



Numerical Analysis of Reactive Shaped Charges with Bimetallic Liner into Discrete Layer Steel Target

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mehmannavaz H.¹ PhD,
Liaghat G.H.^{*2} PhD,
Nabakhteh M.A.³ MSc,
Fazeli H.⁴ PhD,
Rouhbakhsh M.⁴ MSc,
Heidari A.⁵ MSc

How to cite this article

Mehmannavaz H, Liaghat G.H, Nabakhteh M.A, Fazeli H, Rouhbakhsh M, Heidari A. Numerical Analysis of Reactive Shaped Charges with Bimetallic Liner into Discrete Layer Steel Target. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):171-179.

¹Applied Designing Department, Mechanical Engineering Faculty, Sciences and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

²Applied Designing Department, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Tehran University, Tehran, Iran

⁴New Manufacturing Technologies Department, University Complex of Materials & Manufacturing Technology Faculty, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

⁵Applied Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, Amir Kabir University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Nasr Bridge, Jalal-Al-Ahmad Street, Tehran, Iran

Phone: +98 (21) 82883387

Fax: +98 (21) 82883387

ghlia530@modares.ac.ir

Article History

Received: November 14, 2018

Accepted: May 4, 2019

ePublished: January 01, 2020

ABSTRACT

Recently the use of reactive shaped charges with bimetallic liners are taken into consideration to increase destruction quality in water environments. In this research, according to the results of a series of valid experimental results, the analysis of a reactive shaped charge with a bimetallic liner made of copper-aluminum liner has been numerically verified. In this verification, a suggested theory for the cutoff velocity of bimetallic liners has been used to calculate the cutoff velocity. The amount of penetration depth using a numerical solution is in good agreement with the experimental value. These results have been compared with the values obtained from the analytical solution. Finally, the behavior of the shaped charge with bimetallic liner has been compared with a single metallic liner using the same target geometry in both and it has been shown that the overall penetration quality such as depth, diameter and the profile of reactive shaped charge with a bimetallic liner was found to be better than the single metal liner.

Keywords Reactive Shaped Charge; Bimetallic Liner; Penetration Cutoff Velocity; Numerical Analysis

CITATION LINKS

[1] Jet formation experiments and computations with a Lagrange code [2] Fundamentals of shaped charges [3] Analysis of liner effect on shaped charge penetration into thick concrete targets [4] Penetration in granite by shaped charge liners of various metals [5] Investigation of performance of anti structure tandem projectiles in to the concrete targets by numerical and experimental method [6] A Method for designing shaped charges with increasing efficiency and penetrability [7] Experimental testing of bimetallic and reactive shaped charge liners [8] Penetration research of jacketed jet into concrete [9] The formation and stretching of bi-material shaped charge jets [10] Theoretical modelling of shaped charges in the last two decades (1990-2010): A review [11] Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge [12] Study of water entry of high-speed projectile [13] Reactive-injecting follow-through shaped charges from sequent-material conical liners [14] Effects of materials on formation of double-layered liners shaped charges [15] Numerical analysis of shaped charge bimetallic liners effects on diameter and depth of penetration into steel targets [16] Theoretical and numerical analysis of non-homogeneous layers through explosive shaping [17] Manufacture of copper cone shell using electroforming process and investigation of effective parameters on the process using numerical simulation [18] Improved analytical shaped charge code: Basc [19] A jet penetration model incorporating effects of compressibility and target strength [20] Comparison of Steinberger and Johnson-cook model in simulation of the behavior of metals under the influence of blast waves. Modares Technical and Engineering [21] Theory of jet formation by charges with lined conical cavities [22] Equation of state and strength properties of selected materials

تحلیل عددی خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی در مواجهه با هدف فولادی گسسته

حسین مهران‌نواز PhD

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

غلامحسین لیاقت PhD

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمدامین نباخته MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

حمید فاضلی PhD

گروه فناوری های نوین ساخت، مجتمع مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

محسن روح‌بخش MSc

گروه فناوری های نوین ساخت، مجتمع مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

علی حیدری MSc

گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک)، تهران، ایران

چکیده

اخیراً استفاده از خرج گودهای واکنشی با آستری دوجنسی برای افزایش قدرت تخریب به خصوص در محیط‌های آبی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با توجه به شرایط یک نمونه آزمایشی معتبر و موجود در مقالات، تحلیل عددی یک خرج گود واکنشی با آستری مس-آلومینیوم صحت‌سنجی شده است. در این صحت‌سنجی برای محاسبه میزان سرعت قطع نفوذ از یک تئوری پیشنهادی برای قطع نفوذ جت دوجنسی استفاده شده است. نتایج به دست آمده از عمق نفوذ در شبیه‌سازی عددی و تجربی تطابق قابل قبولی دارد. لازم به ذکر است این نتایج با مقادیر به دست‌آمده از حل تحلیلی نیز مقایسه شده‌اند. نهایتاً پس از آن مقایسه‌ای میان خرج گود واکنشی دوجنسی و خرج گود تک‌جنسی با هندسه یکسان صورت گرفته و نشان داده شده است که در اهداف فولادی گسسته لایه‌ای در محیط آب، میزان مشخصه‌های تخریب خرج گود با آستری دوجنسی، شامل عمق نفوذ، قطر حفره و مقطع عرضی نفوذ، از نتایج بهتری نسبت به آستری‌های تک‌جنسی برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: خرج گود واکنشی، آستری دوجنسی، سرعت قطع نفوذ، شبیه‌سازی عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴

*نویسنده مسئول: ghlia530@modares.ac.ir

۱- مقدمه

خرج گودها عموماً به شکل استوانه توخالی ساخته می‌شوند. در بخش توخالی، لایه‌ای فلزی به نام آستری قرار دارد. تاکنون آزمایش‌های متنوعی انجام شده تا اثربخشی بهتر آستری مخروطی یا نیم‌کره، نسبت به آستری مسطح را نمایش دهد. با انفجار چاشنی و سپس مواد منفجره، آستری تغییر شکل داده و به شکل نیزه درمی‌آید و با سرعت زیادی به هدف نزدیک می‌شود. آستری تغییر شکل یافته روی محور تقارن را جت می‌نامند. در مواردی سرعت نوک جت پس از شکل‌گیری به حدود 10 km/s می‌رسد [1]. خرج گودها برای اهداف نظامی و غیرنظامی مورد استفاده قرار

می‌گیرند [2]. در اهداف غیرنظامی می‌توان برای تخریب زمین، معادن، ساخت تونل و استخراج نفت از آن‌ها استفاده کرد. در موارد نظامی نیز برای تخریب تجهیزات زرهی دشمن، موانع بتنی و ذخایر سوختی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در هر دو مورد میزان تخریب خرج گود اهمیت دارد. میزان تخریب با عمق، قطر دهانه و شکل مقطع عرضی نفوذ سنجیده می‌شود. نوع ماده منفجره، جنس و هندسه آستری، جنس هدف و فاصله قرار از موارد تعیین‌کننده در میزان تخریب خرج گود هستند.

از جمله تأثیرات جنس آستری بر نفوذ این است که برخی از فلزات، عمق نفوذ بیشتر و برخی دیگر قطر دهانه بزرگ‌تری در هدف ایجاد می‌کنند. دشتیان‌گرمی و همکاران [3] عمق نفوذ و قطر دهانه را برای آستری‌های مس و آلومینیوم مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند میزان تخریب خرج گود با آستری آلومینیومی در اهداف بتنی از خرج گود با آستری مسی بیشتر است. همچنین کالیا [4] در پژوهش خود با آزمایش روی اهداف گرانی، میزان عمق نفوذ و قطر دهانه آن را برای آستری با جنس‌های مختلف بررسی کرده است. او نشان داده میزان عمق نفوذ برای آستری با جنس برنج از آلومینیوم بیشتر است، درحالی که قطر دهانه حفره آن کمتر است.

دشتیان‌گرمی و همکاران [5] با اجرای شبیه‌سازی و آزمایش تجربی خرج گود دومرحله‌ای با آستری مسی روی اهداف بتنی، میزان عمق نفوذ و قطر دهانه را محاسبه کرده‌اند و نشان داده‌اند در حالتی که قبل از نفوذگر اصلی یک خرج گود در هدف نفوذ می‌کند، سرعت باقی‌مانده نفوذگر اصلی بعد از تخریب هدف بیشتر خواهد بود.

مهدیان و همکاران [6] نشان دادند آستری با جرم غیریکنواخت، به‌گونه‌ای که چگالی نوک آن کمتر از قاعده باشد، میزان تخریب بیشتری نسبت به آستری با جرم یکنواخت دارد؛ یعنی جنس و حتی توزیع جرمی آستری، تأثیر مستقیم روی قطر دهانه و عمق نفوذ دارد. بنابراین لزوم و انگیزه استفاده از آستری‌های دوجنسی برای استفاده از نقاط قوت هر یک از فلزات سازنده آستری و پوشش نقاط ضعف دیگری مورد توجه قرار گرفته است.

خرج گود واکنشی که دارای آستری دوجنسی است، با هدف ایجاد اندرکنش مواد فلزی جاری حاصل از آستری خرج گود با محیط آبی اطراف، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از موادی چون آلومینیوم و تیتانیوم در آستری می‌تواند تأثیر مثبتی در عملکرد خرج گود زیر آب داشته باشد. افزایش قطر حفره نفوذ، افزایش سرعت رشد حفره و افزایش فشار و ضربه در آب برای یک جت آلومینوم-تیتانیوم از جمله موارد افزایش بازدهی در این نوع خرج گود است. البته استفاده از این نوع خرج گود به‌عنوان سرچنگی در اهداف هوایی و همچنین استخراج نفت نیز مورد توجه قرار گرفته است [7].

یکی از مهم‌ترین پژوهش‌ها در رابطه با خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی را میسون [7] با انجام ۱۳ آزمایش انجام داده است. در این آزمایش‌ها از آستری تک‌جنسی مس و آلومینیوم و همچنین آستری دوجنسی مس-آلومینیوم استفاده شده است.

