت عمده‌ی استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های معمول نظیر حذف المان، شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر فرایند تشکیل ترکش به دلیل ارضاء کامل قانون بقای جرم در دامنه‌ی مسئله است. با استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش الگوی توزیع فضایی ترکش‌ها، تعداد تقریبی، اندازه و نیز سرعت آن‌ها قابل دست‌یابی است. همچنین خروج محصولات حاصل از انفجار از میان ترکش‌ها شبیه‌سازی شده است. مقایسه‌ی پروفیل تغییر شکل انبساطی به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش نشان می‌دهد که تفاوت بین نتایج به‌طور متوسط کم‌تر از ۸ درصد است. همچنین شعاع شکست پوسته و سرعت ترکش‌ها با روابط نظری مقایسه شده و توافق خوبی میان آن‌ها مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: پوسته‌ی استوانه‌ی، انفجار داخلی، تشکیل ترکش، روش

هیدرودینامیک ذرات هموار.

mvmousavi@mail.kntu.ac.ir
zamani@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

بررسی رفتار الاستیک - ویسکوپلاستیک و گسیختگی پوسته‌های استوانه‌ی تحت انفجار خرج میانی در زمینه‌های نظامی و تحقیقاتی کاربرد دارد. از میان این کاربردها می‌توان به طراحی سرجنگی موشک‌ها و سلاح‌های پرتابی، مخازن حاوی مواد منفجره و طراحی سازه‌های محافظ در برابر نفوذ ترکش‌ها اشاره کرد. همچنین این پوسته‌ها در شیوه‌هایی نظیر رینگ منبسط‌شونده^[۱] برای بررسی رفتار مواد در نرخ کرنش‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.^[۲]

پس از شروع انفجار در یک پوسته‌ی پراز ماده‌ی منفجره، موج فشاری ایجاد شده به دیواره پوسته منتقل می‌شود. مقدار این موج به فشار C_J ماده منفجره نزدیک است و چندین برابر از مقاومت نهایی ماده بزرگ‌تر است. این فرایند با انبساط شعاعی پوسته آغاز می‌شود و سپس با ایجاد ترک‌هایی در سطوح داخلی و خارجی پوسته، محصولات گازی حاصل از انفجار در میان ترک‌ها جریان می‌یابد. در این زمان پوسته منبسط می‌شود و قطر آن ۵۰ تا ۶۰ درصد قطر اولیه افزایش می‌یابد.^[۳] گازهای حاصل از انفجار از میان ترکش‌ها متصاعد می‌شود و سپس فرایند تکه‌تکه‌شدن^۲ و تشکیل ترکش رخ می‌دهد. جرم ترکش‌ها توسط اندازه دانه‌ها، تردی ماده، چقرمگی،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۳/۵/۱۳، پذیرش ۱۳۹۳/۹/۱۵.

ضخامت پوسته، حجم پوسته و نوع ماده‌ی منفجره‌ی داخل آن کنترل می‌شود.^[۳] در صورت بروز هرگونه آسیب میکروسکوپی در نزدیکی سطوح آزاد، شاهد تمایل بیشتر ریزترک‌ها^۲، باندهای برشی^۴ و فضاهای خالی^۵ به پیوستن به سطوح آزاد پیش از پیوستن به یکدیگر خواهیم بود.^[۴] این موضوع موجب تسهیل در فرایند تشکیل ترکش می‌شود.

در زمینه‌ی فرایند شکست دینامیک و تشکیل ترکش در پوسته‌های استوانه‌ی تحت انفجار داخلی اطلاعات اندکی منتشر شده است. اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه توسط تیلور،^[۵] گارنی^[۶] و موت^[۷] انجام شد.

محققین روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه‌ی ترکش‌های اولیه‌ی حاصل از انفجار در داخل پوسته‌های مربوط به سرجنگی ارائه دادند.^[۸] آنان تأثیر پوسته بر شدت موج شوک تولیدشده را بررسی کردند و دریافتند که شدت موج شوک به ضخامت پوسته و مکان تشکیل ترکش‌ها بستگی دارد. با استفاده از این مدل، حد بالا و پایین سرعت ترکش‌ها محاسبه شد.

همچنین با انجام آزمایش‌های تجربی، نمونه‌های استوانه‌ی با استفاده از مقادیر مختلف خرج میانی استوانه‌ی از جنس پتن^۶ گسترش داده شد.^[۹] در این پژوهش اثر ضخامت دیواره، جنس استوانه‌ها، ایجاد شکاف در دیواره، قطر خرج میانی و مکان قرارگیری چاشنی بر تغییر شکل و رفتار شکست نمونه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

تحریک شده تخمین می‌زند. در این مدل فرض می‌شود که سرعت فلز در طول ضخامت آن ثابت می‌ماند و سرعت فلز و اجزاء گازی عمود بر محور تقارن است. با استفاده از این فرضیات، تعادل انرژی را برای هر هندسه‌ی ساده‌ی متقارن می‌تواند نوشت تا عبارتی تحلیلی برای سرعت نهایی فلز با عبارت‌های انرژی گازی و نسبت جرم کل فلز (M) به جرم کل ماده‌ی منفجره (C) به دست آید. رابطه‌ی ۱ معادله‌ی گارنی اصلاح شده برای پوسته‌های با طول محدود است. [۱۲] ضریب $\sqrt{2E_s}$ که در معادله‌ی ۱ مشاهده می‌شود دارای واحد سرعت است و سرعت مخصوص گارنی برای ماده‌ی منفجره‌ی داده شده نام دارد. در رابطه‌ی ۲ یک تقریب برای سرعت مخصوص گارنی ارائه شده که در آن V_D سرعت انفجار ماده‌ی منفجره است.

$$V_G = \sqrt{\frac{2E_s}{\left[\frac{M}{C} + \frac{1}{\gamma}\right] \left[1 + \frac{R_e}{L_e}\right]}} \quad (1)$$

$$\sqrt{2E_s} = 520 + 0.28V_D \quad (2)$$

۲.۲. مدل تیلور

تیلور شعاع شکست پوسته‌ی استوانه‌ی تحت انفجار داخلی را محاسبه کرد. [۱۵] شعاع شکست داخلی (r_{if}) با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود که در آن r_i شعاع داخلی اولیه پوسته، p_e فشار مؤثر ماده‌ی منفجره بر سطح داخلی اولیه، σ_y تنش تسلیم پوسته، و γ نمای انبساط آدیاباتیک گاز است. برای ماده‌ی منفجره‌ی TNT فشار مؤثر ماده‌ی منفجره و نمای انبساط آدیاباتیک گاز به ترتیب ۲۸ GPa و ۳٫۴ است. [۱۲] با استفاده از رابطه‌ی حجم ثابت در خمیرسانی شعاع شکست خارجی (r_{of}) توسط رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود.

$$\frac{r_{if}}{r_i} = \left[\frac{p_e}{\sigma_y} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

$$r_{of} = \sqrt{r_{if}^2 + r_o^2} - r_i^2 \quad (4)$$

در فرضیه‌ی تیلور اگرچه پارامترهای مهمی مانند پیش‌بینی انبساط پوسته قبل از شکست و نیز خواص ماده‌ی منفجره و پوسته لحاظ می‌شود، اثرات پارامترهای مهمی مثل انتشار موج، نرخ کرنش و کار خمیری در نظر گرفته نشده است.

۳. بررسی روش‌های عددی شبیه‌سازی آسیب و شکست

در روش المان محدود مدل‌سازی شکست دینامیک و انتشار ترک با استفاده از سه روش حذف المان^{۱۱}، المان‌های چسباننده^{۱۲} و استفاده از توابع ناپوسته‌ی غنی شده^{۱۳} انجام می‌شود. دو روش اخیر نیازمند تعریف ترک اولیه است و بیشتر در حوزه‌ی مکانیک شکست کاربرد دارد.

در روش حذف المان، المان‌هایی که طبق یک معیار تعریف شده دچار آسیب شده‌اند از مسئله حذف می‌شود؛ المان‌های حذف شده ترک‌ها را تشکیل می‌دهند. [۱۶] این روش در نرم‌افزارهای تجاری موجود مانند آباکوس^{۱۴} و اس‌داین^{۱۵} به کار گرفته شده و معمول‌ترین روش مدل‌سازی آسیب و شکست در بارگذاری دینامیکی است. از معایب عمده‌ی این روش این است که قانون بقای جرم را -- که از معادلات اساسی مورد استفاده در هیدروکدهاست -- در دامنه‌ی مسئله نقض می‌کند. همچنین استفاده از این روش برای شبیه‌سازی مسائلی که در آن‌ها کرنش‌های بزرگ رخ می‌دهد موجب ایجاد نتایج غیرواقعی خواهد شد. برای مثال در شبیه‌سازی شکست پوسته‌های

محققین به منظور تخمین کرنش شکست دو نوع فولاد، آن‌ها را تحت انفجار خرج میانی قرار دادند. [۱۰] مراحل انبساط دینامیکی و تشکیل ترکش توسط دوربین‌های سرعت‌بالا مشاهده شد. همچنین ترکش‌های حاصله برای برآورد توزیع آماری و بررسی سازوکار واماندگی آن‌ها بازیابی شد.

