

شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری جت حاصل از خرج گود

و نفوذ آن در اهداف بتن مسلح

احمد حیدریان خرزوقی^۱، قاسم دهقانی اشکذری^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، کارشناس مطالعات امور ایمنی / اداره کل مدیریت بحران استانداری اصفهان

۲. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

ghdeas@yahoo.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۸/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۴]

چکیده - خرج گودها، مواد منفجره با قابلیت نفوذ بالا است و برای اهداف نظامی و غیر نظامی استفاده می‌شود. در کاربردهای غیر نظامی خرج گود در کارهای تخریب، حفاری نفت و معدن استفاده می‌شود. در کاربردهای نظامی، خرج گودها در برابر انواع مختلف زره و همچنین سازه‌های امن استفاده می‌شود. تحلیل مسائل شکل‌گیری و نفوذ پرتابه‌های حاصل از خرج گود دارای پیچیدگی‌های زیادی است که انفجار خرج، انتشار موج شوک درون خرج و اصابت موج به لاینر، تغییر فرم لاینر، شکل‌گیری پرتابه و در پایان اصابت آن به سطح هدف و نفوذ در آن تا توقف کامل را شامل می‌شود. با توجه به پیچیدگی رفتار هدف بتنی در هنگام نفوذ جت، به مدل‌هایی نیاز است که بتواند اثر تغییر شکل‌های بزرگ، فشار هیدرواستاتیک و نرخ کرنش بالا و گسیختگی را مدلسازی نماید. اگر چه مراجعی در مورد شبیه‌سازی نفوذ برخی خرج گودها در اهداف فولادی منتشر شده است ولی در خصوص نفوذ خرج گود در اهداف بتنی، مرجع کاملی پیدا نشد. هدف اول از این پژوهش ارائه یک روش شبیه‌سازی عددی مطمئن به وسیله نرم افزارهای موجود بر روی نفوذ خرج گود 7 - RPG در اهداف بتنی است. بدین منظور در سه مرحله نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفت که شامل تشکیل جت، نفوذ جت در اهداف فولادی و رفتار هدف بتنی در مقابل نفوذ است. هدف دوم پژوهش، تعیین ضخامت ایمن هدف، از جنس بتن معمولی در مقابل نفوذ جت 7 - RPG و بررسی رفتار این نوع بتن به لحاظ عمق نفوذ، شعاع حفره و گسیختگی در وجوه جلویی و پشتی هدف است.

واژه‌گان کلیدی: خرج گود، تشکیل جت، نفوذ، هدف بتنی

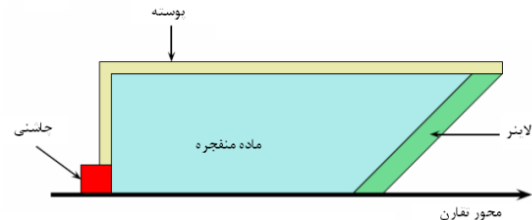
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر از بتن به شکل گسترده در ساخت سازه‌های امن استفاده می‌شود. با توجه به مورد هدف قرار گرفتن این گونه سازه‌ها در برابر انواع سلاح‌ها به وسیله نیروهای متجاوز و همچنین اشراق و قاچاقچیان مواد مخدر، لزوم تحلیل و طراحی این گونه سازه‌ها در برابر ضربه و نفوذ مورد توجه قرار گرفته است. از جمله سلاح‌هایی که به شکل گسترده به وسیله تروریست‌ها و قاچاقچیان مواد مخدر در مرزهای کشور ما مورد استفاده قرار می‌گیرد سلاح‌های خرج گود شامل سلاح 7 - RPG است. در بررسی سازه‌ها در برابر

این گونه سلاح‌ها، در مرحله اول ابتدا باید به شناخت چگونگی تشکیل جت حاصل از خرج گود پرداخت و سپس نفوذ آن را در بتن مورد بررسی قرار داد.

بررسی‌های فراوانی به وسیله دانشمندان مختلف روی تشکیل و نفوذ جت حاصل از خرج گود به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی روی اهداف با مصالح مختلف انجام گرفته است. با این حال به صورت ویژه در مورد نفوذ جت حاصل از خرج گود در اهداف بتنی داده‌های کافی آزمایشگاهی در دسترس نیست بنابراین در این قسمت بیشتر به بررسی کارهای انجام شده روی نفوذ جت در اهداف

فولادی و نفوذ پرتابه در اهداف بتنی و همچنین کارهای محدود موجود در خصوص نفوذ جت در اهداف بتنی پرداخته شده است.

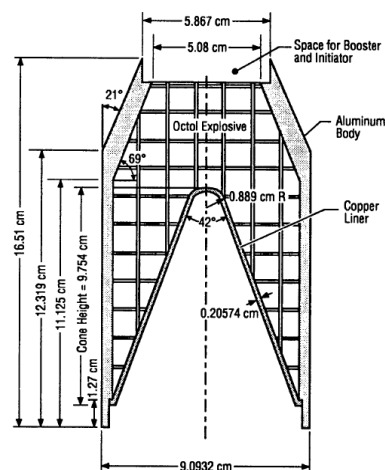


شکل ۱- ساختمان یک خرج گود

در شکل (۱) اجزای مختلف خرج گود شامل لایتر، خرج انفجار، پوسته و چاشنی نشان داده شده است.

وتگ و همکاران مقدار عمق نفوذ و قطر دهانه حفره حاصل از نفوذ خرج گود در هدف بتنی را با استفاده از تحلیل رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی بیش از ۳۰ آزمایش نفوذ جت خرج گود در اهداف بتنی و با تغییر پارامترهای مختلف آن به دست آوردند [۱].

هاناکا و همکاران به صورت آزمایشگاهی به بررسی خرج گود استاندارد BRL-۸۲ پرداختند [۲]. در کار آن‌ها سرعت نوک جت در لحظه ۵۰ μs برابر ۸۳۰۰ m/s به دست آمد. همچنین میزان نفوذ آن در هدف فولادی تقریباً برابر ۴۰۰ mm تعیین شد. بلستاد و مندل نیز با استفاده از نرم افزار MESA - 2D آن را شبیه‌سازی کردند [۳]. شماتیک خرج استفاده شده مطابق شکل زیر است:



شکل ۲- مشخصات هندسی خرج استاندارد با قطر ۳/۳ اینچ [۳]

در سال ۱۹۹۰ هاناکا و همکاران [۴] به بررسی آزمایشگاهی نفوذ گلوله فولادی در اهداف بتنی با مقاومت‌های ۴۸ و ۱۴۰ مگاپاسکال پرداختند و در سال ۲۰۰۵ تام کار آزمایشگاهی هاناکا را با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و مدل RHT برای بتن با مقاومت ۴۸ مگاپاسکال شبیه‌سازی کرد و نتایج قابل قبولی به دست آورد [۵].

هدف اول از این پژوهش ارائه یک روش شبیه‌سازی عددی مطمئن به وسیله نرم افزارهای موجود روی نفوذ خرج گود سلاح ۷ - RPG در اهداف بتنی است. بدین منظور در سه مرحله نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفت که شامل تشکیل جت، نفوذ جت در اهداف فولادی و رفتار هدف بتنی در مقابل نفوذ است. هدف دوم پژوهش، تعیین ضخامت ایمن هدف، از جنس بتن معمولی در مقابل نفوذ ۷ - RPG و بررسی رفتار این نوع بتن به لحاظ عمق نفوذ، شعاع حفره و گسیختگی در وجوه جلویی و پشتی هدف است.