نوپین ساخت روش شکل‌دهی انفجاری است [16]. یکی دیگر از فرآیندهای نوپین در ساخت آستری روش الکتروفرمینگ است که با بهینه‌سازی ساختار میکروسکوپی و اتصال جدانشدنی میان دو آستری منجر به افزایش عمق نفوذ در هدف می‌شود [17].

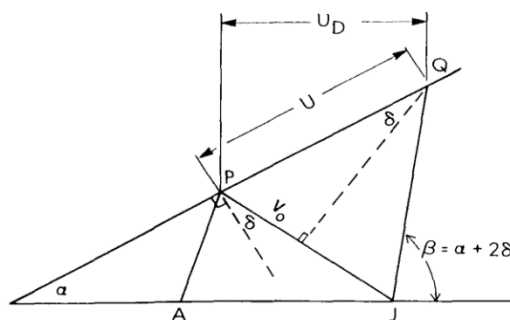
هدف از این پژوهش، بررسی مزایای خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی در محیط آب نسبت به خرج گود تک‌جنسی است. در این پژوهش برخورد خرج گود با آستری دوجنسی مس-آلومینیوم در مواجهه با هدف فولادی با استفاده از نرم‌افزار اتوداین تحلیل شده و نحوه شکل‌گیری، نفوذ و نتایج آن با آزمایش عملی میسون [7] مقایسه می‌شود. در این فرآیند زمان مناسب برای توقف حل عددی به‌دست آمده است. در نهایت، با مقایسه نتایج خرج گود با آستری تک‌جنسی مسی و آلومینیومی مزایای خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی مس-آلومینیوم آشکار می‌شود.

۲- تئوری

۲-۱- مدل تشکیل جت

برای شبیه‌سازی تحلیلی فرآیند تشکیل جت، تئوری‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به مخروطی‌بودن آستری خرج گود در این پژوهش، تئوری تعمیم‌یافته پری برای شبیه‌سازی شکل‌گیری جت حاصل از آن بسیار مناسب است. در تئوری پر، موج انفجار به‌صورت صفحه‌ای در نظر گرفته شده و در مدل اصلاح‌شده آن، اثرات شروع نقطه انفجار نیز در نظر گرفته شده است. هندسه حاکم بر این مدل‌سازی در شکل ۱ آمده است. سرعت جت در مدل پر، طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود [2].

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



شکل (۱) مدل هندسی فرآیند تشکیل جت [2]

در رابطه (۱)، V_0 سرعت فروپاشی، α زاویه بین مماس بر آستری در نقطه X 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 [2].

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

در رابطه (۲)، U_D سرعت انفجار ماده منفجره و $\epsilon(x)$ زاویه بین شعاع حامل موج انفجار و سطح آستری است که روی سطح آستری محاسبه می‌شود. همچنین در این حالت با فرض ثابت‌بودن مقدار

ثبات و همکاران [8] در پژوهشی دیگر اثر آستری دوجنسی را در مواجهه با هدف بتنی ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها از خرج گود با آستری شیپورهای استفاده کرده‌اند. درحالی که آستری آن از جنس مس بوده و از پوشش آلومینیوم استفاده شده و لایه‌ای که در تماس با مواد منفجره است، مس است. سرانجام با بررسی نفوذ ایجادشده در بتن با استفاده از حل عددی و آزمایش عملی، نشان داده‌اند که آستری دوجنسی در مقایسه با آستری تک‌جنسی دارای قطر دهانه بزرگتر و مقطع عرضی بهتر است.

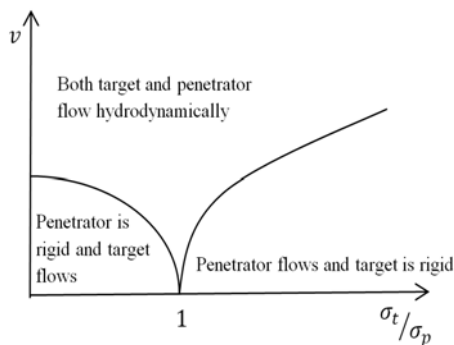
کورتیس و همکاران [9] با استفاده از تئوری ون‌مایز و فرض‌هایی مثل خطی‌بودن تغییرات سرعت جت از نوک تا انتهای آن و همچنین غیرلزج‌بودن ماده تشکیل‌دهنده جت بعد از انفجار، توانسته‌اند فرآیند تشکیل جت با آستری دوجنسی را به لحاظ تئوری تحلیل کنند و در نهایت نمودار فشار براساس شعاع را در جت به‌دست آورند.

هسنبرگ [10] نیز در پژوهش خود آستری‌های دوجنسی گوناگون را با هندسه‌های مختلف مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که خرج گود با آستری دوجنسی آلومینیوم-تیتانیوم نسبت به حالت تک‌جنسی آلومینیوم و تیتانیوم، دارای عمق نفوذ بیشتری است. ژانگ و کیائو [11] در تحقیق خود اثر دوجنسی‌کردن آستری بر زاویه فروپاشی و سرعت نوک جت را بررسی کرده و نشان داده‌اند که دوجنسی‌کردن، سبب افزایش پارامترهای مذکور خواهد شد. همچنین با مقایسه مقطع عرضی حفره نفوذ، تأثیر دوجنسی‌شدن آستری بر افزایش عمق نفوذ و قطر دهانه را نشان داده‌اند. شیمامورا و اوتساکا [12] خرج گودی با آستری مخروطی را در مواجهه با هدف فولادی در محیط آبی آزمایش کرده و ضمن بررسی شکل جت در زمان‌های مختلف، مطابقت نتایج حل عددی و آزمایش عملی را نشان داده‌اند.

