



تحلیل عددی نفوذ خرج گود در اهداف بتنی گسسته با استفاده از نرم افزارهای ال اس داینا و انسیس-اتوداین

حسین مهمان نواز^۱، علی رضائی^۲، غلامحسین لیاقت^۳، حمید فاضلی^۴، محسن روح بخش^۵، محمدامین نباخته^۵

- ۱- دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
- ۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
- ۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۴- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۵- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:

خرج گود
اهداف بتنی گسسته
تحلیل عددی
نرم افزار ال اس داینا
نرم افزار انسیس-اتوداین

خلاصه: یکی از روش های ایمن سازی اهداف بتنی در برابر تهدیدهای خرج گود، گسسته سازی آن ها است. هدف از این پژوهش شبیه سازی فرآیند نفوذ خرج گود در اهداف بتنی گسسته، در دو نرم افزار ال اس داینا و انسیس-اتوداین است. بدین منظور، فرآیند شبیه سازی برای یکی از نتایج تجربی موجود، انجام شده و نتایج بدست آمده در هر دو نرم افزار، در انتها نتایج دو نرم افزار در زمینه های سرعت جت، عمق نفوذ، قطر دهانه ورودی، میانی، خروجی و زمان اجرا مقایسه شده است. استفاده از روش ال-ای برای فرآیند شکل گیری جت، و مدل آر-اچ-تی برای شبیه سازی رفتار بتن در نرخ کرنش های بالا نتایج مناسبی در هر دو نرم افزار بدست داد. تفاوت های روش برهم کنش المان های لاگرانژی و اوبلری در دو نرم افزار، باعث شد تا عمق نفوذ بدست آمده در انسیس-اتوداین، از ال اس داینا کمتر و قطر دهانه های ورودی، خروجی و میانی در انسیس-اتوداین نسبت به ال اس داینا بیشتر باشد. عمق نفوذ در ال اس داینا، و قطر دهانه های ورودی، خروجی و میانی در انسیس-اتوداین به نتایج تجربی نزدیک تر بودند. شبیه سازی بتن پیوسته نیز انجام شد و مشاهده گردید که عمق نفوذ خرج گود در بتن گسسته از بتن پیوسته کمتر است. نتایج بدست آمده نشان از تطابق خوب نتایج دو نرم افزار با مقادیر تجربی دارد.

۱- مقدمه

روش های ایمن سازی اهداف بتنی، گسسته سازی آن ها است. با توجه به مورد اصابت قرار گرفتن این سازه ها، در سال های اخیر لزوم تحلیل و ایمن سازی آن ها در برابر ضربه و نفوذ مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به کم هزینه بودن شبیه سازی در نرم افزارهای کامپیوتری و کدهایی که در این زمینه توسعه داده شده، در دو دهه اخیر استفاده از شبیه سازی در کنار آزمایش های تجربی رشد قابل توجهی داشته و اکثر پژوهش های انجام شده در زمینه خرج گود، شامل شبیه سازی هستند. دو نرم افزار ال اس داینا و انسیس اتوداین رایج ترین نرم افزارهای مورد استفاده در زمینه شبیه سازی فرآیند شکل گیری و نفوذ خرج گود هستند. هدف این پژوهش نیز مقایسه بین نتایج این دو نرم افزار است. تاکنون مدل های مختلفی چون آر-اچ-تی^۱ و جانسون هولمکوئست برای شبیه سازی رفتار بتن در نرخ کرنش بالا ارائه شده که هر یک نتایج قابل قبولی در مطالعات

یک محفظه پر شده از ماده منفجره با شکل مخروطی در یک انتهای و یک چاشنی در انتهای دیگر آن، خرج گود نامیده می شود. خرج گودها قابلیت نفوذ بسیار بالایی داشته و نسبت نفوذ به تخریب آن ها قابل توجه است. خرج گودها دارای کاربردهای وسیعی در صنایع نظامی و غیرنظامی هستند. در کاربردهای غیرنظامی برای حفاری، و در کاربردهای نظامی در برابر سازه های امن و انواع مختلف زره مورد استفاده قرار می گیرند. تحلیل مسائل شکل گیری و نفوذ پرتابه های حاصل از خرج گود دارای پیچیدگی زیادی است که انفجار ماده منفجره، انتشار موج شوک درون ماده منفجره و اصابت به آستری، تغییر فرم و شکل گیری آستری و در پایان، اصابت آن به سطح هدف و نفوذ در آن تا توقف کامل را شامل می شود. از بتن به شکل گسترده در ساخت سازه های امن استفاده می شود. یکی از



مختلف نشان داده‌اند.

رسنیاسکی و همکاران [۱] در پژوهش خود به مقایسه نتایج تجربی با مدل‌سازی نفوذ خرج گود در بتن در ال‌اس‌داین‌ا پرده‌ها. آن‌ها اثرات ارتفاع ماده منفجره، زاویه آستری و فاصله توقف را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند، بعد از برخورد جت با هدف بتنی که در پوسته‌ای از فولاد قرار داشت، یک خرابی بزرگ در جلو و یک خرابی بزرگ در پشت هدف ایجاد و یک سوراخ سرتاسری نیز ایجاد می‌شد. بررسی‌ها نشان می‌داد که خصوصیات این سوراخ سرتاسری بیشترین تطابق را با نتایج تجربی داشت.

فنگ هو و همکاران [۲] نیز نتایج شبیه‌سازی با ال‌اس‌داین‌ا را با نتایج ۴ مقاله تجربی دیگر مقایسه کرده و در نهایت به بررسی چند پارامتر پرداخته‌اند. آن‌ها برای شبیه‌سازی بتن از مدل جانسون هولمکوئست و از المان‌های آ-ال-ای^۱ استفاده کرده و مشاهده کردند نتایج نرم‌افزار با نتایج تجربی تطابق نسبتاً خوبی دارند.

ژنگو و همکاران [۳] نیز به بررسی دو مدل بتن برای شبیه‌سازی بارگذاری با نرخ کرنش بالا در دو نرم‌افزار انسیس اتوداین و ال‌اس‌داین‌ا پرداختند. آن‌ها مدل آر-اچ-تی در نرم‌افزار انسیس اتوداین را با مدل آسیب بتون^۲ در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها با ارائه‌ی یک اصلاحیه برای مدل آر-اچ-تی در نرم‌افزار انسیس اتوداین، نشان دادند که این مدل اصلاح‌شده بهترین قابلیت را برای پیش‌بینی رفتار بتن در بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا دارد.

دشتیان گرامی و همکاران [۴] به شبیه‌سازی نفوذ پرتابه‌ی دو مرحله‌ای در بتن با نرم‌افزار انسیس اتوداین پرداختند که مرحله اول این پرتابه شامل یک خرج گود پیشرو با آستری مسی و هندسه مخروطی بود. آن‌ها برای مدل‌سازی بتن از مدل جانسون هولمکوئست استفاده کرده و تطابق خوبی با نتایج تجربی بدست آوردند.

فرآیند تشکیل جت حاصل از خرج گود، یک فرآیند پیچیده در نرخ کرنش بسیار بالا است که تئوری آن برای اولین بار توسط بیرخوف و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفت. در این تئوری، فرض بر این است که موج انفجار، فشار بسیار زیادی تولید می‌کند به صورتی که استحکام آستری در برابر آن قابل صرف‌نظر بوده و آستری به صورت یک سیال غیر ویسکوز و غیر قابل تراکم در نظر گرفته می‌شود.

در فرآیند نفوذ نیز مقاومت هدف در برابر نفوذ، به نیروهای اینرسی وابسته بوده و از اثرات مقاومت، لزجت و تراکم‌پذیری صرف‌نظر می‌شود. بر

1 ALE
2 Concrete damage model

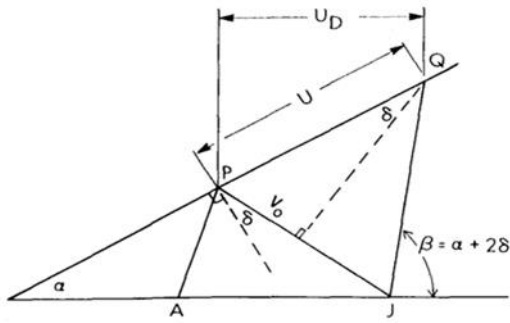
اساس این تئوری آزمایش‌های بسیاری انجام شده و نتایج نسبتاً قابل قبولی بدست آمده‌است [۸-۶]. اختلافات موجود در نتایج نیز به وسیله برهم‌کنش جت با دیواره‌های هدف توجیه شده‌است. زیرا این برهم‌کنش، در این تئوری نادیده گرفته شده و از آن صرف‌نظر می‌شود [۹ و ۱۰].

در تحلیل فرآیند نفوذ خرج گود در هدف، از تئوری هیدرودینامیک استفاده می‌شود. عمق نفوذ بدست‌آمده از این تئوری غالباً بیشتر از مقادیر تجربی است. محققان یکی از دلایل این مسئله را متوقف‌شدن فرآیند نفوذ در هدف بعد از رسیدن به سرعت مشخصی می‌دانند و این سرعت را، سرعت قطع نفوذ نامیده‌اند [۱۱]. برای بدست‌آوردن نتایج قابل قبول در شبیه‌سازی فرآیند نفوذ خرج گود در هدف، در نظر گرفتن سرعت قطع نفوذ نیز دارای اهمیت است.