۲- معرفی مدل بتن RHT [۸]

مدل RHT، مدل پلاستیسیته پیشرفته‌ای است که نام آن، از نام سه نفری است که این مدل را ایجاد نموده‌اند و به وسیله‌ی ریدل (یکی از آن سه نفر) در سال ۲۰۰۰ توسعه داده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته‌اند بسیار کارآمد است.

این مدل همراه با معادله حالت $P - \alpha$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله حالت، رفتار ماده متخلخل را در تنش‌های بالا و در عین حال جزئیات معقولی از روند تراکم در تنش‌های پایین را فراهم می‌کند. فرض اصلی در معادله حالت $P - \alpha$ این است که در شرایط یکسانی از دما و فشار، انرژی داخلی ویژه برای یک ماده متخلخل به همان اندازه‌ای است که برای ماده در چگالی جامد آن است. سپس پارامتر α که بیان‌کننده تخلخل است به صورت $\alpha = V/V_s$ تعریف

است. همان‌گونه که در شکل ۳ ارائه شده، برای فشار هیدرواستاتیکی پایین‌تر از $f_c/3$ نصف‌النهار فشاری به وسیله‌ی یک خط راست که از میان نقاط معلوم می‌گذرد ترسیم می‌شود. اما برای فشار هیدرواستاتیکی بیشتر از $f_c/3$ رابطه (۱) برای محاسبه Y_{TXC} به کار برده می‌شود.

(۱) $Y_{TXC}(p) = f_c \left[A \left[\frac{p}{f_c} - \frac{p_{HTL}}{f_c} F_{rate} \right]^N \right]$ for $p \geq f_c/3$

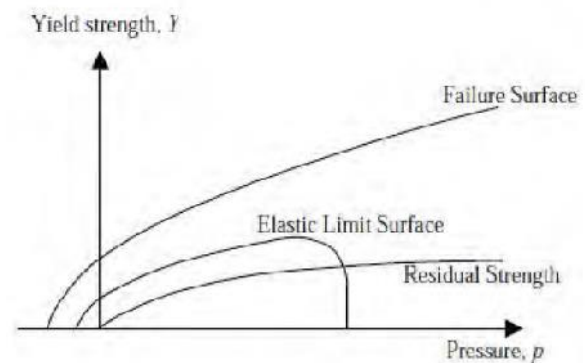
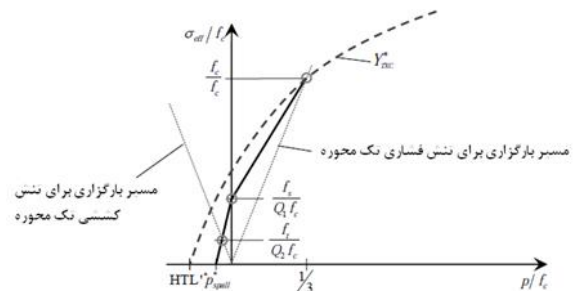
A ثابت سطح گسیختگی و N توان سطح گسیختگی، ثابت‌های عددی است که به وسیله‌ی کاربر تعیین می‌شوند و شکل منحنی را ترسیم می‌کنند. f_c مقاومت فشاری تک محوری استوانه‌ای و p_{HTL} حد کشش هیدرواستاتیکی است که در شکل ۳ نشان داده شده است. F_{rate} تابعی از نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ نمایانگر ضریب افزایش دینامیکی است.

علاوه بر اینکه سطح گسیختگی به فشار هیدرواستاتیکی و نرخ کرنش وابسته است، افزایش شکنندگی بتن در برش و کشش نیز با فشار متناسب است. این موارد به وسیله اضافه کردن یک عامل به نام $R_3(\theta)$ توجه می‌شود که سومین ثابت وابسته مقطع انحرافی است. بنابراین برای معادله سطح گسیختگی می‌توان نوشت:

$$Y_{Fail} = Y_{TXC}(p) R_3(\theta) F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (2)$$

همان‌گونه که از روابط (۱) و (۲) می‌فهمیم در مدل RHT وابستگی به نرخ مقاومت کششی هیدرواستاتیک ماده در نظر گرفته شده است. چگونگی تأثیر نرخ کرنش در این مدل را می‌توان بدین صورت عنوان نمود که مقاومت کششی هیدرواستاتیک مصالح در ابتدا با ضریبی برابر ضریب افزایش دینامیکی افزایش می‌یابد تا برابر $F_{rate} \times f_t$ شود و سپس سطح شکست در امتداد جهت محور فشار هیدرواستاتیک به موقعیت جدید قطع فشار کششی منتقل می‌شود و در پایان سطح شکست انتقال یافته در فشار یکسان به وسیله ضریبی از F_{rate} توسعه می‌یابد، بنابراین تأثیرات نرخ کرنش به وسیله افزایش مقاومت شکست با نرخ کرنش پلاستیک و به وسیله دو شرط مختلف که برای فشار و کشش است نشان داده می‌شود که دو شرط یاد شده در رابطه (۳) ارائه شده است.

می‌شود که در آن V حجم ویژه ماده متخلخل و Vs حجم ویژه ماده در حالت توپر^۱ (کاملاً متراکم) است. البته در فشار و دمای یکسان (توجه کنید که Vs در فشار صفر برابر با $1/\rho_{ref}$ است) زمانی که ماده توپر است، α برابر واحد می‌شود. در این معادله حالت سخت شدگی کرنشی و وابستگی به ثابت سوم برای نصف‌النهار کششی و فشاری مد نظر قرار گرفته است و برای مدلسازی آسان، رفتار نرم‌شدگی سطح مقاومت شکست غیر وابسته و نیز مقاومت کششی هیدرواستاتیک بتن وابسته به نرخ کرنش ایجاد شده است و مدل خسارت برشی ناشی از تنش انحرافی مصالح محدود شده در یک سطح گسیختگی کلی است. این مدل شامل سه سطح وابسته به فشار است، که عبارتند از: سطح حدود الاستیک Y_{el} و سطح گسیختگی Y_{fail} و سطح مقاومت پسماند Y_{fric} که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- (بالا) رفتار سطح شکست برای قانون فشار هیدرواستاتیکی، (پایین) طرحی از سطوح استفاده شده در مدل اساسی RHT [۸]

در شکل ۳ مقاومت تسلیم Y با افزایش فشار هیدرواستاتیکی p افزایش پیدا می‌کند. Y_{TXC} یک تابع مورد استفاده برای بیان فشار هیدرواستاتیکی است، که وابسته به نصف‌النهار فشاری

بصورت پیش فرض یک درصد در نظر گرفته شده است که در بتن حجیم هم این عدد اعمال می شود.

$$F_{rate} = \begin{cases} 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^\alpha & \text{for } p > 1/3 f_c \text{ (compression)} \\ 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^\delta & \text{for } p < 1/3 f_t \text{ (tension)} \end{cases} \quad (۳)$$