اسکیلینگ [13] عملکرد خرج گود با آستری تک‌جنسی مس و دوجنسی مس-آلومینیوم در اهداف فولادی را با هم مقایسه کرده است. در حالت آستری دوجنسی نیز، دو حالت جوش‌خورده و وصل‌شده برای دو ماده تشکیل‌دهنده آستری با هم مقایسه شده‌اند. در این پژوهش نشان داده شده که زمان گسست آستری در حالت جوش‌خورده به تعویق افتاده و طول جت بیشتر خواهد شد. ژنگ و همکاران [14] تشکیل جت خرج گود با آستری دولایه را با استفاده از حل عددی و آزمایش عملی تحلیل کرده و مطابقت بین آن‌ها را نشان داده‌اند.

مهمان‌نواز و همکاران [15] با بررسی عملکرد خرج گود با آستری دولایه مس و آلومینیوم به روش عددی و تحلیلی نشان داده‌اند که در اهداف فولادی قطر دهانه حفره ایجادشده نسبت به آستری تک‌جنسی آلومینیومی بیشتر است. همچنین آن‌ها نشان داده‌اند که عمق نفوذ در مقایسه با آستری تک‌جنسی مسی نیز افزایش داشته است.

روش ساخت آستری نیز در میزان عمق نفوذ آستری دوجنسی و نحوه اتصال آنها به یکدیگر بسیار اثرگذار است. یکی از روش‌های



نمودار (۱) نمودار سرعت قطع نفوذ در مدل هیدرودینامیکی [2]

۲-۳-۲- رابطه هریسون برای سرعت قطع نفوذ

هریسون [18] عمق نفوذ را براساس روابط زیر به دست آورده است. در این روابط سرعت قطع نفوذ نقش دارند. 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. این روابط برحسب پیوستگی جت در هنگام نفوذ به سه شکل ارائه می‌شود.

الف) جت در حالتی که پیوسته است به هدف نفوذ می‌کند [18]:

$$P(T) = Z_0 \left[\left(\frac{T}{t_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} - 1 \right] \quad (7)$$

در این رابطه $P(T)$ مقدار عمق نفوذ در زمان T ، Z_0 فاصله قرار به علاوه فاصله ارتفاع مخروط آستری، t_0 زمان طی کردن فاصله قرار توسط جت هستند. همچنین γ از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

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

ب) جت در حالتی که ازهم‌گسیخته شود به هدف نفوذ می‌کند:

$$P = (1 + \gamma)(V_{j,0}t_1)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} Z_0^{\frac{1}{\gamma+1}} - \sqrt{\gamma(\gamma+1)Vt_1(V_{j,0}t_1)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} Z_0^{\frac{1}{\gamma+1}} - Z_0} \quad (9)$$

در این رابطه $V_{j,0}$ سرعت نوک جت، t_1 زمان گسست جت از لحظه عملکرد چاشنی و V سرعت قطع نفوذ است.

ج) جت قبل از اینکه به هدف نفوذ کند، ازهم‌گسیخته شده باشد:

$$P = \gamma[V_{j,0}t_1 - \sqrt{Vt_1(V_{j,0}t_1 + \frac{Z_0}{\gamma})}] \quad (10)$$

که در رابطه بالا P عمق نفوذ نهایی است.

۳-۳-۲- سرعت قطع نفوذ براساس رابطه برنولی

همچنین سرعت قطع نفوذ براساس رابطه برنولی با در نظر گرفتن مقاومت دینامیکی هدف (که به شکل سیال درآمده) از رابطه زیر قابل محاسبه است [19]:

$$\frac{1}{2}\rho_t U_{min}^2 + Y_t = \frac{1}{2}\rho_j (V - U_{min})^2 \quad (11)$$

در این رابطه، Y_t مقاومت دینامیکی هدف و U_{min} حداقل سرعت نفوذ هیدرودینامیکی نامیده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Y_t = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \times (1 + \ln \frac{\sqrt{3} \times E}{(5-4\theta) \times \gamma}) \quad (12)$$

$$U_{min} = \sqrt{\frac{2Y_t}{\rho_j}} \quad (13)$$

V_0 داریم: $\beta = \alpha + 2\delta$ و از آن، رابطه (۲) به شکل رابطه (۳) درمی‌آید [15]:

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

۲-۲- مدل نفوذ هیدرودینامیکی

برای محاسبه مقدار عمق نفوذ می‌توان از تئوری هیدرودینامیکی نفوذ 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 صرف نظر نمود. با این فرضیات می‌توان معادله برنولی را مورد استفاده قرار داد و در نهایت به رابطه (۴) رسید [2].