استفاده از روش لاگرانژی - اوبیری کوپل شده^۷ با استفاده از روش حذف المان، شکست استوانه‌ی شیاردار تحت اثر بار انفجار داخلی مورد بررسی پژوهش‌گران قرار گرفته است. [۱۱] براساس نتایج این پژوهش، شیارهای طولی نسبت به شیارهای حلقوی تأثیر بیشتری در نحوه‌ی شکست استوانه‌ی شیاردار دارد و فرایند شکست به‌طور عمده توسط این شیارها کنترل می‌شود. همچنین شیارهای خارجی کارایی چندانی در کنترل شکست ندارند.

از باندهای برشی آدیاباتیک برای توصیف حالت واماندگی مخازن استوانه‌ی حاوی مواد منفجره استفاده شد [۱۲] و به‌وسیله‌ی تحلیل ناپایداری برای معادله‌ی بنیادین ترمو - ویسکوپلاستیک، یک معیار واماندگی وابسته به نرخ ارائه شد.

در مطالعات بعدی، با استفاده از روش لاگرانژی - اوبیری دلخواه^۸ هیدروکدی بر مبنای نظریه موت برای شبیه‌سازی شکست و تشکیل ترکش در پوسته‌های فلزی تحت انفجار خرج میانی توسعه یافت [۱۲] و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی توسط آزمایش‌های تجربی با مواد منفجره‌ی مختلف صحه‌گذاری شد.

با استفاده از روش نقطه‌ی مادی^۹ مسئله‌ی تحریک ورق فلزی با استفاده از مواد منفجره مورد بررسی پژوهش‌گران قرار گرفت. [۱۴] نتایج حاصل از این بررسی با مدل گارنی و تصحیح‌های آن مقایسه و تصحیح جدیدی برای مدل گارنی استخراج شد. ایجاد شکست و گسیختگی در یک سرچنگی تحت انفجار داخلی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار^{۱۰} شبیه‌سازی شد. [۱۵]

شبیه‌سازی فرایند گسیختگی و تبدیل پوسته‌ها به ترکش بسیار پیچیده است و فرایندهای دینامیکی مختلفی مانند ایجاد موج انفجار در ماده‌ی منفجره، برهمکنش آن با پوسته، انبساط با نرخ کرنش بالا و در نهایت شکست و تکه‌تکه شدن آن را شامل می‌شود. به‌همین دلیل استفاده از روش‌های نظری بسیار پیچیده، و در برخی موارد غیرممکن است. انجام آزمایش‌های تجربی نیز به دلیل خطرناک بودن کار با مواد منفجره و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت برای ثبت مشخصات دینامیکی پوسته، با محدودیت روبروست. لذا شناسایی و استفاده از روش‌های عددی که از قابلیت شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت این فرایند برخوردار باشند در اولویت است.

در این پژوهش انبساط، گسیختگی و رفتار پس از گسیختگی پوسته‌ی استوانه‌ی مسی بدون اکسیژن با هدایت بالا (OFHC) تحت انفجار خرج میانی C۴ با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) شبیه‌سازی شده است. ابتدا مدل‌های نظری موجود در این زمینه معرفی شده و سپس روش‌های عددی شبیه‌سازی آسیب و شکست، مبانی روش SPH و روند محاسبات در آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نحوه‌ی شبیه‌سازی مسئله با استفاده از روش SPH تشریح شده و پروفیل تغییر شکل انبساطی پوسته، تغییرات سرعت، دما و گسیختگی و رفتار پس از گسیختگی پوسته بررسی و تحلیل شده است. با استفاده از این روش می‌توان به درک بهتری از فیزیک این فرایند رسید.

۲. مدل‌های نظری

۲.۱. مدل گارنی

مدل گارنی [۶] سرعت انتهایی ترکش‌های پوسته‌ی استوانه‌ی را که به‌وسیله‌ی انفجار

۴. جمع‌ها یا تقریب ذرات، در هرگام زمانی اعمال می‌شود؛ به دلیل طبیعت تطبیق پذیر روش SPH، مکان ذرات و مقدار خواص منحصر به فرد با زمان تغییر می‌کند.

۵. تقریب ذرات برای تمامی قسمت‌های توابع میدان به کار گرفته می‌شود و معادلات مشتق جزئی را به معادلات دیفرانسیل معمولی که تنها تابع زمان هستند، کاهش می‌دهد. معادلات دیفرانسیل معمولی با استفاده از الگوریتم‌های انتگرال‌گیری صریح حل می‌شود.

چنان‌که بیان شد، فرمول‌بندی‌های اساسی در روش SPH مبتنی بر نظریه میان‌یابی انتگرالی هستند و تقریب‌های کرنل و ذرات مشخصه‌های کلیدی این روش هستند.^[۲۲]

۲.۴. تقریب کرنل

تقریب کرنل در یک میدان تابعی با بیان انتگرالی تابع دلخواه $f(x)$ در رابطه‌ی ۵ آغاز می‌شود که در آن f تابعی دلخواه از بردار مکان سه‌بعدی x است و بر دامنه‌ی Ω که شامل x است تعریف می‌شود. تابع دلتای دیراک توسط رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (5)$$

$$\delta(x - x') = \begin{cases} 1 & x = x' \\ 0 & x \neq x' \end{cases} \quad (6)$$

$x - x'$ در رابطه‌ی ۵ فاصله‌ی بین ذره‌ی x و هر ذره‌ی دلخواه در دامنه‌ی Ω است. انتگرال ارائه شده در رابطه‌ی ۵ در این مرحله دقیق است و $f(x)$ در دامنه‌ی Ω تعریف شده و پیوسته است. با تعویض تابع دلتای دیراک در رابطه‌ی ۵ با تابع کرنل هموارسازی^[۲۳] $W(x - x')$ ، به رابطه‌ی ۷ دست می‌یابیم:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (7)$$

که در آن، h یا همان طول هموارسازی معرف تأثیر تابع هموارسازی است. انتگرال ارائه شده در رابطه‌ی ۷ تقریب کرنل است. توابع هموارسازی مختلفی می‌توان به کار گرفت اما تمامی این توابع باید با افزایش فاصله از ذره‌ی مرجع کاهش یابند، تابعی فرد باشند، به اندازه‌ی کافی هموار باشند و شرایط ریاضی مربوطه را ارضاء کنند.

۳.۴. تقریب ذرات

دومین مشخصه‌ی مهم در روش SPH تقریب ذرات است که در آن انتگرال‌های پیوسته‌ی رابطه‌ی ۷ تبدیل به فرم گسسته‌سازی شده جمع روی تمامی ذرات در دامنه‌ی مرجع می‌شود (شکل ۱).

حجم بی‌نهایت کوچک dx' در رابطه‌ی ۷ با حجم محدود ذره‌ی j (یعنی ΔV_j) که با جرم و چگالی مطابق رابطه‌ی ۸ مربوط است، تعویض می‌شود.

$$\Delta V_j = \frac{m_j}{\rho_j} \quad (8)$$

با اعمال رابطه‌ی ۸ در معادله‌ی ۷ به رابطه‌ی ۹ دست می‌یابیم:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \cong \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x - x_j, h) \quad (9)$$

استوانه‌ی جدارنازک تحت انفجار داخلی، با توجه به انبساط زیاد پوسته از یک سو و ضخامت کم آن از سوی دیگر، بیشتر المان‌های موجود حذف شده و فرایند گسیختگی، تشکیل ترکش و رفتار پس از گسیختگی ماده به درستی شبیه‌سازی نمی‌شود.

ضرورت دست‌یابی به روشی برای شبیه‌سازی مسائلی که در آن تغییر شکل‌های بزرگ، منجر به تکه‌تکه شدن مواد و تشکیل ترکش می‌شود سبب گسترش روش‌های بدون المان^[۱۶] در مسائل دینامیکی شده است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، و روش بدون المان گالرکین (EFG)^[۱۷]، از مشهورترین این روش‌ها هستند.^[۱۷] مزایای این روش‌ها در مقایسه با روش‌های عددی مبتنی بر المان در بخش ۴ بررسی شده است.