۳- شبیه سازی عددی

در این قسمت به منظور شبیه سازی تشکیل و نفوذ جت حاصل از سلاح RPG - 7 در هدف بتن مسلح و با توجه به در دسترس نبودن چنین مطالعه ای در مقالات و مراجع موجود، ابتدا فرآیند تشکیل جت حاصل از خرج استاندارد BRL - 82 با استفاده از نرم افزار اتوداین شبیه سازی و از صحت آن اطمینان حاصل شد. سپس نفوذ جت در هدف فولادی با توجه به موجود بودن داده های آزمایشگاهی مربوطه مورد شبیه سازی قرار گرفت و مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایش، از صحت شبیه سازی تشکیل و نفوذ جت خرج گود اطمینان حاصل شد. همچنین به منظور اطمینان از صحت شبیه سازی رفتار هدف بتنی در مقابل نفوذ، یک کار آزمایشگاهی در این زمینه نیز شبیه سازی و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در پایان با استفاده از روش های مطمئن به دست آمده، نفوذ جت خرج گود سلاح RPG - 7 در هدف بتنی به طور کامل شبیه سازی شد. در ادامه تأثیر ضخامت هدف بتنی در میزان نفوذ جت مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- صحت سنجی شبیه سازی ها

۳-۱-۱- شبیه سازی تشکیل جت

به منظور اطمینان از درستی روش شبیه سازی تشکیل جت و دقت نتایج، آزمایش نفوذ خرج استاندارد BRL - 82 در هدف فولادی که به وسیله بلستاد و مندل [۳] انجام گرفته، شبیه سازی شد. شماتیک خرج گود شبیه سازی شده در نرم افزار اتوداین در شکل (۴) قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۵) جت تشکیل شده در لحظه ۲۰ μs پس از شروع انفجار قابل ملاحظه می باشد. پارامترهای مصالح به کار رفته در شبیه سازی قسمت های مختلف خرج در جدول ۱ آمده است. ضرایب مدل های مقاومت و معادله حالت مطابق با کتابخانه نرم افزار اتوداین v.13 است.

در رابطه فوق α توان نرخ کرنش فشاری، δ توان نرخ کرنش کششی است که به وسیله کاربر تعیین می شود. ϵ_0 مقدار نرخ کرنش اولیه است که برای حالت فشاری $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ و برای حالت کششی $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ در نظر گرفته می شود. بعد از شروع شکست از مدل خسارت استفاده می شود. مطابق نتایج پژوهش های انجام شده ظرفیت باربری بتن بعد از رسیدن به مقاومت کششی و یا فشاری به صورت تدریجی کاهش می یابد. که این عمل به وسیله کاهش خطی مقاومت مصالح (مقاومت گسیختگی بنابر مقاومت پسماند) و به وسیله استفاده از عامل خسارت D مطابق با رابطه (۴) انجام می گیرد. عامل خسارت مصالح به وسیله مشخصات کرنش پلاستیک ϵ_{pl} و کرنش شکست پلاستیک $\epsilon_{pl, failure}$ تعریف می شود.

$$D = \sum \frac{\epsilon_{pl}}{\epsilon_{pl, failure}} \quad (۴)$$

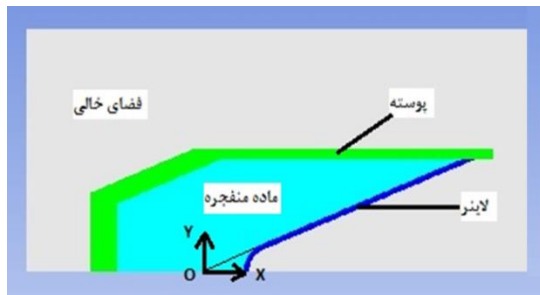
کرنش گسیختگی پلاستیک به وسیله رابطه (۵) محاسبه می شود که D_1 و D_2 ثابت های خسارت مصالح، و متأثر از فشار است و به وسیله کاربر تعیین می شوند که D_1 حد پایین خسارت و معمولاً برابر ۰/۰۴ و D_2 حد بالای خسارت است که معمولاً عدد یک برای آن در نظر گرفته می شود. مقاومت پسماند به وسیله سطح مقاومت پسماند Y_{fric} و به وسیله رابطه (۶) تعریف می شود. قابل گفتن است که برخلاف سطح شکست، مقاومت پسماند نمی تواند به وسیله ثابت سوم و یا نرخ کرنش به دست آید.

$$\epsilon_{pl, failure}(p) = D_1 \left(\frac{p}{f_c} - \frac{p_{HTL}}{f_c} \right)^{D_2} \quad (۵)$$

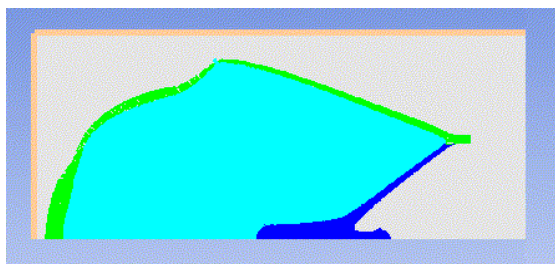
$$Y_{fric} = f_c \cdot B \left(\frac{p}{f_c} \right)^M \quad (۶)$$

B ثابت مقاومت پسماند و M توان مقاومت پسماند است که هر دو ثابت عددی است که به وسیله کاربر تعیین می شوند. بهتر است کرنش شکست پلاستیک، مطابق آنچه که در رابطه (۵) ارائه شده است در حد کمترین مقدار سطح کرنش پلاستیک نشان داده شود و این حد در مدل مصالح RHT

به منظور شبیه سازی، از المان‌های اویلری استفاده شده است، این مسئله به دلیل کرنش زیاد لاینر است. شرایط مرزی Flow-out برای همه‌ی حاشیه‌های محاسباتی به جز محور تقارن اعمال می‌شود. این مسئله اجازه می‌دهد انبساط پوسته و انفجار ایجاد شده از دامنه مدل محاسباتی بدون اندرکنش با مرزها خارج شود.

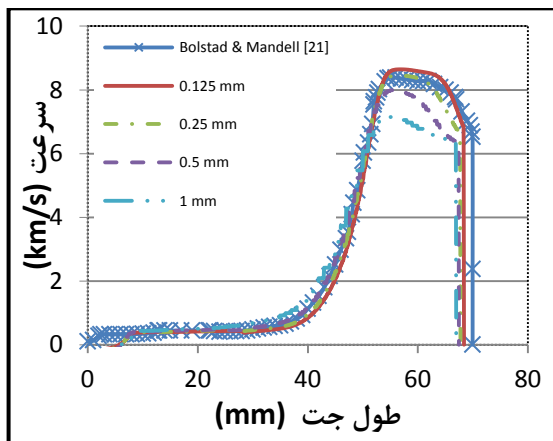


شکل ۴- جزئیات پیکربندی اولیه خرج BRL-82 در شبیه سازی



شکل ۵- لحظه ۲۰ μs پس از شروع انفجار

شکل ۶ پروفیل سرعت خط مرکزی جت تشکیل شده را پس از ۲۰ μs نشان می‌دهد. همان‌گونه که قابل مشاهده است، مش‌های با ابعاد ۰/۲۵ mm دقت خوبی با داده‌های مرجع دارند. بنابراین در شبیه سازی عددی خرج سلاح RPG-7 از این ابعاد استفاده خواهد شد.