زلاتین و همکاران [۱۲] و کوژشکو و همکاران [۱۳] به بررسی محدودیت‌های تئوری هیدرودینامیک پرداختند. بر اساس پژوهش‌های آن‌ها، هر تئوری که بر این اساس شکل بگیرد تا زمانی معتبر خواهد بود که سرعت نفوذ در محدوده مشخصی قرار بگیرد. محدوده بالایی یک سرعت فراصوت نفوذ است که در آن اثرات تراکم‌پذیری غیر قابل صرف‌نظر هستند. محدوده پایین سرعت نیز، سرعتی است که در آن نیروهای ناشی از اینرسی با نیروهای استحکام هدف قابل مقایسه بوده و دیگر نمی‌توان از استحکام ماده صرف‌نظر کرد.

دی پرسبو و همکاران [۱۱] برای اولین بار به توسعه یک رابطه‌ی تجربی برای سرعت قطع نفوذ پرداختند. سپس هاناکاک [۱۴] با تکمیل این رابطه اثرات سرعت‌های جانبی را لحاظ نمود. علاوه بر روابط تجربی، روابط هندسی نیز برای تخمین سرعت قطع نفوذ توسعه داده شده‌است که در آن‌ها یک توزیع یکنواخت برای سرعت‌های جانبی جت در طول در نظر گرفته می‌شود [۱۶ و ۱۵] هرچند که این فرض نیز کاملاً صحیح نیست.

در پژوهش‌های قبلی انجام‌شده توسط نگارندگان این مقاله [۱۷-۱۹]، شبیه‌سازی نفوذ خرج گود در اهداف فولادی پیوسته، فولادی گسسته و بتنی پیوسته در نرم‌افزار انسیس اتوداین انجام شده‌است. با توجه به اهمیت سازه‌های بتنی گسسته، در این پژوهش این نوع اهداف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اگرچه در برخی مسائل با نرخ کرنش بالا بین دو نرم‌افزار ال‌اس‌داین و انسیس اتوداین مقایسه انجام شده [۳]، ولی تاکنون بین دو نرم‌افزار در فرآیند نفوذ خرج گود مقایسه‌ای صورت نگرفته‌است. با توجه به نقش شبیه‌سازی در فرآیند طراحی خرج گود و سازه‌های مقاوم، نتایج این مقایسه می‌تواند حائز اهمیت باشد. هدف از این پژوهش مقایسه نتایج شبیه‌سازی فرآیند نفوذ خرج



شکل ۱. مدل هندسی فرآیند تشکیل جت [۲۰]

Fig. 1. Geometrical model of jet formation [20]

$$\sin \delta = \frac{V_0 \cos \varepsilon(x)}{2U_D} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، U_D سرعت انفجار ماده منفجره و $\varepsilon(x)$ زاویه بین شعاع حامل موج انفجار و سطح آستری است که روی سطح آستری محاسبه می‌شود. همچنین در این حالت با فرض ثابت بودن مقدار V_0 داریم: $\beta = \alpha + 2\delta$ و از آن، رابطه (۲) به شکل رابطه (۳) درمی‌آید:

$$V_j = \frac{V_0}{\sin \frac{\beta}{2}} \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (3)$$

۲-۲- مدل نفوذ هیدرودینامیکی

برای محاسبه مقدار عمق نفوذ می‌توان از مدل هیدرودینامیکی استفاده نمود. در این مدل در اثر سرعت و فشار بسیار زیاد جت هنگام برخورد با هدف، که از تنش تسلیم ماده هدف به مراتب بالاتر است، می‌توان از استحکام و لزجت هدف و جت صرف‌نظر نمود. با این فرضیات می‌توان معادله برنولی را مورد استفاده قرارداد و در نهایت به رابطه (۴) رسید [۲۳].

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، L طول جت، ρ_j چگالی ماده جت و ρ_t چگالی ماده

گود در اهداف بتنی گسسته در دو نرم‌افزار ال‌اس‌داینا و انسیس اتوداین است. بدین منظور شبیه‌سازی با توجه به نتایج تجربی پژوهش وانگ و همکاران [۲۰]، انجام شده و سپس با در نظر گرفتن روابط موجود برای سرعت قطع، پارامترهای مهم در بررسی فرآیند نفوذ خرج گود شامل عمق نفوذ، قطر دهانه و سرعت نوک جت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

تاکنون در چند پژوهش، اثر گسسته‌سازی بتن مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که اهداف گسسته عمق نفوذ کمتری در مقایسه با اهداف پیوسته دارند [۲۱ و ۲۲]. ولی سرعت پرتابه در این پژوهش‌ها در حدود ۳۰۰ m/s بوده و بر روی خرج گود پژوهش‌های محدودی صورت گرفته‌است. در این پژوهش، به منظور بررسی اثر گسسته‌سازی بتن در افزایش مقاومت هدف در برابر نفوذ، بتن پیوسته در دو نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است.

۲- تئوری

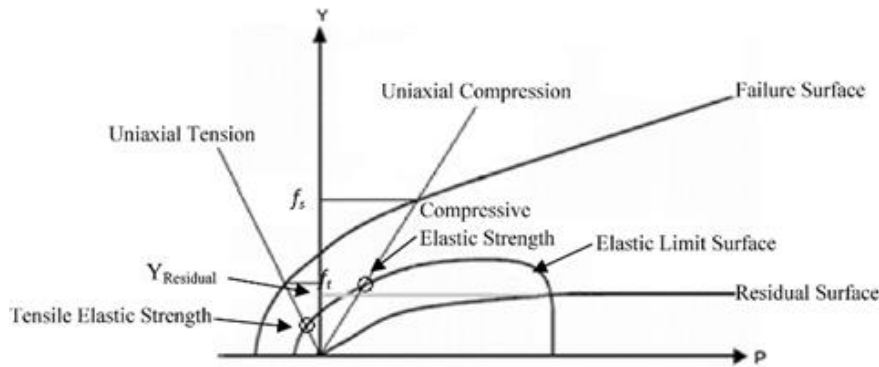
در این قسمت از پژوهش به معرفی برخی تئوری‌های پایه‌ای و کاربردی در زمینه فرآیند شکل‌گیری و نفوذ خرج گود که در این مقاله استفاده شده، پرداخته می‌شود. مفاهیمی چون تشکیل جت، نفوذ هیدرودینامیکی، مدل بتن آر-چ-تی و سرعت قطع نفوذ در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- مدل تشکیل جت

برای بررسی تحلیلی فرآیند تشکیل جت، تئوری‌های مختلفی وجود دارد. تئوری تعمیم‌یافته پر، پرکاربردترین تئوری در این زمینه محسوب می‌شود. در تئوری پر، موج انفجار به صورت صفحه‌ای در نظر گرفته شده و در مدل اصلاح شده آن، اثرات شروع نقطه انفجار نیز در نظر گرفته شده‌است. هندسه حاکم بر این مدل‌سازی در شکل ۱ آمده است. سرعت جت در مدل پر، طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۳].

$$V_j = \frac{V_0}{\sin \frac{\beta}{2}} \cos \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V_0 سرعت فروپاشی، α زاویه بین مماس بر آستری و محور تقارن، β زاویه بین امتداد فروپاشی دیواره آستری و محور تقارن است. همچنین δ زاویه تیلور نامیده می‌شود که در مدل تعمیم‌یافته پر با استفاده از رابطه (۲) بیان می‌شود.



شکل ۲. سطوح تعریف شده در مدل آر-اچ-تی [۲۶]

Fig. 2. RHT model surfaces [26]

که در آن Y_{TXC} یک تابع مورد استفاده برای بیان فشار هیدرو استاتیکی و وابسته به نصف النهار فشاری است. F_{rate} تابعی از نرخ کرنش و نمایانگر ضریب افزایش دینامیکی است. $R_3(\theta)$ نیز سومین ثابت مقطع انحرافی است. طبق شکل ۲ با افزایش بارگذاری بر روی بتن، تا زمانی که این مقدار از تنش تسلیم اولیه کمتر باشد، کرنش الاستیک و به شکل خطی خواهد بود. با گذر از تنش تسلیم، کرنش پلاستیک آغاز می شود. در این بخش نیز با وجود رفتارهای غیرخطی بتن، با استفاده از یک خط با شیب کمتر از بخش الاستیک، رفتار بتن پیش بینی می شود. سرانجام با رسیدن مقدار تنش به سطح شکست، مقدار آن تا سطح تنش باقیمانده، کاهش می یابد. این در حالی است که مقدار کرنش همچنان در حال افزایش است [۲۷].

۲-۴ - سرعت قطع نفوذ

سرعت قطع نفوذ، سرعت جت در لحظه ای است که دیگر قابلیت نفوذ در هدف را از دست داده است. محاسبه سرعت قطع نفوذ برای صحت سنجی محاسبه با حل گرهای عددی اهمیت بسزایی دارد. زیرا با استفاده از سرعت قطع نفوذ می توان میزان نهایی عمق نفوذ را اندازه گیری کرد. هریسون [۲۸] عمق نفوذ را بر اساس رابطه ی (۷)، وابسته به سرعت قطع نفوذ به دست آورده است. سرعت قطع نفوذ در خرج گود به متغیرهایی مثل چگالی آستری و هدف، فاصله قرار، عمق نفوذ و یکپارچگی جت در طول نفوذ بستگی دارد. در این رابطه، جت در تمام فرآیند نفوذ پیوسته در نظر گرفته شده است:

هدف است. همچنین مدل توسعه یافته آن به شکل رابطه (۵) ارائه شده که در این رابطه L عددی بین ۱ تا ۲ در نظر گرفته می شود.

$$P = L \sqrt{l \frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (5)$$

اگر جت به شکل پیوسته نفوذ کند مقدار L ، ۱ و اگر کاملاً از هم گسیخته شده باشد مقدار آن ۲ خواهد بود. در حالت های بینابینی هم از مقادیر بین ۱ تا ۲ استفاده می شود.