۴. روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

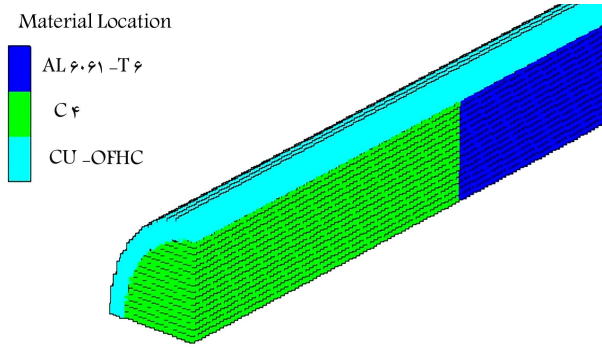
در روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، سیستم مورد نظر با استفاده از تعداد محدودی ذرات جدا از هم گسسته‌سازی می‌شود. روش SPH به عنوان یک روش بدون المان با طبیعت لاگرانژی، برای بررسی مسائل نجومی توسعه یافت.^[۱۷] در حوزه‌ی کاربردی مزیت اصلی این روش عدم نیاز به اتصال بین ذرات با استفاده از المان‌های معمول است که از اعوجاج^[۱۸] المان در مسائل درگیر با تغییر شکل‌های بزرگ جلوگیری می‌کند. بنابراین این روش به خوبی قادر به شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بسیار بزرگ و جریان سیال است. از مزایای دیگر این روش می‌توان به امکان ترویج آن با روش‌های المان محدود و اختلاف محدود اشاره کرد. نمونه‌هایی از ترویج روش SPH با روش‌های دیگر موجود است.^{[۱۹][۱۸]}

با استفاده از روش SPH امکان شبیه‌سازی فرایند تشکیل ترکش وجود دارد. از این روش در بررسی از هم پاشیدگی و خرد شدن ضربه زنده در فرایندهای برخورد اجسام با سرعت‌های بسیار بالا استفاده شده است.^{[۲۰][۲۱]} در این نوع مسائل، بررسی حالات تغییر شکل در ابر مواد متلاشی شده بسیار فراتر از محدوده‌ی است که روش لاگرانژی مبتنی بر المان آن را پوشش دهد. همچنین روش اویلری به دلیل ناکارآمد بودن در حفظ تاریخچه و روند بارگذاری و مباحث مرتبط با تماس مواد و اتصالات آن‌ها برای این نوع مسائل مناسب نیست. تغییرات توپولوژی در محل تماس در شبیه‌سازی‌های شامل برهم‌کنش سیال و جامد دومین چالشی است که کاربرد روش SPH را برجسته‌تر می‌کند. برای مثال هنگامی که سازه تحت فرایند تخریب قرار می‌گیرد در حالت تماس با سیال سطوح جدیدی ایجاد می‌شود. در این حالت شبیه‌سازی تماس با مشکل روبرو می‌شود.

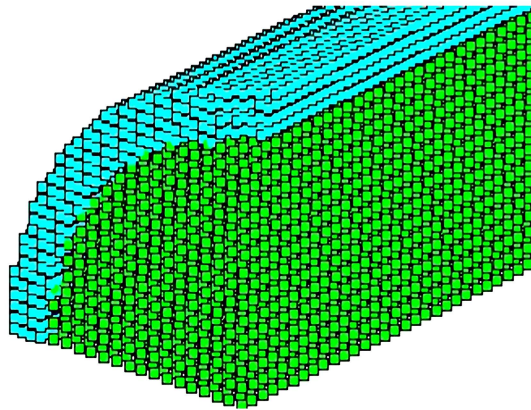
۱.۴. روند محاسبات در روش SPH

در روش SPH دسته معادلات دیفرانسیل حاکم که از نوع مشتق جزئی‌اند، به دسته معادلات دیفرانسیل معمولی در فرم گسسته که تنها به زمان وابسته‌اند کاهش می‌یابد. دسته معادلات دیفرانسیل معمولی را می‌توان با روش‌های انتگرالی صریح^[۱۹] حل کرد. روند محاسبات در روش SPH عبارت است از:

۱. دامنه‌ی مسئله با مجموعه‌ی ذرات غیرمتصل گسسته‌سازی می‌شود.
۲. روش انتگرالی ارائه شده برای تابع تقریب به عنوان تقریب کرنل^[۲۰] نامیده می‌شود.
۳. تقریب کرنل با استفاده از ذرات تقریب زده می‌شود که به آن تقریب ذرات^[۲۱] گفته می‌شود. تقریب ذرات، انتگرال تقریب کرنل را با استفاده از جمع بر روی تمام ذرات همسایه که دامنه‌ی مرجع^[۲۲] نامیده می‌شود تعویض می‌کند.



الف) مدل ساخته شده



ب) گسسته‌سازی توسط ذرات.

شکل ۲. مدل‌سازی توسط روش SPH.

جدول ۱. خواص مکانیکی و حرارتی مس OFHC [۲۴]

ρ_0	C_p	σ_y	E	ν
(kg/m ³)	(J/KgK)	(MPa)	(GPa)	
۸۹۶۰	۳۸۳	۱۲۰	۱۲۸	۰٫۳۴

۲.۵. معادلات حالت

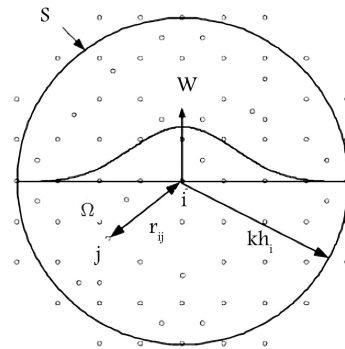
از معادله‌ی حالت JWL برای مدل‌سازی ماده منفجره C4 استفاده شد. معادله‌ی حالت JWL توسط رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{(-R_1 V)} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{(-R_2 V)} + \omega \frac{E}{V} \quad (12)$$

در این رابطه P فشار، V حجم و e چگالی انرژی داخلی بر واحد حجم اولیه‌ی ماده‌ی منفجره است. همچنین پارامترهای A ، B ، R_1 ، R_2 ، ω و ρ_0 از مشخصات ماده‌ی منفجره است. ضرایب این معادله در جدول ۲ نشان داده شده است.

با توجه به این که فشار وارده بر پوسته‌ی مسی از استحکام آن بسیار فراتر است، از معادله حالت مای - گرونایزن^{۲۵} برای مدل‌سازی رفتار پوسته استفاده شد. این معادله خواص ترمودینامیکی نظیر فشار و انرژی داخلی ماده را به دما و چگالی آن مربوط می‌سازد. در بیشتر جامدات و سیالات رابطه‌ی خطی بین سرعت شوک (U_s) و سرعت ذرات (U_p) مطابق رابطه‌ی ۱۸ برقرار است.

$$U_s = c_0 + S U_p \quad (13)$$



شکل ۱. تقریب ذرات در دامنه حل [۲۲]

N تعداد ذرات در دامنه‌ی مرجع است. تقریب ذرات برای تابع توسط رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شود. که در آن W_{ij} مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود.

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (10)$$

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h) \quad (11)$$

معادله‌ی ۱۱ بیان می‌کند که مقدار تابع در ذره‌ی i با مقدار تابع در تمام ذرات دامنه‌ی مرجع که با تابع کرنل هموارسازی و حجم ذره وزن داده شده، تقریب زده می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از این روش معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، و انرژی برای هر ذره گسسته‌سازی شده و همراه با مدل‌های مادی و شرایط اولیه و مرزی حل می‌شوند.

۵. شبیه‌سازی با استفاده از روش SPH

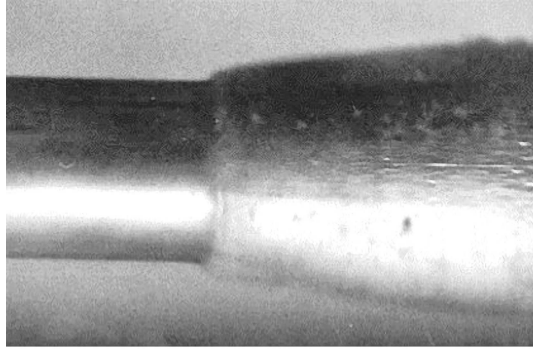
۵.۱. مدل‌سازی

در این قسمت مراحل پیش‌پردازش شبیه‌سازی انبساط و شکست پوسته‌ی استوانه‌ای با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار تشریح می‌شود. از هیدروکد اتوداین^{۲۴} برای شبیه‌سازی مسئله استفاده شده است. این مسئله مربوط به آزمایشی است که در آن پوسته از جنس مس OFHC ساخته شده و دارای قطر خارجی ۳۸ mm، ضخامت ۳ mm و طول ۱۵۰ mm است [۲۲]. نیمی از آن با ماده‌ی منفجره‌ی C4 پر شده و نیم دیگر آن با یک درپوش آلومینیومی مسدود شده است. مطابق آزمایش، شروع انفجار که همان محل قرارگیری چاشنی است، به صورت نقطه‌یی و با فاصله‌ی ۱۲/۵ mm در داخل ماده‌ی منفجره تعریف شد. برای کاهش زمان محاسبات و بنا به تقارن، یک چهارم پوسته مدل‌سازی شد. شکل ۲ نشان دهنده‌ی مدل‌سازی توسط روش SPH است. در شکل ۲ الف مدل ساخته شده و در شکل ۲ ب گسسته‌سازی مسئله با استفاده از ذرات نشان داده شده است. فاصله‌ی بهینه‌ی ذرات به اندازه‌ی ۰/۶ mm در نظر گرفته شد. همچنین بر صفحات تقارنی، شرط مرزی تقارن مربوط به هر صفحه قرار داده شد. خواص مکانیکی و حرارتی مس OFHC در جدول ۱ نشان داده شده است.