شکل ۶- پروفیل سرعت خط مرکزی ۴ مش مختلف در ۲۰ میکروثانیه، در مقایسه با داده مرجع

جدول ۱- معادله حالت و مدل مصالح استفاده شده در شبیه سازی

بخش	مصالح	معادله حالت	مدل مقاومت
لاینر	Cu – OFHC	Shock	Steinberg – Guinan
پوسته	Aluminum 6061 – T6	Shock	None
ماده منفجره	Octol	JWL	None
پیش زمینه	Void	Void	None

با توجه به اینکه لاینر در اثر برخورد موج شوک حاصل از انفجار خرج گود تحت فشار بسیار زیاد قرار می‌گیرد از معادله حالت shock برای شبیه سازی آن استفاده شده است. این معادله حالت برای توصیف دقیق رفتار مواد فلزی در پدیده‌های با سرعت بسیار بالا تولید شده است. این معادله حالت محدوده بسیار گسترده‌ای از فشار و چگالی را پوشش داده و علاوه بر اینکه شرایط ماده در چگالی نرمال و همچنین بعد از شوک را توصیف می‌کند، انبساط و تغییر فاز ماده را نیز در مواردی که انرژی برای ذوب یا تبخیر ماده کافی است ارائه می‌دهد. این معادله حالت برای مسائلی که شامل سرعت و فشارهای بسیار بالا و انتقال فاز (به عنوان مثال تبخیر و ذوب) است، کاربرد دارد. در جدول ۲ پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی لاینر مسی نشان داده شده است:

جدول ۲: پارامترهای معادله حالت shock برای لاینر

ρ_0 (kg/m ³)	C_v (J/kg-K)	C_0 (m/s)	s	Γ_0	T (K)
۸۹۶۰	۳۹۰	۳۹۳۳	۱/۵	۱/۹۹	۷۰۰

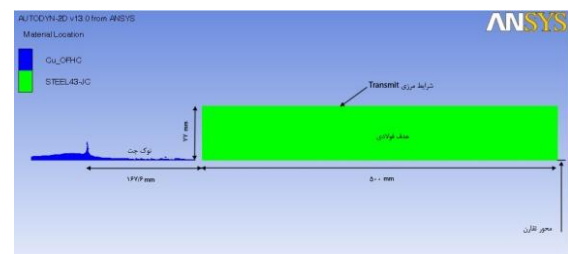
پارامترهای معادله حالت JWL برای شبیه سازی ماده منفجره خرج گود در جدول ۳-۳ آمده است:

جدول ۳: پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره اکتل

A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω	چگالی مرجع (g / cm ³)
۷۴۸/۶	۱۳/۳۸	۴/۵	۱/۲	۰/۳۸	۱/۸۲۱

۳-۱-۱- شبیه‌سازی عددی نفوذ جت در هدف فولادی

به منظور شبیه‌سازی عددی نفوذ جت تشکیل شده در هدف فولادی، از المان‌های لاگرانژی با سلول‌های 0.5 mm استفاده شد. این مسئله به دلیل آن است که مطابق کار بلستاد و مندل این اندازه از مش‌بندی قادر به تحصیل نتیجه مناسب می‌باشد [۳]. همچنین به دلیل آنکه پس از رسیدن طول جت به فاصله توقف^۱ برابر با دو برابر قطر خرج، انرژی ماده منفجره دیگر تأثیری در افزایش انرژی جنبشی جت ندارد، در این مرحله ماده منفجره شبیه‌سازی نمی‌شود. شکل ۷ شماتیکی از مدل شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- شبیه‌سازی عددی نفوذ جت در هدف فولادی

پارامترهای مدل مصالح استفاده شده در شبیه‌سازی عددی از کتابخانه نرم افزار اتوداین استفاده شد و بر اساس جدول ۴ است.

جدول ۴- پارامترهای مصالح در مدل نفوذ

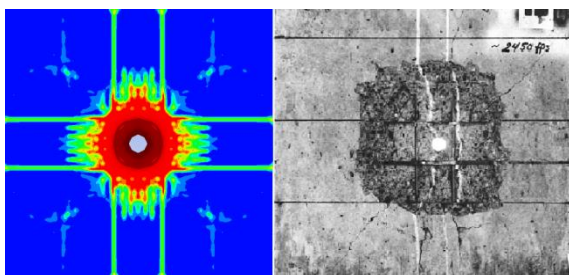
	نوع مصالح	مدل مقاومت	معادله حالت	کرنش فرسایش
جت	مس	Steinberg Guinan	Shock	٪۶۰۰
هدف	فولاد	Johnson Cook	Shock	٪۴۰۰

میزان نفوذ در شبیه‌سازی‌ها 456 mm به دست آمد که هماهنگی خوبی با کار بلستاد و مندل (460 mm) دارد [۳]. هر چند میزان نفوذ در نمونه آزمایشگاهی به وسیله‌ی هاناکاک و همکاران تقریباً برابر با 400 mm به دست آمده است. همچنین در شبیه‌سازی، مشاهده شد که قسمت دنباله جت در عمق نفوذ تأثیری ندارد و در اثر اختلاف سرعت آن با

قسمت نوک جت، به شکل کامل از قسمت نوک آن جدا می‌شود بنابراین در ادامه و به منظور شبیه‌سازی سلاح RPG 7- تنها قسمت نوک آن شبیه‌سازی خواهد شد.

۱-۱-۱- شبیه‌سازی عددی نفوذ گلوله در هدف بتنی

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی مدل RHT در شبیه‌سازی رفتار بتن در برابر ضربه و نفوذ از داده‌های آزمایشگاهی که به وسیله‌ی هاناکاک و همکاران [۴] منتشر شده است استفاده شد. در اینجا از بتن با مقاومت محدود نشده 48 MPa برای اعتبار سنجی استفاده شده است. در آزمایش‌ها پرتابه‌های فولادی با دماغه اجابو و 3CRH با قطر $25/4 \text{ mm}$ و جرم 0.5 kg و با سرعت برخورد 300 m/s تا 1000 m/s در برابر اهداف بتن مسلح به ابعاد $178 \text{ mm} \times 610 \text{ mm} \times 610$ شلیک شده است. نتایج این آزمایش‌ها شامل سرعت باقیمانده پرتابه و آسیب پس از آزمایش در سطح جلویی و پشتی هدف است. پارامترهای مدل RHT و معادله حالت $P-\alpha$ - آن از کتابخانه نرم افزار اتوداین استفاده شده است. همچنین به دلیل تغییر شکل زیاد بتن در اثر برخورد نفوذ کننده، کرنش فرسایش هندسی 200% برای آن در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های (۸) و (۹) آمده است. همان‌گونه که قابل ملاحظه است می‌توان مشاهده کرد که موافقت خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. سرعت باقیمانده در لحظه خروج برابر 600 m/s به دست آمد. با توجه به نتیجه آزمایشگاهی این سرعت که برابر 615 m/s است، نتیجه به دست آمده دارای $2/5\%$ خطا، و نشان دهنده دقت بالای نتایج است.