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

در رابطه (۴)، L طول جت، ρ_j چگالی ماده جت و ρ_t چگالی ماده 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 می‌شود [2].

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

اگر جت به شکل پیوسته نفوذ کند مقدار l ، ۱ و اگر کاملاً ازهم‌گسیخته شده باشد مقدار آن ۲ خواهد بود. در حالت‌های بینابینی هم از مقادیر بین ۱ تا ۲ استفاده می‌شود.

۲-۲-۱- مدل تعمیم یافته پیشنهادی برای نفوذ آستری دوجنسی

به عنوان مدل پیشنهادی، می‌توان برای یافتن عمق نفوذ در خرج گود با آستری دوجنسی، از مدل تعمیم یافته زیر استفاده کرد. این رابطه مشابه رابطه (۶) است، با این تفاوت که به جای چگالی جت، از میانگین چگالی‌های دو جنس به کاررفته در آستری استفاده می‌کنیم.

$$P = L \sqrt{l \frac{(\rho_{j1} V_1 + \rho_{j2} V_2) / (V_1 + V_2)}{\rho_t}} \quad (6)$$

در این رابطه، ρ_{j1} و ρ_{j2} به ترتیب چگالی دو فلز به کاررفته در آستری و V_1 و V_2 سرعت نوک مواد تشکیل دهنده جت هستند.

۳-۲- سرعت قطع نفوذ

۱-۳-۲- تئوری نفوذ میله‌ای

سرعت قطع نفوذ، سرعت جت در لحظه‌ای است که دیگر قابلیت نفوذ در هدف را از دست داده است. محاسبه سرعت قطع نفوذ برای صحت سنجی محاسبه با حل گره‌های عددی اهمیت بسزایی دارد. زیرا با استفاده از سرعت قطع نفوذ می‌توان میزان نهایی عمق نفوذ را اندازه گیری کرد. در تئوری نفوذ میله‌ای [2] برای سرعت‌های متفاوت برخورد میله به هدف سه حالت متفاوت در نظر گرفته شده است که در حالت اول، میله صلب باقی می‌ماند، درحالی که هدف جاری می‌شود. در حالت دوم، میله و هدف هر دو جاری می‌شوند. در حالت سوم میله جاری می‌شود، درحالی که هدف صلب باقی‌مانده است، یعنی نفوذی اتفاق نیفتاده است. نمودار این سه حالت براساس نسبت مقاومت دینامیکی هدف به میله و همچنین سرعت میله در نمودار ۱ آمده است. مرز ناحیه‌ای که در آن هدف صلب باقی می‌ماند در حقیقت تعیین کننده سرعت قطع نفوذ هیدرودینامیکی است.

تحلیل عددی خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی در مواجهه با هدف فولادی گسسته ۱۷۵

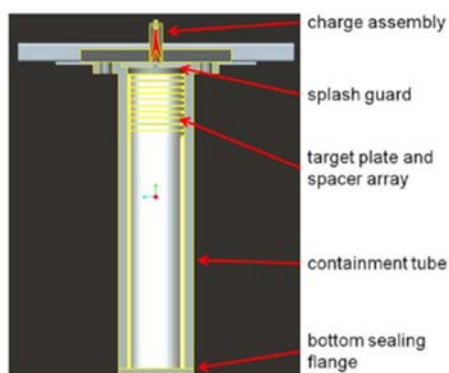
توضیح اینکه در هر سه مدل اجرا شده، فاصله قرار و همچنین فاصله بین اهداف گسسته لایه‌ای با آب پر شده است. مشخصه‌های مقاومتی ورق‌های فولادی هدف در جدول ۲ آمده است. هندسه هدف نیز در شکل ۲ آمده است.

جدول ۱) شرایط شبیه‌سازی‌های عددی

شماره	۱	۲	۳
هدف از شبیه‌سازی	محاسبه عمق آستری دوجنسی	دریافت مزایای آستری دوجنسی	
قطر خرج	۲۰/۰۲ mm		
جنس آستری	مس- آلومینیوم	مس	آلومینیوم
جنس هدف	فولاد A1011		
ضخامت هر لایه	۱/۹۹ mm		
فاصله بین هر لایه	۱۲/۷ mm		
فاصله قرار	۵۵/۲۸ mm		

جدول ۲) مشخصه‌های فولاد به‌کاررفته در هدف

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۱۹۰ GPa
تنش تسلیم	۲۰۰ MPa
تنش نهایی	۳۳۰ MPa



شکل ۲) هندسه هدف فولادی گسسته لایه‌ای در حل‌های عددی [۱۷]

۳-۳-۳ مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اتوداین

مدل‌سازی هر یک از حل‌های عددی شامل دو قسمت تشکیل جت و فرآیند نفوذ بوده است؛ یعنی در هر یک از آن‌ها ابتدا مدل‌سازی و اجرای حل عددی برای تشکیل جت انجام شده و سپس نتایج در بخش مدل‌سازی نفوذ، نگاشت شده است. در شکل ۳ هندسه خرج گود قابل مشاهده است. در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ می‌توان فرآیند شکل‌گیری جت، حذف ماده پوسسته از تحلیل پس از تثبیت میزان انرژی نقاط آستری، نگاشت هدف در برابر جت و فرآیند نفوذ را مشاهده نمود. در شکل ۶ نیز فرآیند نفوذ جت در لایه‌های فولادی هدف قابل مشاهده است. ابعاد شبکه به‌کاررفته و تعداد المان‌های به‌کاررفته در حل عددی در جدول ۳ مشاهده می‌شود. همچنین معادله حالت و مدل مقاومتی هر یک از مواد به‌کاررفته در شبیه‌سازی در جدول ۴ آمده است.