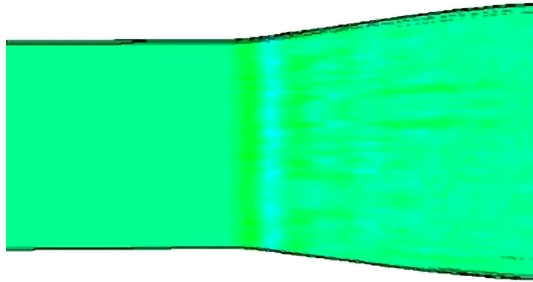
از روش صریح برای انتگرال‌گیری از زمان استفاده شد، و زمان کل فرایند ۲۰ μs در نظر گرفته شد. اندازه گام زمانی اولیه ۳۴/۳۸ ns و مقدار کمینه‌ی آن ۱/۴۳۹ ns تعیین شد.

جدول ۴. ضرایب مدل اشتنبرگ - گوینان مس OFHC. [۲۷]

G_0 (Gpa)	σ_0 (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	β	n
۴۷٫۷	۱۲۰	۶۴۰	۳۶	۰٫۴۵
$\frac{\partial G}{\partial p}$	$\frac{\partial G}{\partial T}$ (Mpa/K)	$\frac{\partial \sigma}{\partial P}$	T_{melt} (K)	
۱٫۳۵	-۱۷٫۹۸	۰٫۰۰۳۳۹۶	۱۷۹۰	



الف) آزمایشی [۲۳]



ب) شبیه سازی.

شکل ۳. پروفیل تغییر شکل پس از ۱۰ μs.

۶. بحث و بررسی نتایج

۶.۱. صحنه‌گذاری شبیه‌سازی

برای صحنه‌گذاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی، پروفیل تغییر شکل پس از ۱۰ μs استخراج شد و با نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده [۲۳] مقایسه شد. شکل ۳ الف نشان‌دهنده تغییر شکل لوله پس از ۱۰ μs است که با استفاده از دوربین‌های سرعت بالا ثبت شده است. شکل ۳ ب نیز پروفیل تغییر شکل به دست آمده از شبیه‌سازی در همان زمان را نشان می‌دهد.

در شکل ۴ موقعیت شعاعی برحسب موقعیت محوری نسبت به محور تقارن پوسته پس از ۱۰ μs ترسیم شده است. این نمودار نشان‌دهنده پروفیل تغییر شکل پوسته است. تفاوت بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی به‌طور متوسط کم‌تر از ۸٪ است. بنابراین نتایج حاصل از شبیه‌سازی همگرایی مناسبی با نتایج آزمایش دارد و مؤید صحت شبیه‌سازی است.

در شبیه‌سازی این‌گونه مسائل با استفاده از روش اجزاء محدود لاگرانژی، پس از انبساط پوسته اجزاء دچار واپیچش می‌شوند و ادامه‌ی روند شبیه‌سازی مختل خواهد شد. شبیه‌سازی به‌روش اجزاء محدود اوپری نیز به‌دلیل آن که مرزهای ماده در این روش به‌درستی قابل تشخیص و ردیابی نیست، نتایج دقیقی در بر نخواهد داشت.

جدول ۲. ضرایب معادله‌ی حالت JWL برای C۴. [۲۵]

R_1	R_2	B (MPa)	A (MPa)	ρ_0 (kg/m ^۳)
۴٫۵	۱٫۴	$۱٫۲۹۵ \times 10^4$	$۶٫۰۹۷۷ \times 10^5$	۱۶۰۱
فشار CJ		انرژی CJ بر واحد حجم	سرعت انفجار CJ (m/s)	ω
$۲٫۸ \times 10^4$ (MPa)		۹×10^6 (kJ/m ^۳)	۸۱۹۳	۰٫۲۵

جدول ۳. ضرایب معادله حالت مای - گرونایزن مس OFHC. [۲۴]

Γ	c_0 (m/s)	S
۲٫۰۲	۳۹۴۰	۱٫۴۸۹

فشار هیدروستاتیک p توسط رابطه‌ی ۱۴ بیان می‌شود که در آن p_H و e_H مطابق روابط ۱۵ و ۱۶ ارائه می‌شود:

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (14)$$

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0 \eta (1 + \eta)}{[1 - (S - 1)]^2} \quad (15)$$

$$e_H = \frac{p_H}{2\rho_0} \left(\frac{\eta}{1 + \eta} \right) \quad (16)$$

η نیز توسط رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود که در آن ρ چگالی و ρ_0 چگالی اولیه است.

$$\eta = \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \quad (17)$$

برای استفاده از معادله‌ی حالت فوق باید ضرایب c_0 ، S و Γ مشخص باشد. این ضرایب برای مس OFHC در جدول ۳ نشان داده شده است.

۳.۵. مدل مادی

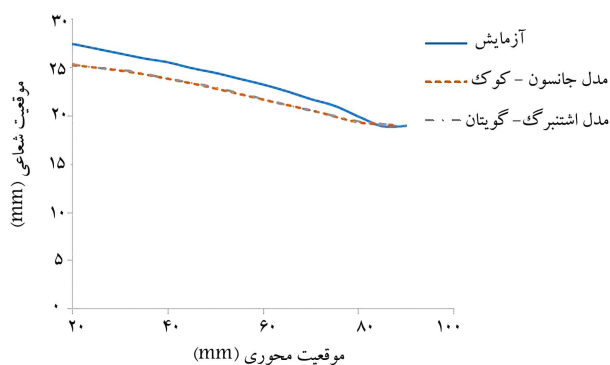
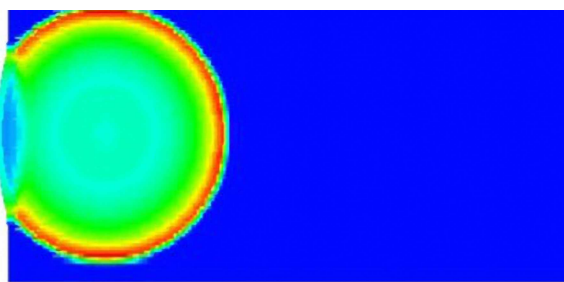
با توجه به این که در این حالت نرخ کرنش‌هایی از مرتبه‌ی 10^4 تا 10^5 ایجاد می‌شود، برای مدل‌سازی رفتار خمیری پوسته از مدل اشتنبرگ - گوینان [۲۶] استفاده شد. این مدل برای بررسی رفتار فلزات در نرخ کرنش‌های بالا مناسب است. در مدل اشتنبرگ - گوینان مدول برشی و تنش جریان با افزایش فشار افزایش می‌یابد و با افزایش دما کاهش می‌یابد. این مدل، معادله‌ی بنیادین برای مدول برشی و تنش جریان را به‌ترتیب مطابق روابط ۱۸ و ۱۹ مطرح می‌کند.

$$G = G_0 \left[1 + \left[\frac{\partial G}{\partial p} \right] \frac{p}{G_0} + \left[\frac{\partial G}{\partial T} \right] (T - 300) \right] \quad (18)$$

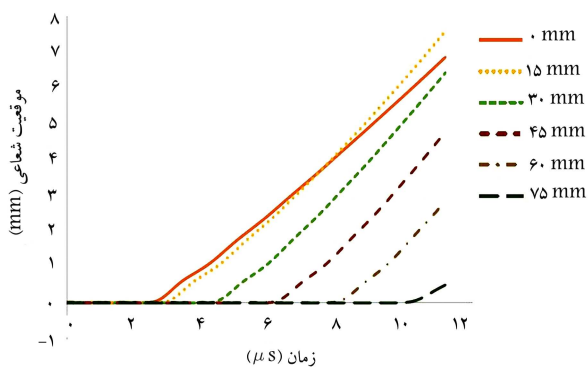
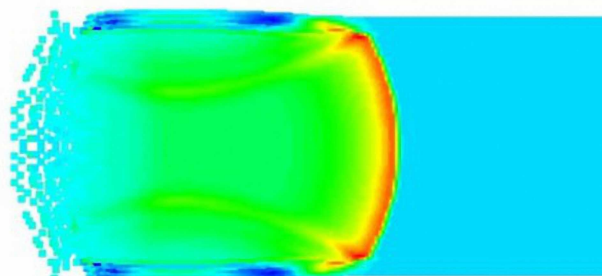
$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \left[\frac{\partial \sigma}{\partial p} \right] \frac{p}{\sigma_0} + \left[\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right] (T - 300) \right] \times (1 + \beta \varepsilon^n) \quad (19)$$

$$\sigma_0 [1 + \beta \varepsilon^n] \leq \sigma_{max}$$

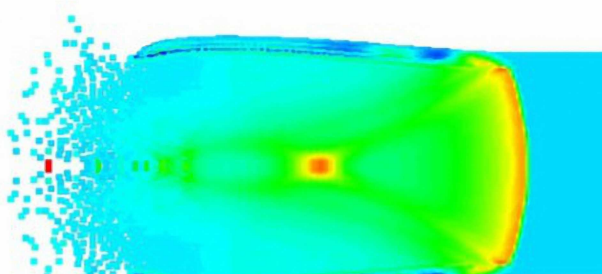
در این رابطه G مدول برشی، σ تنش جریان، p فشار، η نسبت حجم اولیه به حجم ماده، T دما، ε کرنش خمیری، β ضریب کارسختی و n توان کارسختی است. زیرینویس صفر مربوط به حالت اولیه‌ی G و σ است. اگر دمای ماده از دمای ذوب تجاوز کند، مدول برشی و تنش جریان برابر صفر قرار داده می‌شود. به‌همین دلیل گرمای ویژه‌ی ماده باید برای فعال‌سازی محاسبات دما تعریف شود. ضرایب مدل اشتنبرگ - گوینان برای مس OFHC در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. موقعیت شعاعی برحسب موقعیت محوری پوسته پس از $10 \mu s$.