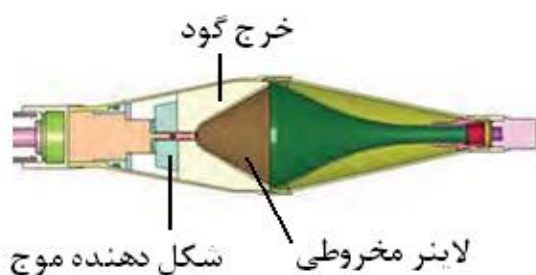


شکل ۸- مقایسه آسیب بوجود آمده در سطح جلویی پس از برخورد به

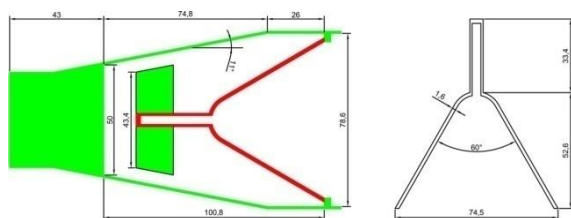
سطح بتن ($V_s = 749 \text{ m/s}$) [۴]

۲-۳- شبیه سازی عددی موضوع پژوهش

کاربرد مهمات خرج گود در ابتدا به اهداف زرهی محدود بود، در عین حال از این سلاح در برابر سازه‌های بتنی نیز استفاده شد. در نتیجه بسته به اهداف مختلف، باید برای تعیین اثر مطلوب روی اهداف، طراحی خرج گود انجام شود. مصالح استفاده شده فلز لاینر و هندسه مورد نیاز آن، مشخصات جت را تعیین می‌کند، که آثار مختلفی روی اهداف مختلف دارد. شکل ۱۲ شماتیکی و شکل (۱۳) ابعاد قسمت‌های مختلف از سرجنگی سلاح RPG - 7 را نشان می‌دهد.



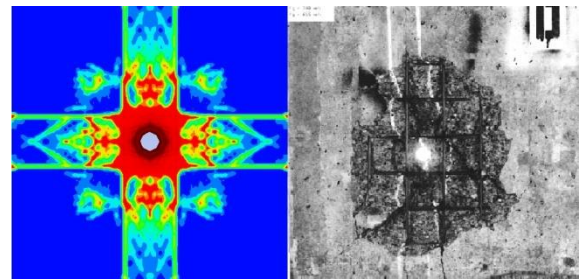
شکل ۱۲- شماتیکی از سرجنگی RPG - 7



شکل ۱۳- ابعاد قسمت‌های مختلف سرجنگی سلاح RPG - 7 (اعداد بر حسب میلیمتر)

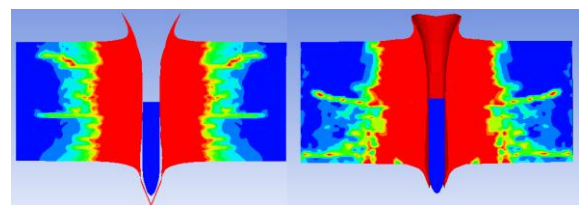
۲-۱-۱ شبیه سازی عددی تشکیل جت RPG - 7

همان‌گونه که در ابتدای قسمت ۳ به تفصیل بیان شد، به منظور شبیه سازی تشکیل جت حاصل از خرج سلاح RPG 7 - از المان‌های اویلری با توجه به تغییر شکل‌های زیاد المان‌ها استفاده می‌شود و همچنین به منظور کاهش زمان محاسبات هوا مدل‌سازی نمی‌شود. در شکل ۱۴ نمایی از مدل شبیه سازی شده دو بعدی به صورت متقارن سرجنگی سلاح RPG - 7 نشان داده می‌شود. در شبیه سازی انجام شده از پارامترهای مصالح بیان شده در قسمت (۱-۳-۱) برای



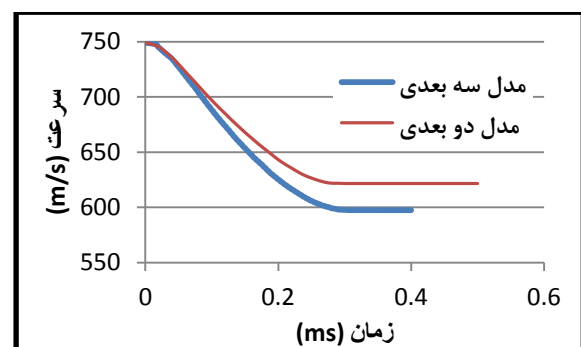
شکل ۹- مقایسه آسیب بوجود آمده در سطح پشتی پس از برخورد به سطح بتن ($V_s = 749 \text{ m/s}$) [۴]

با توجه به اینکه در شبیه سازی نفوذ جت حاصل از خرج گود در هدف از مدل دو بعدی متقارن محوری استفاده شده و در اینجا از مدل سه بعدی برای صحت سنجی نتایج استفاده کرده‌ایم لازم است نتایج را با مدل دو بعدی متقارن محوری نیز مقایسه کنیم بنابراین در ادامه تمامی مراحل گذشته که برای شبیه سازی سه بعدی انجام گرفته بود برای مدل دو بعدی نیز انجام گرفت و نتایج خوبی بدست آمد و نشان داد که هماهنگی خوبی بین نتایج دو بعدی و سه بعدی وجود دارد به گونه‌ای که سرعت باقیمانده گلوله برابر با 620 m/s به دست آمد (شکل ۱۰).



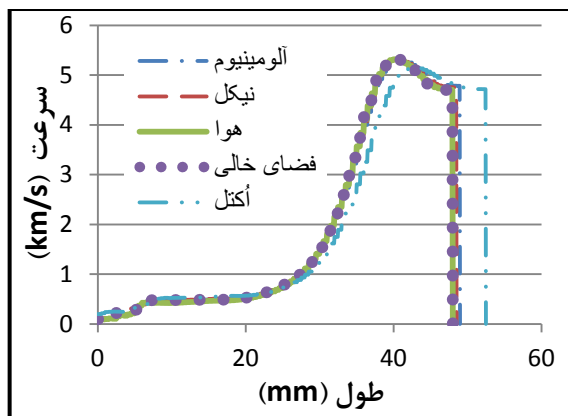
شکل ۱۰- مقایسه نتایج دو بعدی و سه بعدی نفوذ پس از $350 \mu\text{s}$

نمودار شکل ۱۱ تغییرات سرعت گلوله را نسبت به زمان، برای دو مدل دو بعدی و سه بعدی نشان می‌دهد.



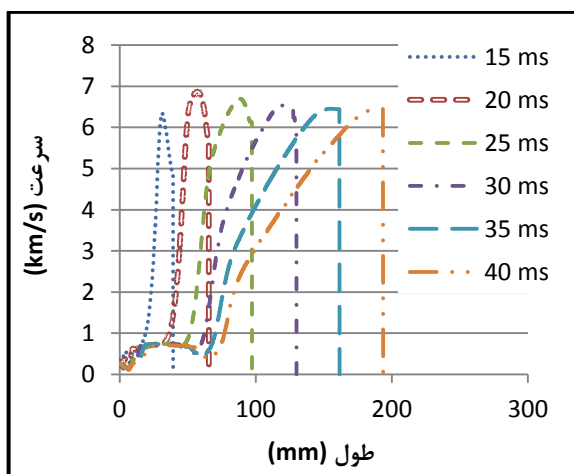
شکل ۱۱- مقایسه تغییرات سرعت خروج گلوله برای مدل‌های دو بعدی و سه بعدی

زیادی در پروفیل سرعت نداشته و تنها نبود ماده منفجره در محل شکل دهنده موج باعث افزایش سرعت نوک جت می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه در کتابخانه نرم افزار اتوداین پارامترهای پلاستیک وجود ندارد، در این مقاله به جای پلاستیک از آلومینیوم استفاده شده است.