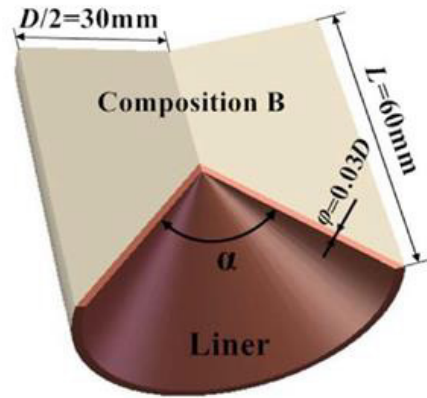
۲-۳ - مدل بتن آر-اچ-تی

مدل آر-اچ-تی [۲۴]، مدل پلاستیسیته پیشرفته ای است که به وسیله ی ریدل^۱ توسعه داده شده است [۲۵]. این مدل برای شبیه سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته اند بسیار کارآمد است. این مدل شامل سه سطح وابسته به فشار است، که عبارتند از: سطح حد الاستیک y_{el} ، سطح گسیختگی y_{fail} و سطح مقاومت پسماند y_{fric} که در شکل ۲ نشان داده شده اند. معادله سطح گسیختگی در مدل آر-اچ-تی با رابطه ی (۶) تعریف می شود:

$$y_{fail} = y_{TXC}(p) R_3(\theta) F_{rate}(\varepsilon) \quad (6)$$

1 . Riedel

با توجه به وجود تقارن محوری در هندسه ی خرج گود و هدف، مسئله به صورت دوبعدی با تقارن محوری مدل شده تا در حجم محاسبات و زمان اجرای مدل کاهش قابل توجهی صورت پذیرد. هم چنین برای شبیه سازی ماده منفجره، آستری و هوا از المان های آل-ای استفاده شده است. مزیت استفاده از المان آل-ای نسبت به المان های اویلری، تغییر شکل یافتن المان ها است که باعث کاهش جابجایی ماده و زمان حل مسئله می شود [۲۹]. المان های هدف بتنی نیز به صورت لاگرانژی تعریف شده اند که در بخش ۲-۳ نحوه برهم کنش المان های لاگرانژی و آل-ای در شبیه سازی انجام شده، بیشتر توضیح داده شده است.



شکل ۳. ابعاد خرج گود شبیه سازی شده [۲۰]

Fig. 3. Dimensions of shaped charge [20]

۳-۱- هندسه مدل

هندسه به کاررفته در این پژوهش، مشابه هندسه پژوهش وانگ و همکاران [۲۰] است. زیرا از نتایج تجربی بدست آمده در این پژوهش برای صحت سنجی شبیه سازی استفاده شده است. شکل ۳ ابعاد خرج گود شبیه سازی شده را نشان می دهد.

قطر خرج گود برابر با ۶۰ میلی متر و فاصله قرار نیز دو برابر قطر ماده منفجره یعنی ۱۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. زاویه رأس مخروط (α) برابر ۶۰ درجه است. اهداف بتنی نیز شش لایه با ضخامت ۱۰۰ میلی متر هستند که در فاصله ی ۵۰ میلی متری از هم قرار گرفته اند.

مدل سازی در نرم افزار انسیس اتوداین، شامل دو قسمت تشکیل جت و فرآیند نفوذ بوده است؛ یعنی در هر یک از آن ها ابتدا مدل سازی و اجرای حل عددی برای تشکیل جت انجام شده و سپس نتایج، در بخش مدل سازی نفوذ نگاشت شده است. یکی از موارد مهم در اجرای حل عددی، مدت زمان لازم برای اجرای حل است. در جهت کاهش آن بعد از اینکه جت تشکیل شد، همه مواد جز مواد آستری حذف می شود. معیار مناسب برای حذف به موقع مواد، زمانی است که آستری، انرژی لازم را از ماده منفجره کسب کرده باشد [۳۰]. بنابراین با قراردادن تعدادی اندازه گیر متحرک روی آستری و بررسی نمودار سرعت بر حسب زمان، به محض اینکه سرعت اندازه گیرها ثابت شد، می توان مواد پوسته، ماده منفجره و نگه دارنده ماده منفجره را حذف کرد. شکل ۴ مدل ایجاد شده برای تشکیل جت و شکل ۵ مدل ایجاد شده برای نفوذ در بتن در نرم افزار انسیس اتوداین را نشان می دهد.

در ال اس داین بر خلاف انسیس اتوداین، نیازی به تفکیک مراحل

شبیه سازی نبوده و فرآیند تشکیل جت و نفوذ در هدف، در یک مدل انجام

$$P_{\max} = Z_0 \left[\left(\frac{V_{j0}}{V_{\min}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} - 1 \right] \quad (7)$$

در این رابطه P مقدار نهایی عمق نفوذ، Z_0 فاصله قرار بعلاوه فاصله ارتفاع مخروط آستری، V_{j0} سرعت نوک جت در فاصله قرار و V_{\min} سرعت قطع نفوذ است. همچنین γ از رابطه (۸) محاسبه می شود.

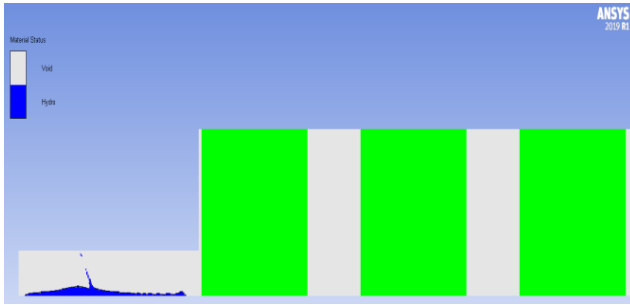
$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_j}} \quad (8)$$

اگر رابطه ی (۷) بر اساس سرعت قطع نفوذ حل شود به رابطه ی (۹) تبدیل می شود.

$$V_{\min} = V_{j0} \left(\frac{Z_0}{P_{\max} + Z_0} \right)^{\gamma} \quad (9)$$

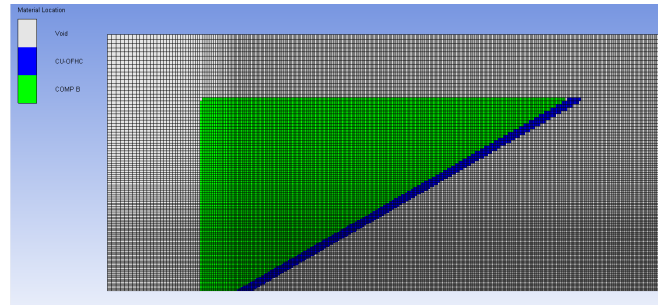
۳- شبیه سازی

فرآیند شبیه سازی نفوذ خرج گود در بتن در این پژوهش، در دو نرم افزار ال اس داین و انسیس اتوداین انجام شده که از نرم افزارهای متداول حوزه شکل گیری با نرخ کرنش بالا محسوب می شوند.



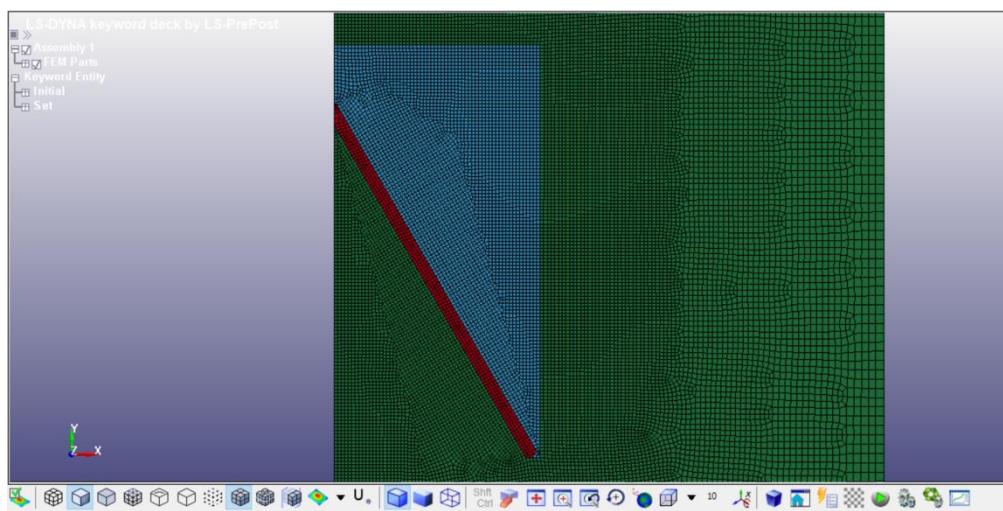
شکل ۵. مدل ایجادشده برای نفوذ در بتن در نرم‌افزار انسیس اتوداین

Fig. 5. Ansys Autodyn penetration model



شکل ۴. مدل ایجادشده برای تشکیل جت در انسیس اتوداین

Fig. 4. Ansys Autodyn jet model



شکل ۶. مدل آستری و ماده منفجره ایجادشده در نرم‌افزار ال اس داینا

Fig. 6. Ls-Dyna jet model

بتنی از مدل آر-اچ-تی و برای هوا نیز از مدل وکیوم^۳ استفاده شده است. در انسیس اتوداین نیز شرایط مشابه ال‌اس‌داینا در نظر گرفته شده با این تفاوت که مدل مقاومتی آستری مسی، استینبرگ-گینان است. این انتخاب با توجه به کتابخانه انسیس اتوداین بوده و نتایج آن تطابق مناسبی با مدل جانسون-کوک در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا دارد. جدول ۱ مدل مقاومتی و معادله حالت در نظر گرفته شده برای اجزاء مختلف خرج گود در دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد. ضرایب پارامترهای مدل مقاومتی و معادله حالت هر یک از مواد در جدول ۷ تا جدول ۱۳ در پیوست آورده شده است.