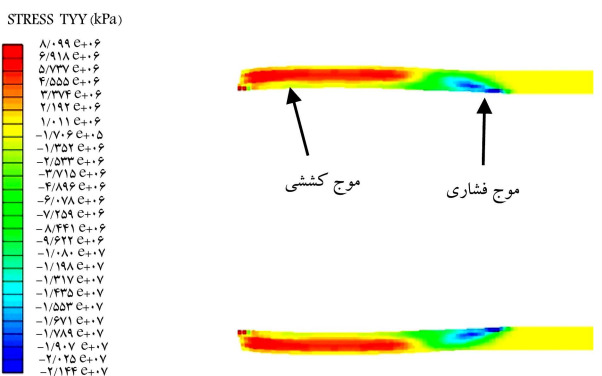
شکل ۵. تغییر شکل شعاعی پوسته برحسب زمان.



شکل ۶. مراحل انتشار موج انفجار و انعکاس آن.

همچنین در این حالت امکان استخراج پروفیل تغییر شکل وجود ندارد. بنابراین روش SPH با تکیه بر طبیعت لاگرانژی و مستقل بودن ذرات از یکدیگر مناسب است و پروفیل تغییر شکل را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است.

در شکل ۵ تغییر شکل شعاعی پوسته برحسب زمان برای فواصل ۱۵ میلی‌متری روی محور پوسته نشان داده شده است. در ۱۵ میلی‌متر ابتدای پوسته فاصله‌ی زمانی تغییر شکل به هم نزدیک است. دلیل این امر استقرار چاشنی در فاصله‌ی ۱۲/۵ میلی‌متری داخل ماده‌ی منفجره است که باعث می‌شود پیشانی موج انفجار در فاصله‌ی زمانی بسیار نزدیک به این قسمت برسد. این نمودار اطلاعات مناسبی درخصوص زمان شروع تغییر شکل و پاسخ خمیری پوسته به موج انفجار در نقاط مختلف آن فراهم می‌آورد.



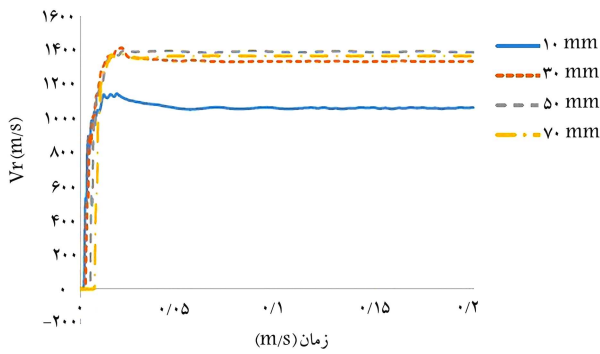
شکل ۷. کانتور تنش در ضخامت پوسته در راستای شعاعی در هنگام عبور موج شوک و پس از $3 \mu s$.

۲.۶. شبیه‌سازی انتشار موج انفجار

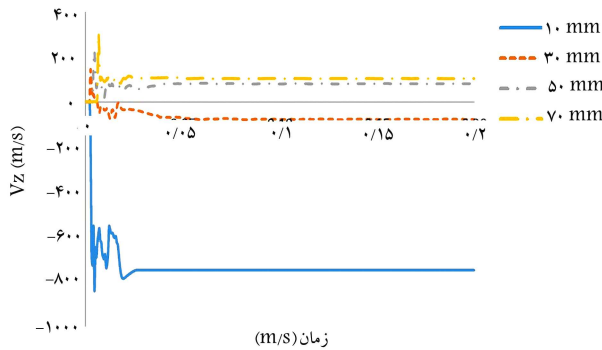
با شروع انفجار، موج انفجار به صورت کروی در ماده‌ی منفجره منتشر می‌شود؛ مراحل انتشار موج انفجار و انعکاس آن در شکل ۶ نشان داده شده است. با انتشار موج انفجار، ماده‌ی منفجره به گاز با فشار بسیار بالا تبدیل می‌شود. این موج به دیواره‌ی داخلی پوسته رسیده و قسمتی از آن موجب ایجاد یک موج فشاری بسیار قوی و شروع تغییر شکل در پوسته می‌شود. قسمت دیگر آن منعکس شده و به سمت مرکز پوسته حرکت می‌کند. پس از تکمیل فرایند انفجار، حجم محصولات حاصل از انفجار افزایش یافته و از سمت دیگر پوسته خارج می‌شود. با استفاده از روش SPH، فرایند انفجار، انبساط محصولات حاصل از انفجار و برهم‌کنش آن با پوسته‌ی مسی به درستی شبیه‌سازی شده است.

۳.۶. تغییرات تنش

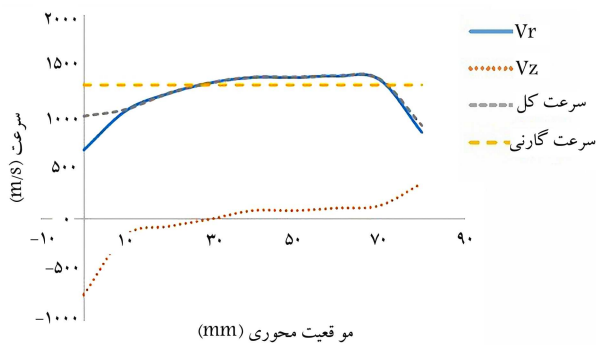
در شکل ۷ کانتور تنش در راستای شعاعی (σ_r) در سطح برش خورده پوسته نشان داده شده است. این کانتور مربوط به $3 \mu s$ پس از شروع انفجار است. در محل تماس موج انفجار با سطح داخلی پوسته، σ_r فشاری است. پس از انتشار آن در ضخامت پوسته، این موج با سطح آزاد برخورد کرده و به صورت کششی بازمی‌گردد. تغییرات تنش محیطی (σ_θ) برحسب زمان در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تغییرات سرعت شعاعی برحسب زمان.



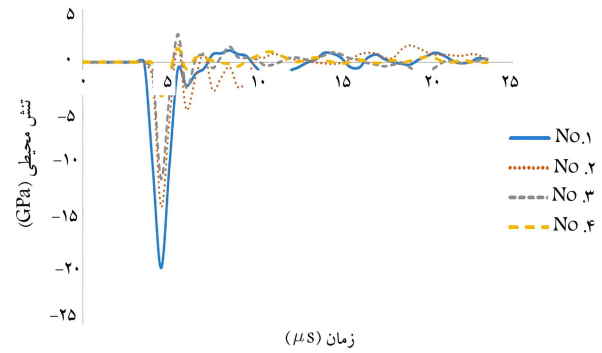
شکل ۱۱. تغییرات سرعت طولی برحسب زمان.



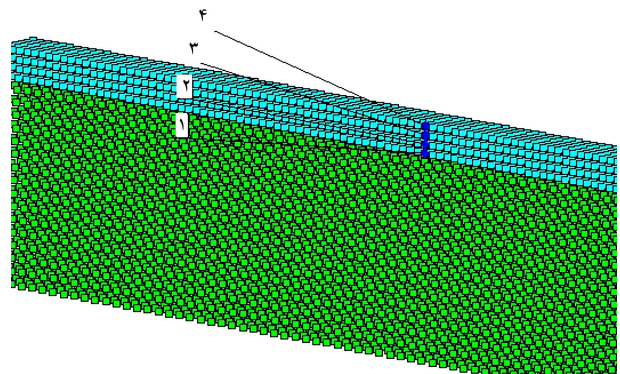
شکل ۱۲. تغییرات سرعت مطلق و مؤلفه‌های سرعت در راستای شعاعی و طولی برای نقاط مختلف در طول محور پوسته.