همچنین در این روابط E و Y و ν به‌ترتیب تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ماده هدف هستند.

۳-۳-۲ مدل تعمیم‌یافته پیشنهادی برای سرعت قطع نفوذ

از آنجا که چگالی ماده نفوذکننده عامل اصلی در نفوذ است، برای خرج گود با آستری دوجنسی، می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه سرعت قطع نفوذ برای آستری دوجنسی استفاده کرد.

$$V_{j,min} = \frac{\rho_{j1} \times V_{j1,min} + \rho_{j2} \times V_{j2,min}}{\rho_{j1} + \rho_{j2}} \quad (15)$$

در این رابطه $V_{j,min}$ سرعت قطع نفوذ جت دوجنسی و $V_{j1,min}$ و $V_{j2,min}$ سرعت قطع نفوذ مواد به‌کاررفته در آستری هستند.

۳-۳-۱ تحلیل عددی

۱-۱-۳ محاسبه سرعت قطع نفوذ

هدف این بخش از پژوهش، تحلیل عددی یک خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی و یافتن مزایای آن نسبت به خرج گود با آستری تک‌جنسی است. تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار اتوداین انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین متغیرها در حل عددی، سرعت قطع نفوذ است، زیرا در این سرعت باید حل عددی متوقف شده و میزان نفوذ اندازه‌گیری شود.

براساس روابط (۷، ۹ و ۱۰) همان‌طور که ذکر شد سرعت قطع نفوذ براساس رژیم جت، سرعت اولیه جت، زمان گسست و عمق نفوذ محاسبه می‌شود. با توجه به در اختیار نداشتن متغیرهای مذکور مثل زمان گسست و سرعت اولیه جت، برای محاسبه سرعت قطع نفوذ از رابطه (۱۱) یا همان رابطه برنولی استفاده شده است. با استفاده از این رابطه برای آستری مس و آلومینیوم جداگانه مقدار سرعت قطع نفوذ محاسبه شده و در پایان، سرعت قطع نفوذ برای آستری دوجنسی آلومینیوم-مس از رابطه پیشنهادی (۱۴) پیش‌بینی می‌شود.

با استفاده از رابطه (۱۱) سرعت قطع نفوذ برای دو آستری تک‌جنسی مس و آلومینیوم به‌ترتیب مقادیر 1290 m/s و 2940 m/s محاسبه شده است. حال با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده، مقدار سرعت قطع نفوذ آستری دوجنسی از رابطه پیشنهادی (۱۴) برابر با 1674 m/s به‌دست آمده است.

۳-۳-۲ شرایط مدل‌سازی

سه حل عددی در این پژوهش انجام شده است که خلاصه شرایط آن‌ها در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که هر سه حل عددی به روش اویلری دوبعدی انجام شده است. ردیف ۱ از جدول ۱ مورد صحت‌سنجی قرار گرفته و نتایج آن با آزمایش تجربی پژوهش انجام‌شده توسط میسون [۱۷] مقایسه شده است. همچنین برای دریافت مزایای خرج گود با آستری دوجنسی نسبت به خرج گود با آستری تک‌جنسی، خرج گود با آستری تک‌جنسی مسی و آلومینیومی با هندسه مشابه در برخورد با همان هدف نیز شبیه‌سازی شده‌اند که شرایط این شبیه‌سازی‌ها در ردیف‌های ۲ و ۳ از جدول ۱ آمده است.

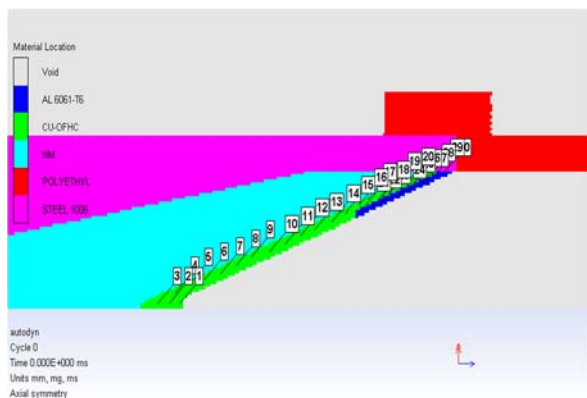
جدول ۴) مدل مقاومت و معادله حالت استفاده شده برای مواد مختلف