۳-۳- برهم‌کنش المان‌های لاگرانژی و اوپلری

در ال‌اس‌داینا برای ایجاد برهم‌کنش بین المان‌های لاگرانژی و اوپلری

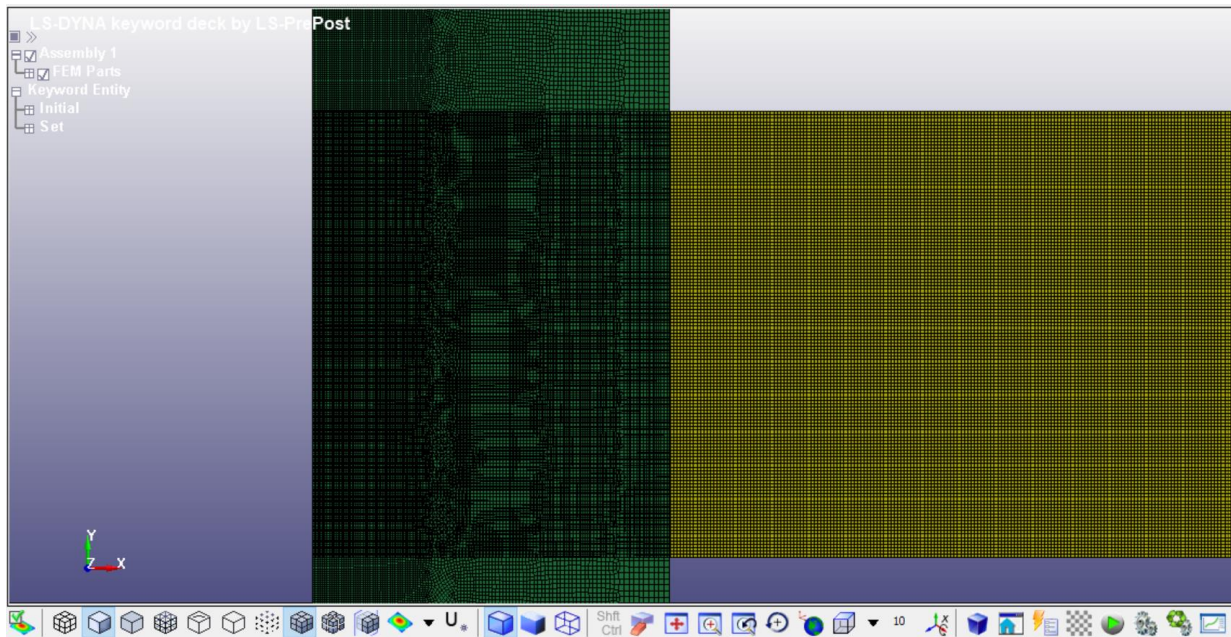
3 Vacuum

می‌شوند. همچنین قابلیت حذف مواد آستری در ال‌اس‌داینا بعد از تشکیل کامل جت وجود ندارد. شکل ۶ مدل آستری و شکل ۷ مدل اهداف بتنی گسسته ایجادشده در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا را نشان می‌دهد.

۳-۲- مدل مواد

در آزمایش‌های انجام‌شده توسط وانگ و همکاران، جنس آستری از مس، ماده منفجره از ترکیب بی و هدف از بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال بوده است [۲۰]. در ال‌اس‌داینا، برای آستری مسی مدل مقاومتی جانسون-کوک به همراه معادله حالت شوک، برای ماده منفجره ترکیب بی، مدل سوزش مواد پر انرژی^۱ و معادله حالت جی-دابلیو-ال^۲، برای هدف

- 1 high explosive burn
- 2 JWL



شکل ۷. مدل اهداف بتنی گسسته در نرم افزار ال اس داینا

Fig. 7. Ls-Dyna target model

جدول ۱. مدل مقاومتی و معادله حالت در نظر گرفته شده برای اجزاء مختلف خرج گود در دو نرم افزار

Table 1. Shaped charge parts strength model and equation of states

مدل مقاومت		معادله حالت		جنس ماده	جزء
انسیس اتوداین	ال اس داینا	انسیس اتوداین	ال اس داینا	مس	آستری
استینبرگ-گینان	جانسون-کوک	شوگ	شوگ	فولاد	پوسته
جانسون-کوک	جانسون-کوک	شوگ	شوگ	ترکیب بی	ماده منفجره
ندارد	سوزش مواد پر انرژی	جی-دابلو-ال	جی-دابلو-ال	بتن	هدف
آر-اچ-تی	آر-اچ-تی	P- α	P- α		

حجمی برای فعال شدن این دستور ۰/۲ و ضریب فنریت تعریف شده بین المان‌های لاگرانژی و اوپلری نیز برابر ۰/۲ است. همچنین برای جلوگیری از به وجود آمدن نشتی بین المان‌های لاگرانژی و اوپلری دستور آی-ال-ای-آ-کی^۵ فعال شده و مقدار پی-ال-ای-آ-کی^۶ نیز برابر ۰/۲ قرار داده شده است. در انسیس اتوداین نیز برای هماهنگ سازی و تبادل اطلاعات در نقاط مرزی از مدل کوپلینگ خودکار فعال استفاده شده است. همچنین لازم است

- 5 ILEAK
- 6 PLEAK

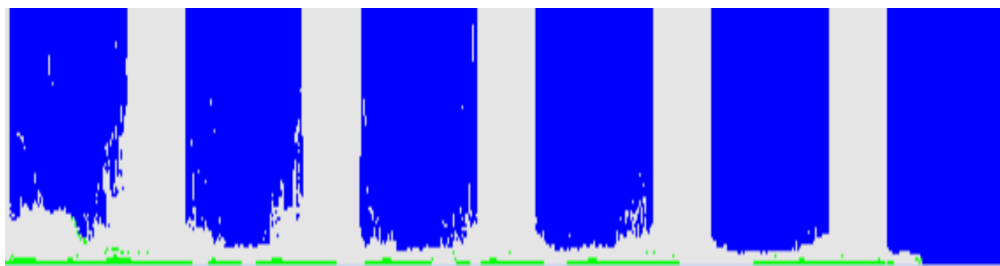
از دستور کانستریند_لگرانج_این_سالیده^۱ استفاده شده است. پارامترهای این دستور، تأثیر قابل توجهی بر فرآیند نفوذ خرج گود دارند. در این دستور مقدار پارامتر سی تایپ^۲ برابر ۵ قرار داده شده است تا امکان ایجاد حذف المان‌ها در هدف وجود داشته باشد. پارامترهای اف-آر-سی-ام-آی-ان^۳ و پی-اف-آ-سی^۴ نیز برابر ۰/۲ قرار داده شده است. بدین معنا که کمترین مقدار تداخل

- 1 Constrained_Lagrange_in_Solid
- 2 CTYPE
- 3 FRCMIN
- 4 PFAC

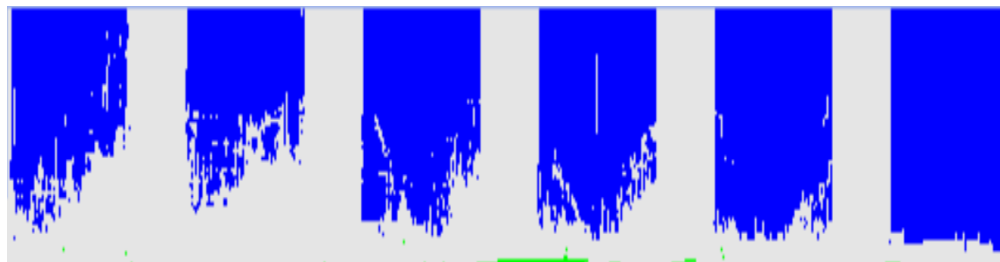
جدول ۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با شبکه‌بندی‌های متفاوت

Table 2. Effect of mesh size on results

عمق نفوذ (mm)			شعاع دهانه (mm)					متغیر
خروجی لایه ۲	خروجی لایه ۱	ورودی لایه ۱	خروجی لایه ۲	ورودی لایه ۲	خروجی لایه ۱	میانی لایه ۱	ورودی لایه ۱	
۴۸	۶۰	۳۵	۱۳۵	۳۵	۲۱۵	۵۵	۱۸۰	مقدار آزمایشگاهی
۳۵	۳۹	۳۴	۱۴۸	۴۰	۱۸۲	۴۴	۱۴۳	شبیه‌سازی عددی با شبکه‌بندی بزرگ‌تر
۵۵	۴۰	۳۰	۱۴۵	۱۱۶	۲۲۰	۷۰	۱۵۵	شبیه‌سازی عددی با شبکه‌سازی کوچک‌تر



(الف)



(ب)

شکل ۸. کیفیت تخریب اهداف در دو شبکه‌بندی بزرگ (الف) و کوچک (ب)

Fig. 6. Target destruction in two mesh sizes

در شبکه‌بندی کوچک‌تر این مقدار برابر ۵/۰ mm در نظر گرفته شده‌است. همچنین قطر اهداف بتنی استوانه‌ای ۲۲۰ mm در نظر گرفته شده‌است. جدول ۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با شبکه‌بندی‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

کیفیت تخریب اهداف در دو شبکه‌بندی مختلف در شکل ۸ مقایسه شده‌است. با توجه به نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی در شبکه‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر و ضمناً کاهش بسیار زیاد مدت‌زمان حل، از حدود ۴۰ روز به ۸ ساعت، شبیه‌سازی خرج گود با شبکه‌بندی بزرگ‌تر انتخاب شد. بر خلاف انسیس اتوداین که در آن زمان حل قابل توجه می‌باشد، در ال اس داینما زمان

برای شبیه‌سازی نفوذ در بتن، دستور جلوگیری از فرسایش سلول‌های تحلیل‌رفته^۱ فعال شود تا از اعوجاج المان‌ها جلوگیری شود.