می‌شود. در حدود فاصله‌ی ۴۰ mm از ابتدای پوسته، سرعت طولی صفر شده و سپس افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲ تغییرات سرعت مطلق و مؤلفه‌های سرعت در راستای شعاعی و طولی برای نقاط مختلف در طول محور پوسته نشان داده شده است. همچنین با استفاده از رابطه‌ی ۱، سرعت گارنی نیز محاسبه شده و با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی به روش SPH مقایسه شده است. در این مسئله سرعت گارنی برابر با ۱۳۱۵ m/s است. با افزایش فاصله‌ی محوری سرعت شعاعی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد. سرعت مطلق نیز که برآیند مؤلفه‌های سرعت است، ابتدا افزایش یافته و در نهایت به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد. سرعت مطلق در حقیقت سرعت ترکش‌های تشکیل شده است. این سرعت در فاصله‌ی حدود ۲۰ mm به سرعت گارنی نزدیک می‌شود. از آنجا که معادله‌ی گارنی سرعت کل پوسته را ثابت در نظر می‌گیرد مزیت عمده‌ی شبیه‌سازی با استفاده از روش



شکل ۱۳. تغییرات تنش محیطی برحسب زمان برای ۴ نقطه در راستای ضخامت پوسته.



شکل ۱۴. محل قرارگیری چهار نقطه در راستای ضخامت پوسته.

این نمودار برای چهار نقطه با فواصل ۱ mm در راستای ضخامت پوسته و در فاصله‌ی محوری ۳۰ mm از ابتدای آن ترسیم شده است. این نقاط در شکل ۹ نشان داده شده است. نقطه‌ی ۱ روی سطح داخلی پوسته و نقطه‌ی ۴ روی سطح خارجی آن قرار دارد.

موج انفجار پس از حدود ۴ μs به محل قرارگیری سنسورها رسیده و پالسی فشاری با زمان دوام حدوداً ۱ μs به سطح داخلی پوسته اعمال می‌شود. چنان‌که در مباحث مرتبط با موج شوک در کتب مرجع آمده است، در این زمان می‌توان از تانسور تنش انحرافی در برابر تانسور تنش هیدروستاتیک صرف‌نظر کرد.^[۱] در این حالت مؤلفه‌های تانسور تنش فشاری است و مقدار آن‌ها با هم برابر می‌باشد. تنش محیطی حاصل از این پالس فشاری در سطح داخلی پوسته (نقطه‌ی ۱) مقدار بیشینه‌ی نزدیک به فشار c - ماده‌ی منفجره داشته و در نقاط دیگر مقدار بیشینه‌ی این فشار کم‌تر می‌شود. پس از عبور موج انفجار پوسته شروع به انبساط می‌کند و تنش محیطی کششی ایجاد می‌شود. این مؤلفه تنش کششی عامل اصلی ایجاد پارگی‌های موضعی در پوسته و خروج گازهای حاصل از انفجار از میان آن‌هاست.

۴.۶. تغییرات سرعت

تغییرات سرعت‌های شعاعی و طولی برحسب زمان به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که پس از حدود ۵۰ μs سرعت نقاط مختلف پوسته به یک مقدار ثابت می‌رسد. این مقادیر ثابت همان مؤلفه‌های سرعت حد ترکش‌هاست. سرعت طولی در نقاط ابتدایی پوسته منفی است. این سرعت منفی به دلیل خروج محصولات گازی حاصل از انفجار و تأثیر آن بر این ناحیه است. با افزایش فاصله‌ی طولی جهت این سرعت شروع به تغییر کرده و مثبت

SPH، برآورد واقعی‌تر توزیع سرعت در نقاط مختلف پوسته است. لازم به ذکر است در این حالت چون از اثر نیروی پسا^{۲۶}ی هوا صرف نظر شده است، مقادیر محاسبه شده برای سرعت ترکش‌ها بیشتر از مقدار واقعی است.

۵.۶. تغییرات دما

تغییر شکل خمیری قابل توجه باعث ایجاد گرما در ماده می‌شود. به دلیل وابستگی خواص خمیری مواد به دما، اطلاع از افزایش دمای ایجاد شده در این حالت ضروری است. به ویژه در این مسئله، عبور امواج شوک و تغییر شکل خمیری با نرخ بالا موجب افزایش دمای قابل ملاحظه خواهد شد. همچنین ممکن است ترکش‌های حاصله تغییر فاز داده و ذوب شوند. باید توجه داشت که گازهای حاصل از انفجار نیز دارای دمای بسیار بالا هستند ولی به دلیل زمان بسیار کم انجام فرایند، امکان انتقال حرارت وجود ندارد. بنابراین فرایند به صورت بی‌دررو انجام شده و از اثر تماس حرارتی گازهای حاصل از انفجار با سطح داخلی صرف نظر می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرات دمای فاز در یک سیستم خرج گود^{۲۷}، مشخص شده است که گازهای انفجاری تأثیر چندانی در افزایش دمای فاز ندارد.^[۲۸]

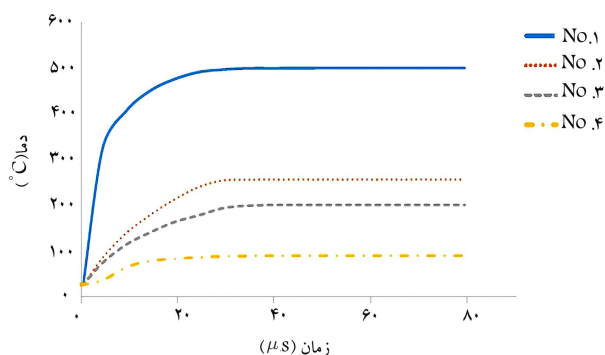
در شکل ۱۳ تغییرات دما برحسب زمان برای چهار نقطه‌ی مورد اشاره در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دمای سطح داخلی از نقاط دیگر بیشتر است و با افزایش فاصله از سطح داخلی، تغییرات دما کم‌تر می‌شود. بالاتر بودن دمای ایجاد شده روی سطح داخلی به دلیل کرنش خمیری بیشتر در آن است که منجر به ایجاد کار خمیری بیشتر می‌شود.

در شکل ۱۴ توزیع دمای ماندگار روی سطوح داخلی و خارجی پوسته نشان داده شده است. دمای ذوب مس OFHC در حدود 1517°C است. مطابق شکل ۱۵ متوسط دمای نقاط روی سطح داخلی پوسته حدود 500°C است؛ لذا ترکش‌های ایجاد شده در فاز جامد باقی می‌مانند و ذوب نخواهند شد. دمای روی سطح خارجی تغییرات چندانی نداشته و در حدود 100°C است. مشاهده می‌شود که دمای ماندگار در نقاط ابتدایی پوسته بالاتر از بقیه نقاط است. قسمت‌های ابتدایی پوسته علاوه بر فشار داخلی ایجاد شده بر اثر انفجار تحت بارگذاری ناشی از خروج محصولات انفجار با سرعت بسیار بالا نیز هستند. دمای بالاتر در این نقاط ناشی از تغییر شکل خمیری موضعی شدیدتر به دلیل این بارگذاری توأم است.

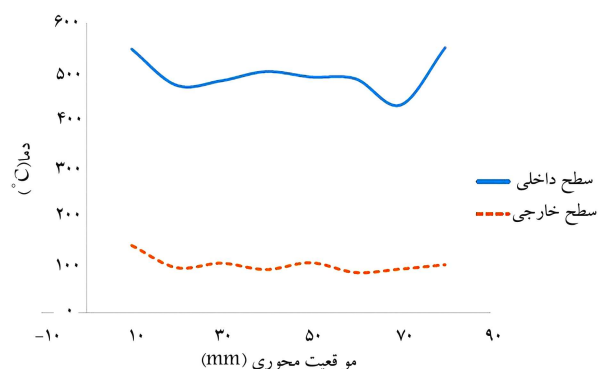
۶.۶. شبیه‌سازی گسیختگی پوسته

پس از انفجار، پوسته دچار تغییر شکل خمیری شده و شروع به انبساط می‌کند. در این هنگام، ترک‌های ریزی روی سطوح داخلی و خارجی آن ایجاد می‌شود. پدیده‌ی اسپال^{۲۸} نیز یکی از دلایل ایجاد ترک‌ها روی سطح داخلی است. در این حالت برهم‌کنش تنش‌های کششی موجب ایجاد شکست‌های ماکروسکوپی می‌شود. در ابتدا عمده‌ی ترک‌های ایجاد شده طولی‌اند که بر اثر افزایش تنش محیطی فراتر از مقاومت ماده ایجاد شده‌اند. پس از آن، این ترک‌ها رشد کرده و به هم می‌پیوندند. شاخه‌شاخه شدن^{۲۹} ترک که از ویژگی‌های شکست دینامیک است نیز موجب تسهیل در این فرایند می‌شود. در شکل ۱۵ مرحله‌ی آغاز شکست در پوسته و خروج گازهای حاصل از انفجار از میان ترک‌های ایجاد شده در آزمایشات انجام شده^[۲۳] نشان داده شده است.