ردیف	ماده	کاربرد	مدل مقاومت	معادله حالت
۱	مس	آستری	استینبرگ-گینان	شاک [10]
۲	آلومینیوم	آستری	استینبرگ-گینان [20]	شاک [10]
۳	فولاد	پوسته	جانسون کوک	شاک [10]
۴	فولاد	هدف	ون‌مایرز	شاک [20]
۵	آب	ماده پرکننده بین لایه‌ها و فاصله قرار	----	شاک [12]
۶	نیترومتان	ماده منفجره	----	جی-دابل‌یو-ال [21]
۷	پلی‌اتیلن (پوستر)	نگهدارنده خرج	----	شاک

۳-۴- اجرای حل عددی

۳-۴-۱- کاهش مدت زمان حل

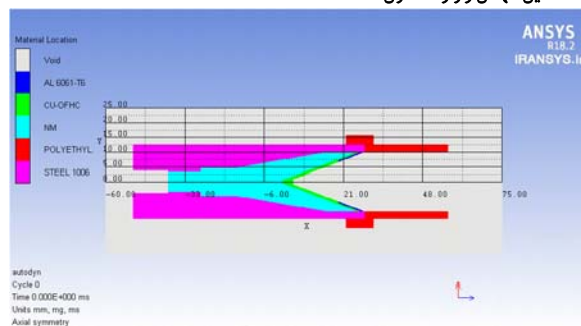
یکی از موارد مهم در اجرای حل عددی، مدت زمان لازم برای اجرای حل می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود. در جهت کاهش آن بعد از اینکه جت تشکیل شد، همه مواد جز حذف تشکیل‌دهنده آستری را حذف می‌کنیم. معیار مناسب برای حذف به موقع مواد، زمانی است که آستری، انرژی لازم را از ماده منفجره کسب کرده باشد. بنابراین با قراردادن تعدادی اندازه‌گیر متحرک روی آستری و بررسی نمودار سرعت برحسب زمان، به محض اینکه سرعت اندازه‌گیرها ثابت شد، می‌توان مواد دیگر از جمله پوسته، ماده منفجره و نگهدارنده خرج را حذف کرد [10]. نقاط انتخاب شده برای اندازه‌گیری سرعت را در شکل ۷ می‌توان دید، با توجه به نمودار نمودار ۲ بعد از زمان $20\mu s$ تقریباً سرعت اندازه‌گیرها ثابت شده و همه مواد به جز آستری حذف شده‌اند.



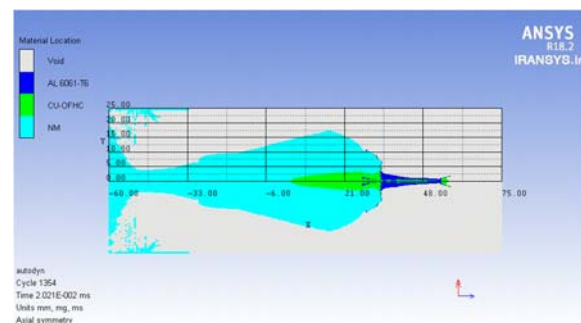
شکل ۷) نقاط انتخاب شده روی آستری برای اندازه‌گیری سرعت نقاط مختلف جت

۳-۴-۲- مدل مقاومتی

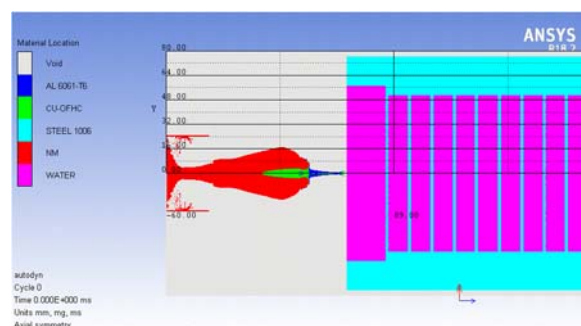
بعد از تشکیل جت، به دلیل فشار بسیار زیاد اعمالی، ماده آستری به شکل مایع درآمده و می‌توان از مقاومت آن صرف نظر نموده [1] و مدل مقاومتی آن را خاموش کرد. این کار در کاهش مدت زمان حل اثرگذار است. بدین منظور ضریب کسر انرژی را قبل از تشکیل کامل جت ۵٪ و بعد از تشکیل جت صفر در نظر می‌گیریم.