۳-۴- شبکه‌بندی و همگرایی نتایج

با توجه به طولانی بودن مدت‌زمان حل در انسیس اتوداین، بررسی تاثیر اندازه شبکه‌بندی بر روی نتایج و مدت زمان حل در دستور کار قرار گرفت. بدین منظور دو اندازه مختلف برای شبکه‌بندی در نظر گرفته شد که در در شبکه‌بندی بزرگ‌تر اندازه طول سلول‌ها در راستای حرکت جت ۱ mm و

1 prevent erosion of degenerate cells



شکل ۱۰. دهانه نفوذ در هدف اول [۲۰]

Fig. 10. Hole crater of the first target [20]



شکل ۹. چیدمان آزمون تجربی [۲۰]

Fig. 9. Setup of the test [20]

۴-۱- سرعت نوک جت

با بهره‌گیری از رابطه (۳) و تئوری پر برای محاسبه سرعت نوک جت به روش تحلیلی، سرعت 5400 m/s برای خرج گود مورد پژوهش بدست‌آمد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سرعت نوک جت در شبیه‌سازی انسیس اتوداین و ال اس داینا، بسیار نزدیک هم بوده و به مقدار بدست‌آمده از رابطه تحلیلی نزدیک هستند. یکی از دلایل اختلاف نتایج شبیه‌سازی با نتیجه تجربی، وجود خطا در اندازه‌گیری‌های تجربی است. برای مثال سرعت نوک جت برای هدف پیوسته با شرایط کاملاً مشابه ۷۱۴۰ گزارش شده که در مقایسه با نتیجه تحلیلی بدست‌آمده، واقعی‌تر به نظر می‌رسد. این خطا در سایر آزمون‌های این پژوهش هم مشاهده می‌شود و می‌تواند مربوط به خطا در ساخت نمونه‌ها و یا اندازه‌گیری باشد. هم‌چنین در پژوهش وانگ، مشخصات پوسته به‌کاررفته گزارش نشده و در شبیه‌سازی نیز خرج گود بدون پوسته مدل‌سازی شده‌است. در صورتی که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پوسته می‌تواند تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه سرعت نوک جت را افزایش دهد. علاوه بر سرعت نوک جت، نتایج بدست‌آمده از ال اس داینا و انسیس اتوداین در توزیع سرعت در طول جت نیز تطابق مناسبی دارند که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

۴-۲- عمق نفوذ

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، عمق نفوذ بدست‌آمده در ال اس داینا، بیشتر از عمق نفوذ بدست‌آمده در انسیس اتوداین است. در واقع در هر لحظه از فرآیند نفوذ، سرعت جت ال اس داینا بیشتر از سرعت جت

حل بسیار پایین‌تر بوده و در عوض فرآیند شبکه بندی بسیار زمانبر است. لذا در ال اس داینا سائز شبکه بندی کوچکتر $5/0$ میلی متر انتخاب شد که در مسائل مشابه حل شده توسط نویسندگان نیز نتایج قابل قبولی بدست‌آمده‌بود.

۴- نتایج و بحث

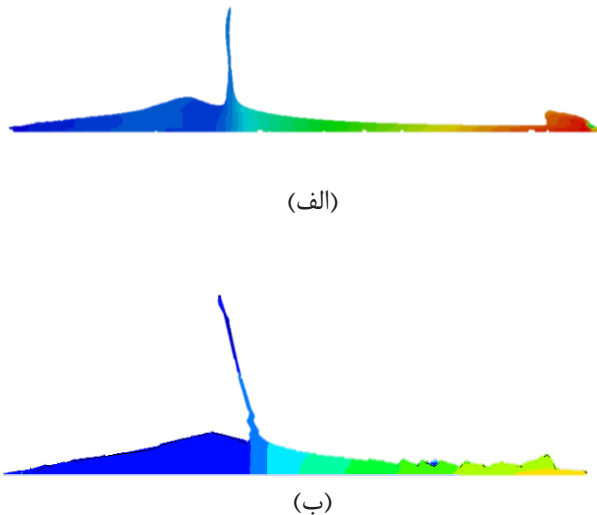
در پژوهش‌های قبلی توسط نگارندگان این مقاله [۱۷-۱۹]، صحت‌سنجی نفوذ خرج گود در اهداف فولادی در نرم‌افزار انسیس اتوداین انجام شده‌است. با این حال، فرآیند نفوذ برای شرایط این پژوهش علاوه بر ال اس داینا، برای نرم‌افزار انسیس اتوداین نیز تکرار شده‌است. در ادامه ابتدا فرآیند صحت‌سنجی انجام شده برای هر دو نرم‌افزار توضیح داده شده و پس از آن بین نتایج بدست‌آمده در دو نرم‌افزار مقایسه صورت خواهد گرفت.

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده در دو نرم‌افزار ال اس داینا و انسیس اتوداین از نتایج تجربی پژوهش وانگ و همکاران [۲۰] استفاده شده‌است. شکل ۹ چیدمان آزمون تجربی وانگ و شکل ۱۰ دهانه نفوذ در هدف اول را نشان می‌دهد. نتایج بدست‌آمده برای سرعت نوک جت در لحظه رسیدن به هدف، قطر دهانه و عمق نفوذ استخراج شده و در جدول ۳ مقایسه شده‌است. برای محاسبه عمق نفوذ، شبیه‌سازی در لحظه رسیدن جت به سرعت قطع نفوذ متوقف شده‌است. سرعت قطع نفوذ مس در بتن با استفاده از نتایج پژوهش مورفی [۳۱]، 1430 m/s بدست آمده‌است.

جدول ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی

Table 3. Comparison of simulation and experimental results

پارامتر بدست‌آمده	سرعت نوک جت (m/s)	قطر دهانه ورودی نفوذ (mm)	عمق نفوذ (mm)
آزمایش تجربی [۲۰]	۷۴۹۴	۱۸۰	۵۳۸
شبیه‌سازی انسیس اتوداین	۵۹۱۰	۱۶۴	۴۲۰
خطای انسیس اتوداین	٪۲۱	٪۹	٪۲۲
شبیه‌سازی ال‌اس‌داینا	۶۱۰۸	۱۶۲	۴۷۰
خطای ال‌اس‌داینا	٪۱۸	٪۱۰	۱۳٪



شکل ۱۱. جت تشکیل شده و توزیع سرعت آن در (الف) ال‌اس‌داینا و (ب) انسیس اتوداین

Fig. 11. Jet velocity distribution in Ls-Dyna and Ansys Autodyn

شکل ۱۲ توزیع پارامتر آسیب بتن در ال‌اس‌داینا در هدف اول را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان بتن تخریب‌شده بر اساس پارامتر آسیب، بیش از المان‌هایی است که بر اساس میزان کرنش پلاستیک حذف شده‌اند.

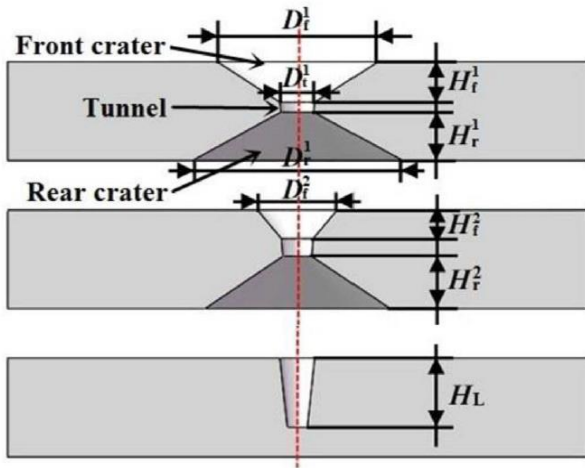
در انسیس اتوداین الگوی خرابی‌های به‌وجودآمده با ال‌اس‌داینا متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در بتن ترک‌های شعاعی ایجاد شده که الگوی آن‌ها تقریباً مشابه با ترک‌های موجود در توزیع آسیب در ال‌اس‌داینا در شکل ۱۲ است. اما پارامتر آسیب در انسیس اتوداین نتایج غیر قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی می‌دهد به طوری که بعد از نفوذ جت به هدف آخر، سه هدف اول دچار خرابی کامل شده و آسیب آن‌ها برابر ۱ می‌شود. یکی از دلایل این مسئله می‌تواند نحوه متفاوت تعریف پارامتر آسیب در انسیس اتوداین و ال‌اس‌داینا باشد. به هر ترتیب برخلاف ال‌اس‌داینا که پارامتر آسیب بهترین نتایج را برای خرابی بتن می‌دهد، در انسیس اتوداین بررسی ترک‌های شعاعی نتایج منطقی‌تری برای فروریختن بتن در قسمت‌های مختلف ارائه می‌دهد.