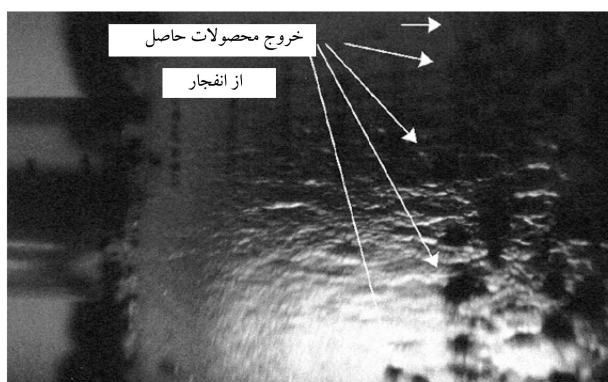
در جدول ۵ شعاع شکست خارجی پوسته که توسط روش SPH به دست آمده با مقدار محاسبه شده توسط مدل تیلور (رابطه‌ی ۳) مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف نتایج حدود ۷٫۵ درصد بوده و با استفاده از روش SPH شعاع



شکل ۱۳. تغییرات دما برحسب زمان برای چهار نقطه در راستای ضخامت پوسته.



شکل ۱۴. توزیع دمای ماندگار بر روی سطوح داخلی و خارجی پوسته.



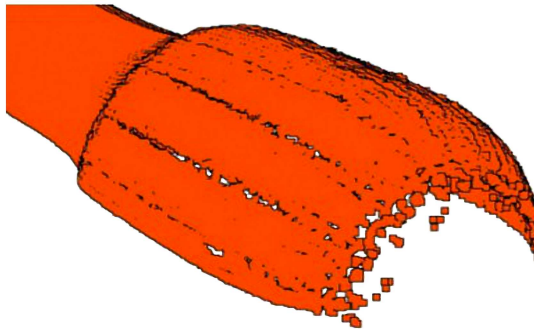
شکل ۱۵. آغاز شکست در پوسته و خروج گازهای حاصل از انفجار از میان ترک‌ها.^[۲۳]

جدول ۵. مقایسه‌ی شعاع شکست.

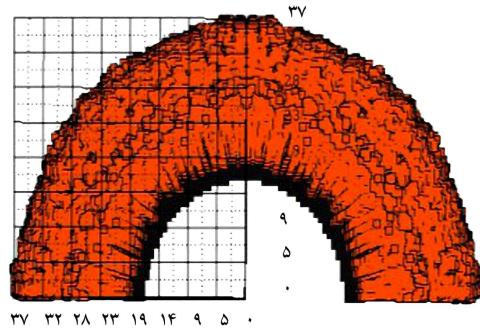
روش SPH	مدل تیلور	تفاوت (%)
۳۷ (mm) شعاع خارجی شکست	۴۰	۷٫۵

خارجی شکست به میزان قابل قبولی محاسبه شده است. شعاع خارجی شکست در زمان ایجاد ترک‌های ماکروسکوپی طولی روی سطح خارجی پوسته اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۶ روش اندازه‌گیری شعاع خارجی شکست پوسته نشان داده شده است.

در شکل ۱۷ نتایج شبیه‌سازی مراحل ایجاد ترک‌ها، و رشد و خروج محصولات انفجاری از میان آن‌ها نشان داده شده است. طبق این نتایج، پس از $12.5\mu\text{s}$ ترک‌های کوچکی در قسمت ابتدایی پوسته ایجاد شده است. خروج محصولات انفجار از این قسمت ایجاد ترک‌ها را تسهیل می‌کند. اما در قسمت‌های دیگر هنوز

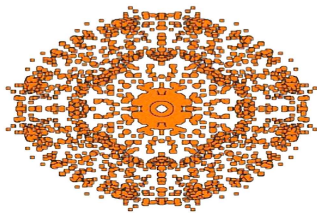


ب) ترک های ماکروسکوپیک.

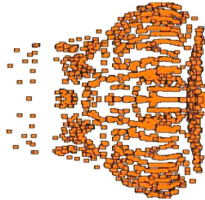


الف) نمای رو به رو؛

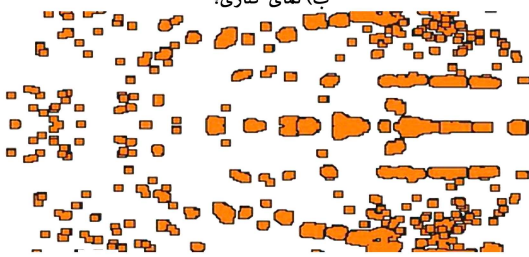
شکل ۱۶. اندازه‌گیری شعاع خارجی شکست پوسته.



الف) نمای رو به رو؛

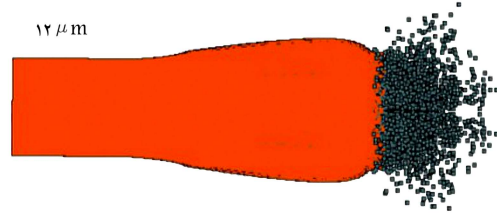


ب) نمای کناری؛

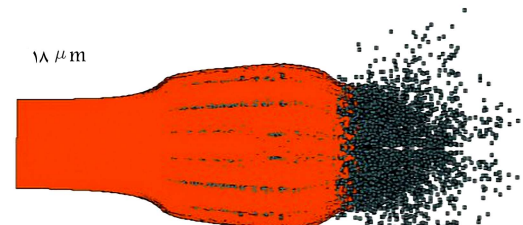


ج) بزرگ نمایی قسمت مشخص شده در تصویر ب.

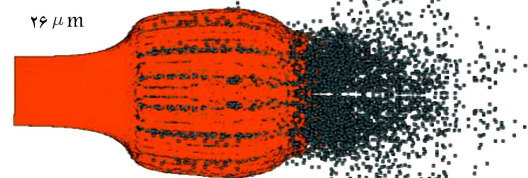
شکل ۱۸. توزیع ترکش‌ها در فضا.



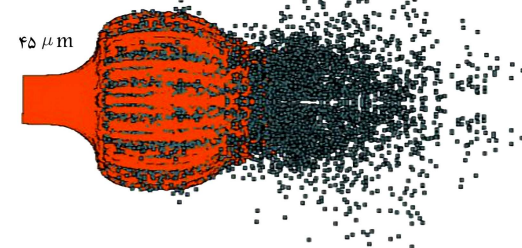
۱۲ μm



۱۸ μm



۲۶ μm



۴۵ μm

ترک‌های طولی ایجاد نشده است. پس از $18 \mu\text{s}$ ترک‌های طولی به وجود آمده و محصولات انفجار تمایل به خروج از آن‌ها دارند. سپس ترک‌ها رشد کرده و به هم می‌پیوندند و پوسته تبدیل به ترکش می‌شود. فرایند خروج گازهای منبسط از میان ترک‌ها و تشکیل ترکش به خوبی با استفاده از روش SPH مدل‌سازی شده است. اطلاع از زمان شروع ایجاد ترک‌ها و الگوی گسیختگی پوسته در برخی کاربردهای خاص که در آن‌ها لازم است پوسته‌یی در چند ده میکروثانیه منبسط شود بسیار مهم است. مزیت استفاده از این روش بی‌نیازی از تجهیزات پیشرفته مانند دوربین‌های سرعت بالا، و از سوی دیگر کاهش چشمگیر هزینه‌های مربوط به آزمایش‌هاست.

در شکل ۱۸ توزیع فضایی ترکش‌های حاصله پس از $200 \mu\text{s}$ نشان داده شده است. شکل ۱۸ الف و ب به ترتیب نشان‌گر نمای روبرو و نمای کناری این توزیع فضایی است. در شکل ۱۸ ج، قسمت مشخص شده در شکل ۱۸ ب

شکل ۱۷. شبیه‌سازی مراحل ایجاد پارگی، رشد آن و خروج محصولات انفجاری از میان ترک‌ها.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش انبساط، گسیختگی و رفتار پس از گسیختگی پوسته‌ی مسی تحت انفجار خرج میانی C_۴ با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شبیه‌سازی شد. خلاصه‌ی مهم‌ترین نتایج به دست آمده عبارت است از:

۱. پروفیل تغییرشکل انبساطی به دست آمده از شبیه‌سازی پس از $10 \mu s$ استخراج شد و با نتایج آزمایش انجام شده^[۱۳] مقایسه شد. تفاوت بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی به‌طور متوسط کم‌تر از ۸٪ بود و صحت شبیه‌سازی را تأیید کرد.
۲. با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار، انتشار و انعکاس موج انفجار در ماده منفجره، و نیز با استفاده از معادله‌ی حالت JWL با موفقیت شبیه‌سازی شد.
۳. تغییرات سرعت مطلق و مؤلفه‌های سرعت در راستای شعاعی و طولی برای نقاط مختلف در طول محور پوسته محاسبه شد و با سرعت گارنی مقایسه شد. سرعت محاسبه شده به سرعت گارنی نزدیک بود. از آنجا که معادله‌ی گارنی سرعت کل پوسته را ثابت در نظر می‌گیرد مزیت عمده‌ی شبیه‌سازی با این روش، برآورد دقیق‌تر توزیع سرعت در نقاط مختلف پوسته است.
۴. تغییرات دمای ایجاد شده بر اثر کار خمیری در چهار نقطه با فواصل مساوی در راستای ضخامت پوسته اندازه‌گیری شد. بالاتر بودن دمای ایجاد شده بر روی سطح داخلی به دلیل کرنش خمیری بیشتر در آن است. همچنین برای بررسی امکان ذوب شدن ترکش‌ها، توزیع دمای ماندگار بر روی سطوح داخلی و خارجی در طول پوسته محاسبه شد.
۵. شبیه‌سازی فرایند تشکیل ترکش شامل مراحل ایجاد ترک، رشد ترک و خروج محصولات انفجاری از میان آن‌ها و در نهایت شکل‌گیری ترکش‌ها انجام شد. با استفاده از روش SPH الگوی توزیع فضایی ترکش‌ها، تعداد تقریبی، اندازه و نیز سرعت آن‌ها قابل حصول است.