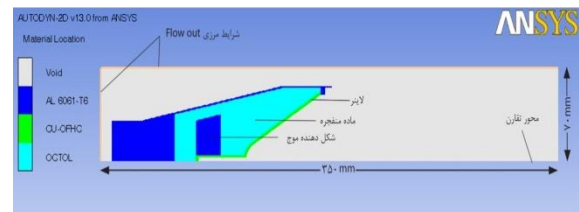
شکل ۱۷- اثر نوع مصالح شکل دهنده موج بر پروفیل سرعت در محور مرکزی در لحظه $20 \mu s$

در شکل ۱۸ پروفیل سرعت محور مرکزی جت در لحظات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که قابل مشاهده است در لحظه $30 \mu s$ بیشینه سرعت جت به قسمت نوک آن منتقل می‌شود. و در ادامه نیز سرعت جت تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

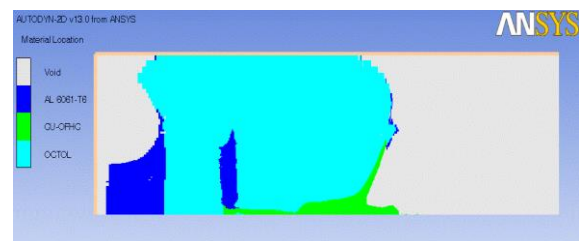


شکل ۱۸- نمودار پروفیل سرعت محور مرکزی جت

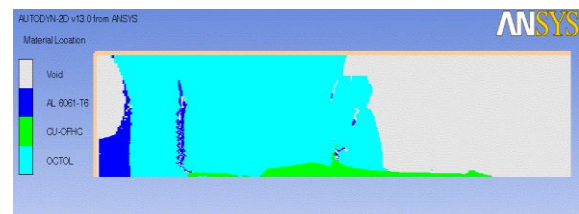
سرجنگی ۷ - RPG نیز استفاده شده است. مراحل مختلف تشکیل جت حاصل از خرج گود، در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ میکروثانیه پس از شروع انفجار به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) دیده می‌شود.



شکل ۱۴- شماتیکی از مدل شبیه‌سازی شده سرجنگی ۷ - RPG



شکل ۱۵- لحظه $20 \mu s$ پس از شروع انفجار



شکل ۱۶- لحظه $40 \mu s$ پس از شروع انفجار

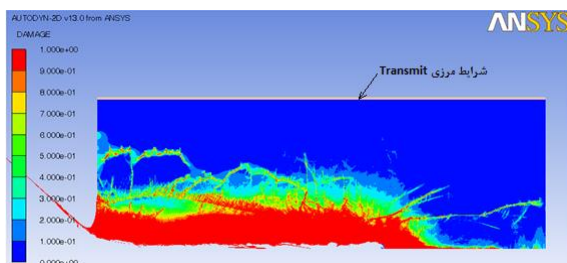
همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود قطعه درپوش^۱ به عنوان یک شکل دهنده موج عمل می‌کند. اثر وجود یا عدم وجود این قطعه پلاستیکی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است تنها در صورت استفاده از خرج اکتل در محل شکل دهنده موج، پروفیل سرعت تغییر کرده و مقدار بیشینه سرعت کاهش و مقدار طول کشیدگی جت افزایش می‌یابد و با استفاده از هر نوع ماده دیگری به غیر از ماده منفجره شامل آلومینیوم، نیکل، هوا و حتی فضای خالی، پروفیل سرعت تغییر نمی‌کند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جنس ماده به کار رفته در شکل دهنده موج تأثیر

مدل‌های مصالح به کار رفته به منظور شبیه سازی نفوذ در جدول ۵ آمده است:

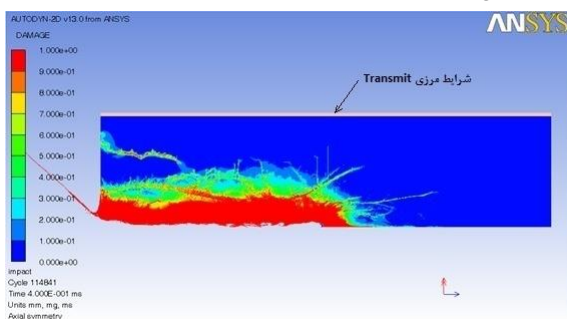
جدول ۵- مدل‌های مصالح و معادله حالت بکار رفته در مدل

فرسایش هندسی	مدل مقاومت	معادله حالت	مصالح	
٪۶۰۰	Steinberg - Guinan	Shock	Cu - OFHC	جت
٪۲۰۰	RHT	RHT	بتن ۳۵ MPa	هدف

دیده شد که در ضخامت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر جت هدف بتنی را سوراخ کرد و در هدف بتنی با ضخامت ۵۰۰ میلی‌متر مقدار سرعت جت در لحظه خروج تقریباً برابر صفر به دست آمد. شکل‌های ۲۲ و ۲۳، نفوذ جت را در اهداف بتنی با ضخامت‌های ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر در زمان $400\mu s$ پس از شروع نفوذ، نشان می‌دهد. در این شکل‌ها به دلیل تقارن، فقط نیمی از هدف نشان داده شده است. در هر دو ضخامت، نفوذ تقریباً برابر 500 mm است، و تفاوت آن تنها در آسیب وارد شده به وجه پشت هدف است.

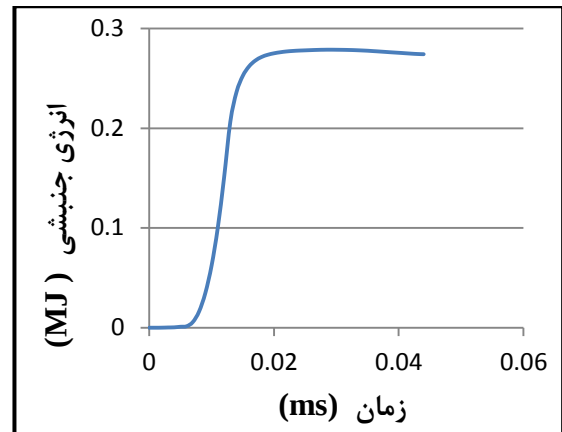


شکل ۲۱- نفوذ جت در هدف بتنی با ضخامت 750 mm



شکل ۲۲- نفوذ جت در هدف بتنی با ضخامت 1000 mm

نمودارهای ۲۴ و ۲۵ تغییرات سرعت نفوذ با عمق نفوذ و همچنین مقدار عمق نفوذ با زمان و شکل ۲۶ تغییرات فشار

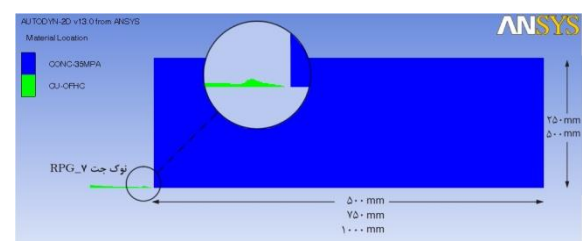


شکل ۱۹- نمودار تغییرات انرژی جنبشی لایر مسی نسبت به زمان تشکیل آن

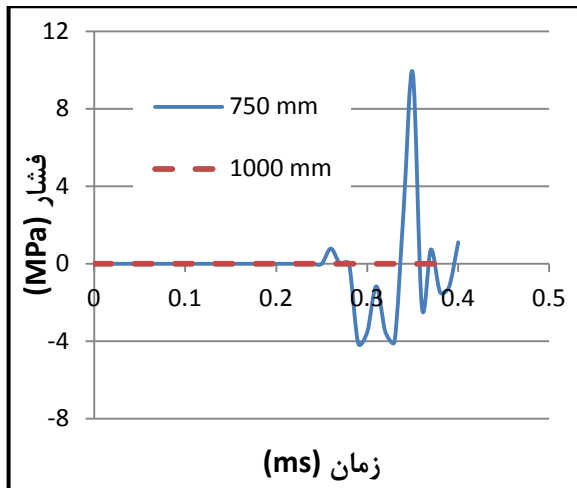
از شکل ۱۹ می‌توان نتیجه گرفت که در لحظه $30\mu s$ انرژی جنبشی لایر به بیشینه خود می‌رسد و همچنین تغییرات انرژی جنبشی آن از ۲۰ تا ۴۰ میکرو ثانیه تقریباً ثابت است.