علاوه بر قطر دهانه ورودی که در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفت در مرجع پارامترهای دیگری نیز اهمیت دارد که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود [۲۰]. از جمله‌ی این پارامترها می‌توان به قطر میانی و قطر دهانه خروجی اشاره کرد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، انسیس اتوداین قطر دهانه میانی را ۱۵ میلی‌متر بزرگ‌تر از مقدار تجربی و ال‌اس‌داینا ۱۵

انسیس اتوداین است. یکی از دلایل این مسئله می‌تواند به تفاوت روش حل عددی به‌کاررفته در دو نرم‌افزار بازگردد. در انسیس اتوداین از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود. در این روش معمولاً از بسط تیلور برای گسسته‌سازی معادلات حاکم مشتمل بر معادلات دیفرانسیل پاره‌ای استفاده می‌شود. بنابراین، برای یک دامنه حل دوبعدی، شبکه‌ای از سلول‌ها داخل دامنه محاسباتی قرار می‌گیرد و تقریب تفاضلی برای نقاط داخلی اعمال می‌شود. ولی در روش المان محدود که در ال‌اس‌داینا مورد استفاده قرار می‌گیرد، تمام دامنه حل به قسمت‌های کوچک محدودی تقسیم شده و معادلات حاکم با رعایت شرایط مرزی حل می‌گردد. از همین رو در انسیس اتوداین و به دلیل ماهیت روش حل عددی، المان‌های بیشتری درگیر فرآیند حل می‌شوند که باعث زمان‌بر شدن حل مسئله و برهم‌کنش بیشتر المان‌ها با یکدیگر می‌شود. به همین علت مشاهده می‌شود که عمق نفوذ انسیس اتوداین نسبت به ال‌اس‌داینا کمتر و قطر دهانه‌های بدست‌آمده از آن بیشتر است.

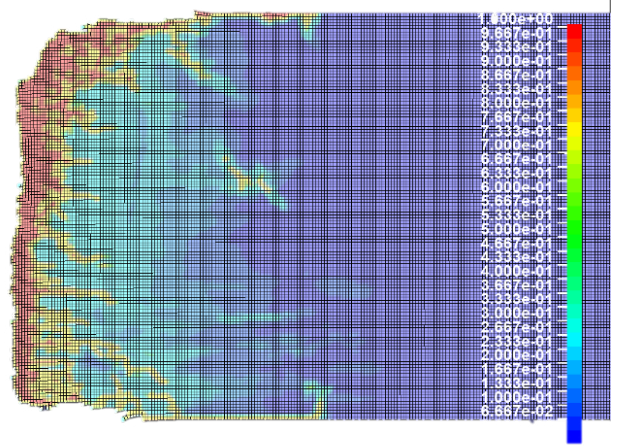
۴-۳ قطر دهانه ورودی، میانی و خروجی نفوذ

در قطر دهانه، تفاوت‌های بیشتری میان این دو نرم‌افزار مشاهده شد. در ال‌اس‌داینا از پارامتر آسیب برای بدست‌آوردن قطر دهانه نفوذ استفاده شده‌است. این پارامتر که برای بررسی خرابی و ریزش بتن کاربرد دارد، علاوه بر مدل بتن آر-اچ-تی، در سایر مدل‌های ارائه‌شده برای بتن نیز دیده می‌شود. مقدار این پارامتر بین ۰ و ۱ بوده و هنگامی که مقدار پارامتر آسیب در یک نقطه به ۱ می‌رسد، آن نقطه دچار خرابی کامل شده و فرو می‌ریزد.



شکل ۱۴. پارامترهای حائز اهمیت در نفوذ شامل قطر دهانه ورودی، میانی و خروجی [۲۰]

Fig. 14. Penetration parameters including crater diameters [20]



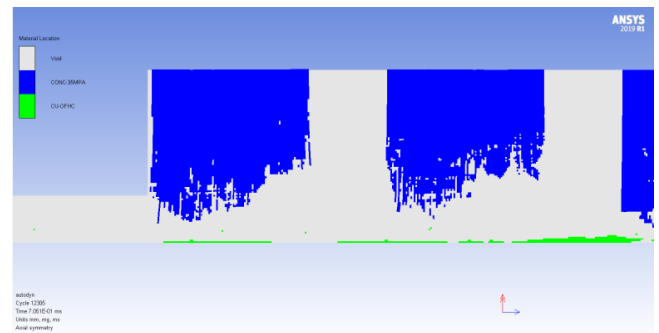
شکل ۱۲. توزیع پارامتر آسیب بتن در ال اس داینا در هدف اول

Fig. 12. Concrete damage parameter distribution in Ls-Dyna

جدول ۴. مقایسه قطر میانی و خروجی هدف اول

Table 4. Comparison of middle and exit crater in first target

تجربی [۲۰]	انسیس اتوداین	ال اس داینا	پارامتر
۵۵	۷۰	۴۰	قطر دهانه میانی هدف اول (mm)
۲۱۵	۱۸۰	۱۶۲	قطر دهانه خروجی هدف اول (mm)



شکل ۱۳. نفوذ و قطر دهانه‌های هدف اول و دوم در انسیس اتوداین

Fig. 13. Penetration and crater diameter of first two targets in Ansys autodyn

۴-۴- شبکه‌بندی و زمان اجرا

از دیگر تفاوت‌های موجود بین ال اس داینا و انسیس اتوداین می‌توان به تفاوت‌های موجود در زمان اجرا، شبکه‌بندی، قابلیت‌های آماده‌سازی مدل و مدل‌های مواد در دو نرم‌افزار اشاره کرد. روش شبکه‌بندی در دو نرم‌افزار ال اس داینا و انسیس اتوداین یکسان نیست. در انسیس اتوداین فضای حل مسئله به صورت یکجا شبکه‌بندی می‌شود و مواد در مرزهای ایجادشده توسط هندسه‌ی مدل قرار می‌گیرند اما در ال اس داینا این قابلیت وجود دارد

میلی متر کوچک‌تر محاسبه نموده است. علت این امر می‌تواند تفاوت در برهم‌کنش بین المان‌های لاگرانژی و اویلری در دو نرم‌افزار باشد. به نظر می‌رسد انسیس اتوداین در فرآیند نفوذ جت المان‌های لاگرانژی بیشتری از هدف را با المان‌های اویلری جت درگیر می‌کند. در قطر دهانه خروجی نیز همین مسئله مشاهده می‌شود و قطر دهانه خروجی انسیس اتوداین ۲۰ میلی‌متر بزرگ‌تر از ال اس داینا بدست‌آمده است که البته با نتایج تجربی همخوانی بیشتری دارد.

جدول ۶. مقایسه نتایج بتن گسسته و پیوسته

Table 6. Comparison of discrete and uniform concrete results

پارامتر	بتن گسسته	بتن پیوسته
عمق نفوذ (mm)	۴۷۰	۵۵۰
پارامتر	ال اس داینا	انسیس اتوداین
	۴۲۰	۵۰۰

جدول ۵. مقایسه زمان اجرای شبیه‌سازی در دو نرم‌افزار

Table 5. Comparison of model run time in two softwares

پارامتر	ال اس داینا	انسیس اتوداین
تعداد المان‌ها	۵۰۷۴۸	۴۳۰۲۶
زمان اجرای شبیه‌سازی (ساعت)	۴	۱۶

دارد به صورتی که با استفاده از کتابخانه انسیس اتوداین قابلیت استفاده از برخی از مدل‌های مواد که مقادیر پارامترهای آن صحنه‌گذاری شده وجود دارد. این در حالی است که مدل‌های مواد انسیس اتوداین در مجموع بسیار کمتر از ال اس داینا است که نزدیک به ۳۰۰ مدل مواد مختلف را پیشنهاد می‌دهد. برای مثال، برای بتن در انسیس اتوداین تنها مدل‌های مواد آر-اچ-تی و دراکر پراگر موجود است. در حالی که در ال اس داینا نزدیک به ده مدل مختلف برای مدل‌سازی بتن وجود دارد.

۴-۵- مقایسه بتن گسسته و پیوسته

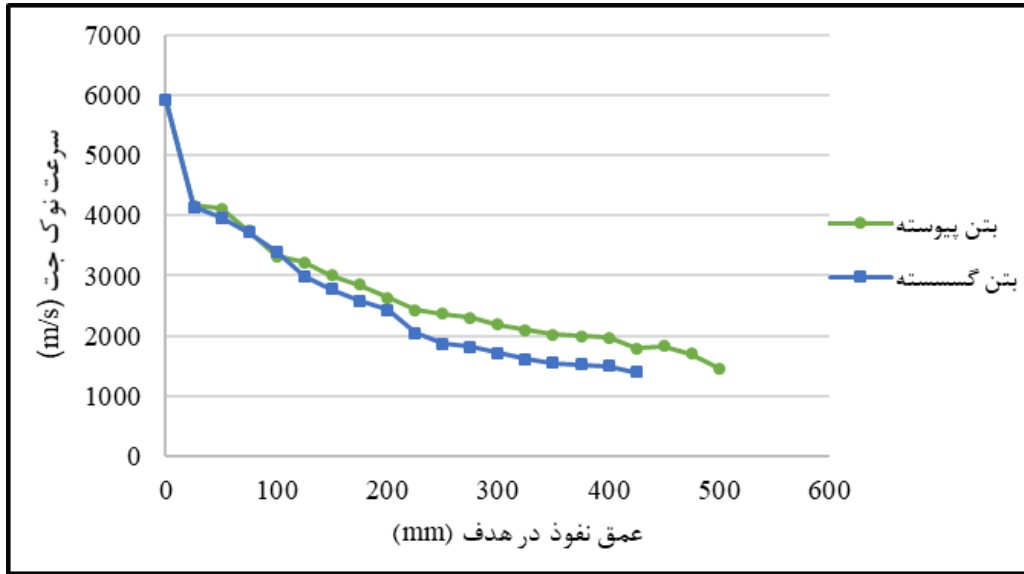
به منظور بررسی اثر گسسته‌سازی بتن در افزایش مقاومت هدف در برابر نفوذ، بتن پیوسته در ال اس داینا شبیه‌سازی شده است. نتایج مقایسه شبیه‌سازی بتن گسسته و پیوسته در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود عمق نفوذ در بتن گسسته در ال اس داینا، ۱۷ درصد و در اتوداین ۱۹ درصد کمتر از بتن پیوسته بدست آمده است.