بزرگ‌نمایی شده است. مشاهده می‌شود که اندازه‌ی ترکش‌های تشکیل شده در قسمت ابتدایی پوسته کوچک‌تر از قسمت‌های میانی آن است. دلیل این موضوع خروج محصولات انفجار از این قسمت و ایجاد تغییر شکل خمیری شدیدتر در آن است.

با استفاده از روش SPH الگوی توزیع فضایی ترکش‌ها، تعداد تقریبی، اندازه و نیز سرعت آن‌ها قابل دست‌یابی است. آگاهی از موارد مذکور برای طراحی سرجنگی‌های ترکشی و سازه‌های محافظ در برابر نفوذ ترکش‌ها بسیار مهم است. در روش حذف المان قانون بقای جرم به دلیل حذف المان‌های لاگراژی از دامنه‌ی حل که همزمان نماینده‌ی مواد نیز هستند نقض می‌شود. این موضوع باعث ایجاد خطای چشمگیر در خروجی‌های مورد نظر مانند سرعت ترکش‌ها و توزیع فضایی آن‌ها می‌شود.

اگرچه روش SPH قابلیت مدل‌سازی پدیده‌ی تکه‌تکه شدن و تشکیل ترکش را دارد، در برخی از مواد با محدودیت‌هایی در مدل‌سازی واقع‌گرایانه این پدیده روبه‌رو است. نمونه‌هایی از این موارد عبارت‌اند از:

۱. در این روش پدیده‌ی تکه‌تکه شدن در مواد ترد به‌درستی شبیه‌سازی نمی‌شود. چرا که در این مواد سازوکار عمده ایجاد ترکش رشد و به هم پیوستن ترک‌هاست. در حالی که در روش SPH فرایند ایجاد ترکش با افزایش کرنش خمیری مدل‌سازی می‌شود و برای شبیه‌سازی فلزات نرم مناسب است.
۲. در برخی مواد بر اثر عبور موج شوک تغییر فاز از جامد به مایع یا گاز ایجاد می‌شود. به همین دلیل الگوی توزیع ترکش‌ها تغییر می‌کند. این روش توانایی مدل‌سازی این پدیده را ندارد.
۳. در این روش مباحث مرتبط با میکروساختار فلزات که به‌طور عمده در پدیده ایجاد ترکش مؤثر است، در نظر گرفته نشده است.

پانویس‌ها

1. expanding ring technique
2. fragmentation
3. micro crack
4. shear bands
5. voids
6. PETN
7. Coupled Lagrangian-Eulerian method (CLE)
8. arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)
9. material point method (MPM)
10. smooth particle hydrodynamics method (SPH)
11. element deletion
12. cohesive elements
13. discontinuous enrichment functions
14. Abaqus
15. Ls-Dyna
16. mesh free methods
17. element free Galerkin
18. distortion
19. explicit

20. Kernel approximation
21. particle approximation
22. support domain
23. smoothing kernel function
24. Autodyn
25. Mie-Grüneisen
26. drag
27. shaped charge
28. Spall
29. bifurcation

منابع (References)

1. Hiroe, T., Matsuo, H., Fujiwara, K., Miyata, M., Matsumoto, S. and Abe, T. "Spall in metals induced by explosive shock loadings and protective measures using momentum traps", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A*, **62**, pp. 2026-2031 (1996).

2. Meyers, M.A., *Dynamic Behavior of Materials*, Wiley-Interscience, New York, pp. 311-314 (1994).
3. Lloyd, R.M., *Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design*, Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, p. 137 (1998).
4. Boslough, M.B., Assay, J.R. and Shahinpoor, M., *High-Pressure Shock Compression of Solids*, Springer-Verlag, New York, pp. 7-42 (1993).
5. Taylor, G.I., "Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end." *In: Scientific Papers of G.I. Taylor*, Cambridge University Press, **3**(30), pp. 277-286 (1963).
6. Gurney, R. "The initial velocities of fragments from bombs shells and grenades", Report No. 405, Ballistic Research Laboratory (1943).
7. Mott, N.F. "Fragmentation of shell cases", *Proc Royal Soc Lond A*, **189**, pp. 300-308 (1947).
8. Zhanga, Q., Miao, C.Q., Lina, D.C. and Bai, C.H. "Relation of fragment with air shockwave intensity for explosion in a shell", *Int J Impact Eng*, **28**, pp. 1129-1141 (2003).
9. Hiroe, T., Fujiwara, K., Hata, H. and Takahashi, H. "Deformation and fragmentation behavior of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations", *Int J Impact Eng*, **35**, pp. 1578-1586 (2008).
10. Goto, D.M., Becker, R., Orzechowski, T.J., Springer, H.K., Sunwoo, A.J. and Syn, C.K. "Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders", *Int J Impact Eng*, **35**, pp. 1547-1556 (2008).
11. Akbardoost, J. "Numerical investigation of fracture of grooved cylinder subjected to internal explosion by CLE method", *Journal of Energetic Materials*, **2**(8), pp. 57-70 (2009).
12. Ma, L., Hu, Y., Zheng, J., Deng, G. and Chen, Y. "Failure analysis for cylindrical explosion containment vessels", *Engineering Failure Analysis*, **17**, pp. 1221-1229 (2010).
13. Gold, V.M. and Baker, E.L. "A model for fracture of explosively driven metal shells", *Eng Frac Mech*, **75**, pp. 275-289 (2008).
14. Lian, Y.P., Zhang, X., Zhou, X., Ma, S. and Zhao, Y.L. "Numerical simulation of explosively driven metal by material point method", *Int J Impact Eng*, **38**, pp. 238-246 (2011).
15. Xiangshao, K., Weiguo, W., Jun, L., Liu Fang, L., Pan, C. and Ying, L. "A numerical investigation on explosive fragmentation of metal casing using Smoothed Particle Hydrodynamic method", *Materials and Design*, **51**, pp. 729-741 (2013).
16. Ooi, E.T., Yang, Z.J. and Guo, Z.Y. "Dynamic cohesive crack propagation modelling using the scaled boundary finite element method", *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, **35**, pp. 786-800 (2012).
17. Hiermaier S.J., *Structures Under Crash and Impact*, Springer, New York (2008).
18. Attaway, S.W., Heinstein, M.W. and Swegle, J.W. "Coupling of smooth particle hydrodynamics with the finite element method", *Nuclear Engineering and Design*, **150**, pp. 199-205 (1994).
19. Johnson, G.R. "Linking of lagrangean particle methods to standard finite element methods for high velocity impact computations", *Nuclear Engineering and Design*, **150**, pp. 265-274 (1994).
20. Corbett, B.M. "Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers", *Int J Impact Eng*, **33**(1-12), pp. 431-440 (2006).
21. Sauer, M. "Simulation of high velocity impact in fluid-filled containers using finite elements with adaptive coupling to smoothed particle hydrodynamics", *Int J Impact Eng*, **38**(6), pp. 511-20 (2011).
22. Jonsson, P. "Smoothed particle hydrodynamic modeling of hydraulic jumps", Master of Science Thesis, Lulea University of Technology (2010).
23. Baird J. "Explosive shocks and impedance mismatch in armatures", *Electromagnetic Phenomena*, **3**(11), pp. 405-413 (2003).
24. AUTODYN-2D and 3D v6.1 User Documentation, Horsham, United Kingdom, Century Dynamics Inc. (2005).
25. Dobratz, B.M. and Crawford, P.C., *LLNL Explosives Handbook*, UCRL-52997 Rev.2 (1985).
26. Steinberg, D.J., Cochran, S.G. and Guinan, M.W. "A constitutive model for metals applicable at high-strain rate", *J. Appl. Phys.*, **51**(3), pp. 1498-1504 (1980).
27. Steinberg, D.J., *Equation of State and Strength Properties of Selected Materials*, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) (1991).
28. Von Holle, W.G. and Trimble, J.J. "Shaped charge temperature measurement", Six Symposium on Detonation, pp. 691-699 (1976).