۳-۱-۱ شبیه سازی نفوذ جت به داخل هدف بتنی

همان‌گونه که در قسمت (۳-۲-۱) نیز بیان شد تنها قسمت نوک جت به مدل جدید نگاشته شد. همچنین با توجه به کلیه شبیه سازی‌هایی که در مراجع این مقاله وجود دارد، اعم از اهداف فولادی و بتنی، برای شبیه سازی جت و هدف از المان‌های 0.5 میلی‌متری استفاده شد. شکل ۲۱ نمایی از شبیه سازی انجام شده در نرم افزار اتوداین را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است به منظور بررسی تأثیر ضخامت هدف در میزان نفوذ جت، از ضخامت‌های ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین ابعاد هدف برابر 500 mm است که به دلیل تقارن، تنها نیمی از هدف شبیه سازی شد و در خصوص شرایط تکیه گاهی نیز از شرایط مرزی انتقال دهنده موج^۱ در لبه‌های خارجی هدف استفاده شده است.



شکل ۲۰- نفوذ جت سلاح RPG-7 در هدف بتنی



شکل ۲۶- مقایسه فشار رسیده به وجه پشتی هدف در ضخامت‌های ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد ونگ و همکاران روابط تجربی زیر را برای محاسبه قطر دهانه و عمق نفوذ جت خرج گود در هدف بتنی به دست آوردند [۵].

$$P = -331.2 + 263.6 V - 20.2 V^2 \quad (۴)$$

$$D = 260.7 + 80.6 V - 17.8 V^2 \quad (۵)$$

در این روابط (P) عمق نفوذ، (D) قطر دهانه و (V) سرعت نوک جت است. جدول ۶ مقایسه‌ای از نتایج حاصل از رابطه تجربی و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. مقادیر رابطه تجربی از روابط تجربی ارائه شده به وسیله ونگ و همکاران و سرعت ۶۵۰۰ m/s نوک جت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی تعیین شده است.

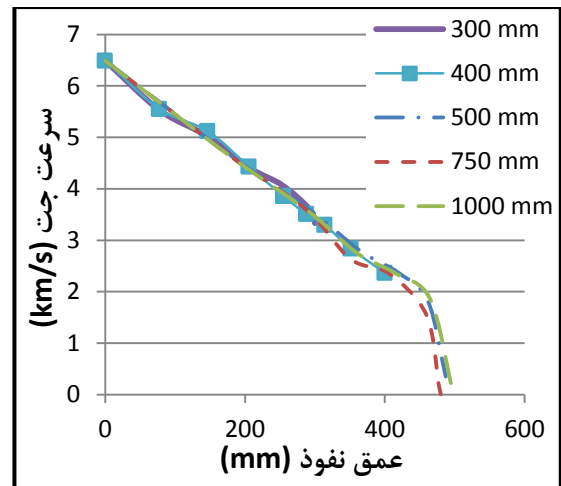
جدول ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با رابطه تجربی

رابطه تجربی	شبیه‌سازی عددی	
عمق نفوذ	۵۰۰ mm	۵۲۸ mm
قطر دهانه حفره	۳۵/۵ mm	۳۲/۵ mm

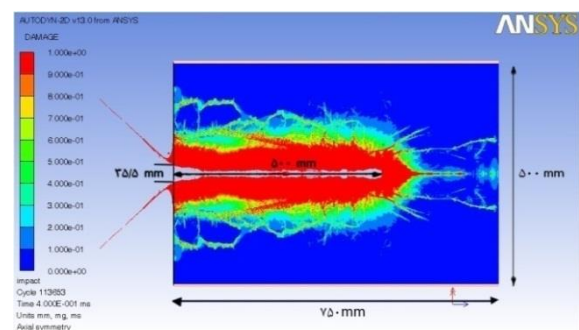
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی نفوذ جت حاصل از خرج گود سلاح ۷ - RPG در هدف بتنی، ابتدا با استفاده از

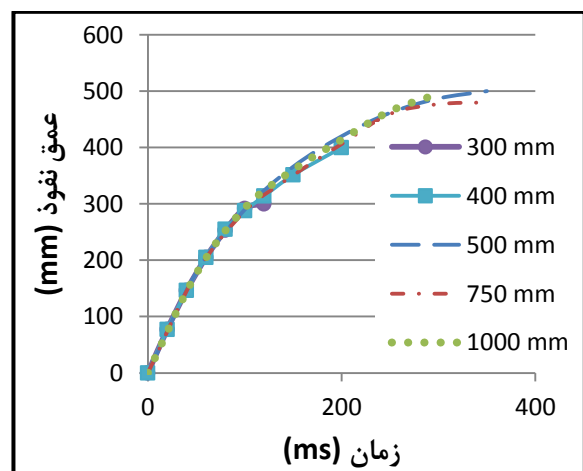
وارد شده به وجه پشتی هدف را برای ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲۳- نمودار سرعت جت در برابر عمق نفوذ برای پنج ضخامت مختلف هدف



شکل ۲۴- نمایش عمق نفوذ و قطر دهانه حفره حاصل از شبیه‌سازی



شکل ۲۵- نمودار تغییرات عمق نفوذ نسبت به زمان برای پنج ضخامت مختلف

۲ مراجع

- [1]- Chen Wang, Tianbao Ma, Jianguo Ning, Experimental investigation of penetration performance of shaped charge into concrete targets, *Acta Mech Sin* 24:345-349, 2008
- [2]- Steven, L. Hancock, An extension of the umin model for cutoff of high precision jets, *International Journal of Impact Engineering* 26, 289-298, 2001
- [3]- J. Bolstad, D. Mandell, Calculation of shaped charge jet using MESA-2D and MESA-3D hydrodynamic computer codes, *Los Alamos National Laboratory, New Mexico*, 1992
- [4]- S. J. Hanchak, M. J. Forrestal, E. R. Young, J. Q. Ehr Gott, Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths, *International Journal of Impact Engineering Vol. 12, No. 1*, 1992
- [5]- C. Y. Tham, Reinforced concrete perforation and penetration simulation using, *Finite Elements in Analysis and Design* 41, 1401-1410, 2005
- [6]- David Hasenberg, Consequences of coaxial jet penetration performance and shaped charge design criteria, naval postgraduate school Monterey, Department of Physics, 2010
- [7]- S. J. Hanchak, M. J. Forrestal, E. R. Young, J. Q. Ehr Gott, Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths, *International Journal of Impact Engineering Vol. 12, No. 1*, 1992
- [8]- Hansson, H. Skoglund, P. (2002), .Simulation of concrete penetration in 2D and 3D with the RHT model, *FOI- R- 0720-SE. Swedish Defence Research Agency, 51pp*
- [9]- Ansys 13.0, AUTODYN Users Manual, 2010

نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات از صحت شبیه سازی ها اطمینان حاصل شد. در بررسی ها و شبیه سازی های انجام گرفته مشخص شد که مدل RHT یک مدل کار آمد برای شبیه سازی بتن است که می توان با استفاده از آن میزان نفوذ جت حاصل از خرج گود را در اهداف بتنی تعیین نمود. در نهایت با انجام شبیه سازی ها و بررسی های مربوطه، نتایج زیر به دست آمد:

۱) سرعت نوک جت خرج گود در سلاح RPG - 7 با خرج اُکتل به 6500 m/s می رسد.