برای بررسی بیشتر علت این پدیده، سرعت نوک جت در طول فرآیند نفوذ برای بتن گسسته و پیوسته اندازه‌گیری شده و در شکل ۱۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت جت در بتن گسسته تا انتهای هدف اول با بتن پیوسته برابر است و بعد از آن هنگام نفوذ به هدف دوم کاهش قابل توجه پیدا کرده و از سرعت جت در هدف پیوسته فاصله می‌گیرد. این پدیده برای نفوذ از هدف دوم به سوم نیز کاملاً مشهود است. یکی از دلایلی که می‌تواند باعث کاهش عمق نفوذ در اهداف گسسته باشد، حجم تخریب بیشتر در اهداف گسسته پس از خروج از هر لایه و ازدست‌رفتن بیشتر انرژی جت است. هنگام ورود و خروج جت در هدف، تخریب قابل توجهی در هدف صورت گرفته که این تخریب نیازمند صرف انرژی جت است. برای بررسی بیشتر اثر گسسته‌سازی، در پژوهش‌های آینده آرایش‌های مختلف قرارگیری اهداف با تغییر فاصله بین آن‌ها و پرکردن فضای خالی بین

که هر قسمت، جداگانه شبکه‌بندی شود. به دلیل وجود تفاوت در شبکه‌بندی، بدست‌آوردن تعداد المان‌های کاملاً یکسان در دو نرم‌افزار تقریباً غیرممکن است. با این حال برای مقایسه سعی شده است تعداد المان‌ها تقریباً نزدیک به هم باشند. برای بدست‌آوردن یک شبکه‌بندی مناسب در انسیس اتوداین، می‌توان فضای حل مسئله را به صورت غیریکنواخت شبکه‌بندی نمود تا اندازه المان‌ها یکسان نباشد. در پژوهش انجام‌شده اندازه المان‌ها در جهت شکل‌گیری و پیشروی جت به تدریج کوچک‌تر می‌شوند تا دقت حل در این بخش‌ها افزایش یافته و بزرگ‌تر بودن المان‌ها در سایر قسمت‌ها، به کاهش زمان حل کمک کند. در ال اس داینا نیز این مسئله در شبکه‌بندی هوا رعایت شده تا زمان حل کاهش یابد. تفاوت شبکه‌بندی در دو نرم‌افزار را می‌توان از مقایسه شکل ۴ و شکل ۶ مشاهده نمود. جدول ۵ مقایسه زمان اجرای شبیه‌سازی در دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود انسیس اتوداین با تعداد المان‌های کمتر، ۴ برابر بیشتر زمان برده است. این تفاوت قابل توجه در زمان اجرای شبیه‌سازی، به ماهیت حل گرهای این دو نرم‌افزار بازمی‌گردد. از آنجایی که انسیس اتوداین از روش تفاضل محدود استفاده می‌کند، زمان محاسبات آن بیشتر از روش المان محدود است که در ال اس داینا به کار می‌رود. در پژوهش قبلی توسط نویسندگان این مقاله نشان داده شد که کوچک‌تر کردن اندازه شبکه‌بندی در نرم‌افزار انسیس اتوداین می‌تواند دقت نتایج را افزایش دهد و تأثیر قابل توجهی نیز بر زمان حل مسئله بگذارد [۱۷].

در زمینه‌ی قابلیت‌های آماده‌سازی مدل نیز ال اس داینا امکانات بیشتری برای مدل‌کردن هندسه‌های مختلف و شبکه‌بندی آن‌ها فراهم می‌کند در حالی که ایجاد هندسه‌های متنوع در انسیس اتوداین دشوار است. با این حال سایر مسائل مربوط به آماده‌سازی مدل شامل ایجاد شرایط اولیه، شرایط مرزی و برهم‌کنش المان‌های لاگرانژی و اویلری در انسیس اتوداین، سادگی بیشتری دارد. این سادگی در مدل‌های مواد نیز برای انسیس اتوداین وجود



شکل ۱۵. مقایسه سرعت نوک جت برای بتن گسسته و پیوسته

Fig. 15. Comparison of jet velocity for discrete and uniform concrete

اهداف با مواد مختلف می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

ایجادشده می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی فرآیند نفوذ خرج گود در بتن گسسته، در دو نرم‌افزار ال‌اس‌داینما و انسیس اتوداین انجام گردید. نتایج بدست‌آمده از هر دو نرم‌افزار با یکدیگر مقایسه شده تا مزایا و معایب هریک از این دو نرم‌افزار برای شبیه‌سازی این مسئله و استفاده در فرآیند طراحی مشخص گردد.

استفاده از روش ال-ال-ای برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ خرج گود در بتن، در هر دو نرم‌افزار کارآمد بوده و موجب استفاده از مزایای هر دو روش لاگرانژی و اویلری می‌شود.

نتایج بدست‌آمده از مدل بتن آر-اچ-تی نشان از کارآمدی این مدل برای شبیه‌سازی رفتار بتن در بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا دارد.

سرعت نوک جت در هر دو نرم‌افزار بسیار نزدیک به هم و دارای تطابق نسبتاً مناسبی با تئوری تعمیم‌یافته پر می‌باشند.

پارامتر آسیب بتن در ال‌اس‌داینما نتایج قابل قبولی برای فروریختن بتن و بدست‌آوردن قطر دهانه‌های ورودی، میانی و خروجی می‌دهد. در انسیس اتوداین ترک‌های شعاعی ایجادشده در بتن، الگوی مناسبی از میزان تخریب

تفاوت در روش حل عددی به‌کاررفته در دو نرم‌افزار و همچنین تفاوت‌های روش برهم‌کنش المان‌های لاگرانژی و اویلری در دو نرم‌افزار، باعث شد تا عمق نفوذ بدست‌آمده در انسیس اتوداین، از ال‌اس‌داینما کمتر و قطر دهانه‌های ورودی، خروجی و میانی در انسیس اتوداین نسبت به ال‌اس‌داینما بیشتر باشد. عمق نفوذ در ال‌اس‌داینما، و قطر دهانه‌های ورودی، خروجی و میانی در انسیس اتوداین به نتایج تجربی نزدیک‌تر بودند.

با توجه به قابل قبول بودن و نزدیک بودن نتایج هر دو نرم‌افزار، استفاده از هر دو نرم‌افزار برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ خرج گود امکان‌پذیر بوده و اختلاف زیادی بین نتایج مشاهده نمی‌شود. مزیت نرم‌افزار ال‌اس‌داینما در سرعت اجرای بیشتر و قابلیت‌های کنترلی بالاتر در مدل‌های مواد و کدهای دستوری خصوصاً نحوه برهم‌کنش المان‌های لاگرانژی و اویلری و مزیت نرم‌افزار انسیس اتوداین در سادگی شبیه‌سازی و بدست‌آوردن دقت قابل قبول در زمان بیشتر حل است.

مقایسه نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی بتن گسسته و پیوسته، نشان‌دهنده کاهش عمق نفوذ در بتن بر اثر گسسته‌سازی است.

جدول ۱۰. پارامترهای معادله حالت شوک برای پوسته فولادی

Table 10. shock Equation of state parameters for steel case

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۴۵۶۹	C (m/s)
۱/۴۹	S_1
۲/۱۷	γ

جدول ۱۱. پارامترهای مدل جانسون کوک برای پوسته فولادی

Table 11. Jonson-Cook parameters for steel case

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۷۸۹۰	چگالی (kg/m ³)
۷۹۲	A (MPa)
۵۱۰	B (MPa)
۰/۲۶	n
۰/۰۱۴	c
۱/۰۳	M
۱۷۹۳	TM (K)

جدول ۱۲. پارامترهای معادله حالت جی-دابلو-ال برای ماده منفجره ترکیب بی

Table 12. JWL Equation of state parameters for Comp-B

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۵/۲۴۵۵	A (MPa)
۷/۶۸۵۳	B (MPa)
۴/۲	R_1
۱/۱	R_2
۰/۳۴	ω
۸/۵۵۹	E_0 (j/m ³)

جدول ۱۳. پارامترهای مدل مقاومتی برای ماده منفجره ترکیب بی در ال اس داینا

Table 13. Strength model parameters for Comp-B

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۱۶۰۰	چگالی (kg/m ³)
۷۹۸۰	D (m/s)
۲/۹۵۵۴	P_{cj} (MPa)

جدول ۷. پارامترهای معادله حالت شوک برای آستری مسی

Table 7. shock Equation of state parameters for copper liner

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۳۹۴۰	C (m/s)
۱/۴۹	S_1
۱/۹۹	γ

جدول ۸. پارامترهای مدل جانسون کوک برای آستری مسی در ال اس داینا

Table 8. jonson- cook parameters for copper liner in Ls-Dyna

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۸۹۳۰	چگالی (kg/m ³)
۹۰	A (MPa)
۲۹۲	B (MPa)
۰/۳۱	n
۰/۰۲۵	c
۱/۰۹	M
۱۳۵۶	TM (K)
۳۰۰	TR (K)

جدول ۹. پارامترهای مدل استینبرگ گینان برای آستری مسی در انسیس اتوداین

Table 9. Steinberg-Guinan parameters for copper liner in Ansys Autodyn

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۴/۷۷۵۷	مدول برشی ^۱ (kPa)
۱/۲۵۵	تنش تسلیم ^۲ (kPa)
۶/۴۵۵	بیشینه تنش تسلیم ^۳
۳۶	ضریب سخت‌شوندگی ^۴
۰/۴۵	توان سخت‌شوندگی ^۵
۱/۳۵	dG/dP
-۱/۷۹۵۴	dG/dT (kPa/K)
۰/۰۰۳۳	dY/dP
۱/۷۹۵۳	دمای ذوب ^۶ (K)

¹ Shear module

² Yield Stress

³ Max. Yield Stress

⁴ Hardening const.

⁵ Hardening const.

⁶ Melting Temp

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
V_0	سرعت فروپاشی ، m/s
U_D	سرعت انفجار ماده منفجره ، m/s
L	طول جت ، m
γ_{el}	سطح حد الاستیک ، N/m ²
γ_{fail}	سطح گسیختگی ، N/m ²
γ_{fric}	سطح مقاومت پسماند ، N/m ²
$R_3(\theta)$	سومین ثابت مقطع انحرافی
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m ³
α	زاویه بین مماس بر آستری و محور تقارن ، rad
β	زاویه بین امتداد فروپاشی دیواره آستری و محور تقارن ، rad
δ	زاویه تیلور ، rad
$\epsilon(x)$	زاویه بین شعاع حامل موج انفجار و سطح آستری ، rad

منابع

- [1] A. Resnyansky, G. Katselis, A. Wildegger-Gaissmaier, Experimental and numerical study of the shaped charge jet perforation against concrete target, in: Proceedings of 21st international symposium on ballistics, CD-ROM proceedings, additional entries, paper, Vol(1) 2004.
- [2] F. Hu, H. Wu, Q. Fang, J. Liu, Numerical simulations of shaped charge jet penetration into concrete-like targets, International Journal of Protective Structures, 8(2) (2017) 237-259.
- [3] Z. Tu, Y. Lu, Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations, International Journal of Impact Engineering, 36(1) (2009) 132-146.
- [4] N. Dashtin Gerami, G.H. Liaghat, G.H. Rahimi, N. Khazraiyani, Investigation of performance of anti structure tandem projectiles in to the concrete targets by numerical and experimental method, Modares Mechanical Engineering, 16(10) (2016) 9-18. (in Persian)
- [5] G. Birkhoff, D.P. MacDougall, E.M. Pugh, S.G. Taylor, Explosives with lined cavities, Journal of Applied Physics, 19(6) (1948) 563-582.
- [6] H. Hatami, A. Dalvand, A.S. Chegeni, Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite

جدول ۱۴. پارامترهای معادله حالت P- α برای هدف بتنی

Table 14. P- α Equation of state parameters for concrete target

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۱/۲۲	B_0
۱/۲۲	B_1
۳۵/۲۷	T_1
۰	T_2

جدول ۱۵. پارامترهای مدل آر-اچ-تی برای هدف بتنی

Table 15. RHT model parameters for concrete target

مقدار پارامتر	نام پارامتر
۲۳۱۴	چگالی (kg/m ³)
۱۶/۷	مدول برشی ^۱
۱/۶	A
۰/۶۱	N
۰/۰۳۵	F_c (Gpa)
۰/۱۸	F_s^*
۰/۱	F_T^*
۰/۶۸	Q_0
۰/۰۱۰۵	B
۳e-۹	ϵ_{0c}
۳e-۹	ϵ_{0T}
۳e۲۲	ϵ_c
۳e۲۲	ϵ_T
۰/۵۳	G_c^*
۰/۷	G_T^*
۰/۵	XI
۰/۰۴	D_1
۱	D_2
۱/۶	A_f
۰/۶۱	N_f
۳۵/۲۷	A_1
۳۹/۵۸	A_2
۹/۰۴	A_3

- [16] J. Brown, Modelling and Experimental Studies of a Family of Shaped Charges in an European Collaborative Forum, in: Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics, 1990, pp. 27-41.
- [17] H. Mehmannaavaz, G. Liaghat, M. Nabakhteh, H. Fazeli, M. Rouhbakhsh, A. Heidari, Numerical Analysis of Reactive Shaped Charges with Bimetallic Liner into Discrete Layer Steel Target, Modares Mechanical Engineering, 20(1) (2019) 171-179. (In Persian).
- [18] H. Mehmannaavaz, G. Liaghat, S. Rahmati, M. Najafi, H. Fazeli, Numerical analysis of shaped charge bimetallic liners effects on diameter and depth of penetration into steel targets, Aerospace Mechanics Journal (2019). (In Persian).
- [19] H. Mehmannaavaz, G. Liaghat, S. Rahmati, M. Najafi, H. Fazeli, Theoretical, numerical and experimental analysis of bimetallic Cu–Al shaped charge's liners and its influence on the penetration depth and the crater diameter of steel targets, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41(8) (2019) 336.
- [20] C. Wang, W. Xu, S.C.K. Yuen, Penetration of shaped charge into layered and spaced concrete targets, International Journal of Impact Engineering, 112 (2018) 193-206.
- [21] T. Shirai, A. Kambayashi, T. Ohno, H. Taniguchi, M. Ueda, N. Ishikawa, Experiment and numerical simulation of double-layered RC plates under impact loadings, Nuclear engineering and design, 176(3) (1997) 195-205.
- [22] P.M. Booker, J.D. Cargile, B.L. Kistler, V. La Saponara, Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts, International Journal of Impact Engineering, 36(7) (2009) 926-939.
- [23] W.P. Walters, J.A. Zukas, Fundamentals of shaped charges, John Wiley, 1989.
- [24] W. Riedel, K. Thoma, S. Hiermaier, E. Schmolinske, Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes, in: Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with expanded steel sheet, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42(6) (2020).
- [7] H. Hatami, A. Fathollahi, The theoretical and numerical comparison and investigation of the effect of inertia on the absorbent collapse behavior of single cell and two-cell reticular under impact loading, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50 (2017) 51-60. (in Persian)
- [8] A. Jahromi Ghodsbin, H. Hatami, Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 49(4) (2018) 685-696. (in Persian)
- [9] W. Gooch, M. Burkins, W. Walters, A. Kozhushko, A. Sinani, Target strength effect on penetration by shaped charge jets, International journal of impact engineering, 26(1-10) (2001) 243-248.
- [10] M. Held, Penetration cutoff velocities of shaped charge jets, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 13(4) (1988) 111-119.
- [11] R. DiPersio, J. Simon, A. Merendino, Penetration of shaped-charge jets into metallic targets, US Army Ballistic Research Laboratory, BRL, (1965).
- [12] N. Zlatin, A. Kozhushko, Hydrodynamic Model Concepts in the Theory of High-velocity Interaction of Solids and the Limits of their Applicability, Sov. Phys. Tech. Phys., 27(2) (1982) 212-214.
- [13] A. Kozhushko, A. Izotov, V. Lazarev, A. Balankin, Hydrodynamic model concepts in the problem of dynamic strength of materials of a different physico-chemical nature. 2. Effect of tensile properties of medium, Neorganicheskie Materialy, 29(9) (1993) 1189-1209.
- [14] S.L. Hancock, An extension of the umin model for cutoff of high precision jets, International journal of impact engineering, 26(1-10) (2001) 289-298.
- [15] D. Chi, J. Conner, R. Jones, A Computational Model for the Penetration of Precision Shaped Charge Warheads, in: Proceedings of 11th International Symposium on Ballistics, 1989.

- [28] J.T. Harrison, Improved analytical shaped charge code: Basc, ARMY BALLISTIC RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD, 1981.
- [29] D.J. Benson, an efficient, accurate, simple ALE method for nonlinear finite element programs, Computer methods in applied mechanics and engineering, 72(3) (1989) 305-350.
- [30] D. Hasenberg, Consequences of coaxial jet penetration performance and shaped charge design criteria, (2010).
- [31] M.J. Murphy, Shaped-charge penetration in concrete: a unified approach, Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1983.
- with Structures, Berlin-Strausberg Germany, Vol. 315. 1999.
- [25] W. Riedel, Beton unter dynamischen Lasten: Meso-und makromechanische Modelle und ihre Parameter, EMI, 2000.
- [26] A. Rasouli, H. Toopchi-Nezhad, coupled vs uncoupled analysis of one-way RC-slabs under nearby air explosions, International Journal of Advanced Structural Engineering, 10(4) (2018) 421-437.
- [27] T. Borrvall, W. Riedel, The RHT concrete model in LS-DYNA, in: Proceedings of The 8th European LS-DYNA user conference, 2011.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Mehmannaavaz, A. Ramezani, G. Liaghat, H. Fazeli, M. Rouhbakhsh, Numerical analysis of shaped charge jet penetration into discrete concrete targets using LS-DYNA and ANSYS-AUTODYN, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3953-3970.

DOI: 10.22060/mej.2020.18593.6857