۲) مدل ماده RHT به خوبی می تواند رفتار بتن را تحت بارگذاری ضربه ای مدلسازی کند.

۳) با توجه به اینکه عمق نفوذ برای اهداف بتنی با ضخامت های ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی متر تقریباً یکسان و برابر ضخامت حدی هدف (۵۰۰mm) است، می توان نتیجه گرفت که ضخامت هدف بتنی، تأثیر چندانی بر عمق نفوذ جت خرج گود ندارد. تغییر ضخامت تنها باعث تغییر در آسیب وارد شده به وجه پشتی می شود.

۴) در صورت استفاده از بتن با مقاومت 35 MPa به عنوان مصالح سازه محافظ در برابر اصابت جت خرج گود سلاح RPG - 7، می توان گفت؛ ضخامت 1000 mm ایمنی کامل، ضخامت 750 mm وقوع پدیده اسپالینگ در وجه پشتی و تأمین ایمنی نسبی و در نهایت ضخامت 500 mm کمینه ایمنی را برای نیروی انسانی و تجهیزات تأمین خواهد کرد که بر اساس درجه اهمیت سازه، می توان ضخامت مورد نیاز را تعیین کرد.

۵) با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، با نتایج حاصل از یک رابطه تجربی که هماهنگی بسیار خوبی را نشان دادند، مشخص می شود که عامل سرعت جت در تعیین میزان عمق نفوذ و شعاع حفره، بسیار مؤثر است.

۶) در این مقاله نتایج به دست آمده بر اساس بتن با مقاومت 35 MPa است و پیشنهاد می شود در ادامه کار، اثر مقاومت بتن بر میزان نفوذ مورد بررسی قرار گیرد.

ضمائم:

پارامترهای معادله حالت $P - \alpha$ و مدل مصالح RHT در شبیه‌سازی بتن با مقاومت ۳۵ MPa:

پارامترهای معادله حالت $P - \alpha$ برای بتن با مقاومت ۳۵ MPa [۹]

پارامتر	بتن معمولی با مقاومت ۳۵ MPa
G_{el} (GPa)	۱۶/۷
f_c (MPa)	۳۵
f_t / f_c	۰/۱۰
f_s / f_c	۰/۱۸
A_{fail}	۰/۰
B_{fail}	۱/۶۰
N_{fail}	۰/۶۱
$Q_{2.0}$	۰/۶۸۰۵
BQ	۰/۰۱۰۵
$G_{el} / (G_{el} - G_{pl})$	۲
$f_{t,el} / f_t$	۰/۷۰
$f_{c,el} / f_c$	۰/۵۳
Cap option	Active
B_{fric}	۱/۶
N_{fric}	۰/۶۱
α	۰/۰۳۲
δ	۰/۰۳۶
D_{RHT1}	۰/۰۴
D_{RHT2}	۱
$\epsilon_{min}^{failure}$	۰/۰۱
ShratD	۰/۱۳

پارامتر		بتن معمولی با مقاومت ۳۵ MPa
$\rho_{Porous,0}$	(kg/m ³)	$2/314 \times 10^3$
$C_{B,Porous}$	(m/s)	۳۰۰۰
p_{crush}	(MPa)	۲۳/۳
p_{lock}	(MPa)	۶۰۰۰
$n_{p-\alpha}$	(kg/m ³)	۳
$\rho_{Matrix,0}$	(kg/m ³)	$2/75 \times 10^3$
A_1	(GPa)	۳۵/۲۷
A_2	(GPa)	۳۹/۵۸
A_3	(GPa)	۹/۰۴
B_0		۱/۲۲
B_1		۱/۲۲
T_1	(GPa)	۳۵/۲۷
T_2	(GPa)	۰
T_{Ref}	(K)	۳۰۰
C_V	(J/kgK)	۶۵۴

Numerical simulation of shaped charge Jet formation and penetration in the reinforced concrete targets

A.Heidarian.Kh¹, Gh. Dehghani. A.^{2*}

1. masters, Expert studies of safety, Directorate General for Disaster Management Isfahan

2. Assistant Professor, Malek Ashtar University

ghdeas@yahoo.com

Abstract:

Shaped charges are explosive devices with a high penetration capability and are used for both civilian and military purposes. In civilian applications shaped charge devices are used in demolition works, oil drilling and mining. In the military applications, shaped charges are used against different kinds of armors and Protective Structures. Analysis of forming and penetration of shaped charge projectiles issue is so complex that include explosion of charge, propagation of the shock wave in the charge, hitting the shock wave to the liner, liner deformation, projectile formation and finally striking projectile to target until it stops. According to the complexity of Behavior of the concrete during the Penetration of the Jet, the material models should be able to model the effect to large deformation, high hydrostatic pressure, high strain rate and failure. Although there are many references about Numerical simulation of shaped charge Jet in the armor targets, however it was not found any comprehensive sources about penetration of shaped charge in the reinforced concrete targets. Experimental results suggest that both kinetic energetic projectile and shaped charge are capable of destroying concrete targets, but the magnitudes of damage due to them are different. Compared with a kinetic energy projectile, a shaped charge has more significant effect of penetration into the target, and causes very large spalling area. In this paper, AUTODYN software was used to numerical simulation of shaped charge jet formation and target penetration. Different solver and modeling alternatives of AUTODYN were evaluated for jet formation and penetration problems. Euler solver of the AUTODYN was used to jet formation simulations and Lagrange solver was used for penetration simulations and both models were 2D axisymmetric. To simulate the penetration performance of the RPG – 7 charge, both the jet and the target were modeled by Lagrangian elements. The results of jet formation simulations, performed by the Euler solver were used to determine the properties of the jet. Penetration simulations were performed for a fixed 2 CD standoff distance. The jet material distribution obtained by the Euler solution at 2 CD standoff distance was mapped onto the Lagrange solver. The quality of this Euler-to-Lagrange mapping was limited to the mesh resolution of the Lagrangian jet part. The first goal of this research is presentation of a reliable method to numerical simulation of Penetration of shaped charge of RPG – 7 into the concrete targets by use of available software tools. Therefore, simulation results were compared to the experimental results in three stages that include the jet formation, jet Penetration in armor targets and behavior of concrete target against Penetration. The second goal is determination of the safe thickness of conventional concrete targets against the Penetration of RPG – 7 weapon and investigation of the behavior of this concrete type of target in terms of penetration depth, hole diameter and failure of the front and rear surfaces of the target.

Keywords: Shaped charge , Jet formation , penetration, concrete target