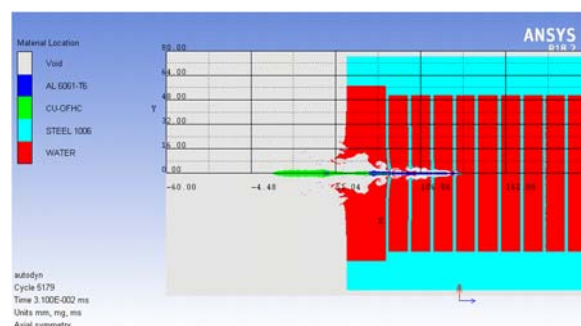
شکل ۳) نمای کلی از هندسه خرج گود



شکل ۴) فرآیند تشکیل جت آستری دوجنسی و حذف پوسته و مواد انفجاری



شکل ۵) آغاز فرآیند نفوذ آستری دوجنسی در مواجهه با هدف گسسته لایه‌ای

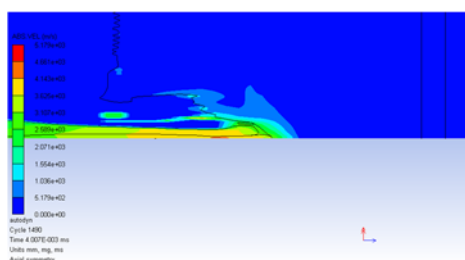


شکل ۶) فرآیند نفوذ آستری دوجنسی در مواجهه با هدف گسسته لایه‌ای

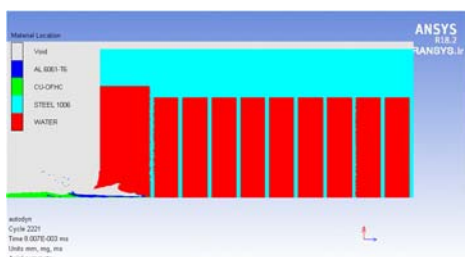
جدول ۳) شبکه‌بندی شبیه‌سازی‌های عددی

حل عددی	ابعاد کوچک‌ترین سلول	
	نفوذ	تشکیل جت
اندازه المان‌ها (mm × mm)	۰/۴×۰/۱	۰/۱×۰/۲
تعداد المان‌ها	۳۱۳۴۴۵	۵۰۴۹۶

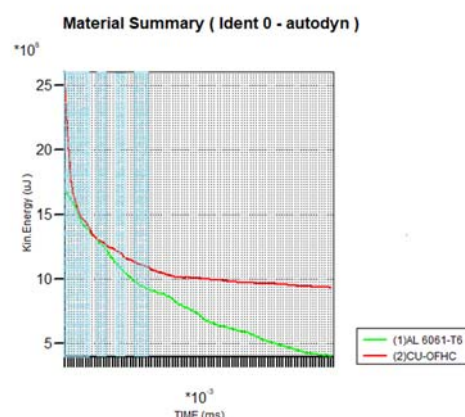
ماییل رخ خواهد داد که منجر به اصطکاک شدید آب با جت خواهد شد. شوک مایل ایجاد شده در آب در فاصله قرار در شکل ۸ مشخص است. همان طور که مشاهده می شود ناحیه سبز رنگ (قبل از شوک) سرعت بیش از سرعت صوت و در ناحیه آبی رنگ (بعد از شوک) سرعت کمتر از سرعت صوت است. طبق شکل ۹ حدود $8 \mu s$ طول می کشد تا جت فاصله قرار پر شده از آب تا رسیدن به لایه اول فولاد را طی کند. طبق نمودار ۳ در این فاصله مس و آلومینیوم هر یک به ترتیب حدود ۴۴ و ۱۷٪ از انرژی خود را از دست داده اند. همچنین کاهش انرژی جنبشی جت در لایه های بعدی آب در نمودار ۳ مشخص شده است. در نمودار ۳، لایه های آب با رنگ آبی مشخص شده است.



شکل ۸ تغییرات سرعت در آب و شوک مایل در آن

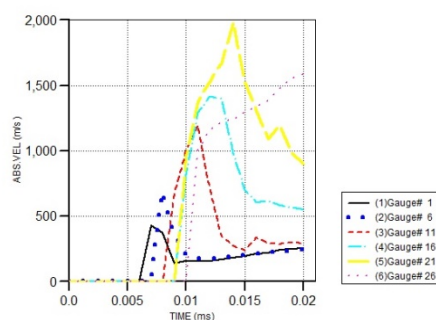


شکل ۹ لحظه رسیدن جت به لایه اول هدف



نمودار ۳ کاهش انرژی جنبشی در ۴ لایه آب

یکی دیگر از مواردی که درباره قطر لایه ها قابل ذکر است، این است که قطر لایه اول و دوم در آزمایش عملی تقریباً برابر است. البته در شبیه سازی عددی حتی قطر حفره لایه دوم از لایه اول بیشتر است. این موضوع می تواند نشان دهنده این باشد که جت تا لحظه رسیدن به لایه دوم همچنان در حال شتاب گیری است. بنابراین با افزایش



نمودار ۲ تغییرات سرعت اندازه گیرها روی آستری براساس زمان

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت سنجی

با لحاظ سرعت قطع نفوذ به دست آمده در قسمت ۳-۱، میزان عمق نفوذ برای آستری دوجنسی مس- آلومینیوم (ردیف ۱ از جدول ۱) برابر با $8/76 \text{ mm}$ به دست می آید که در مقایسه با مقدار آزمایش عملی [7] که میزان آن $7/98 \text{ mm}$ است، دارای ۱۰٪ خطا است. همچنین قطر دهانه به دست آمده در آزمایش عملی [7] در هر یک از لایه های فولادی با میزان آن در حل عددی در جدول ۵ مقایسه شده است.

جدول ۵ مقایسه نتایج حل عددی و آزمایشگاهی [7] خرج گود دوجنسی

حل عددی (mm)	عمق نفوذ				قطر دهانه نفوذ در ورق ها	
	۱	۲	۳	۴	۳	۴
۸/۷۶	۴/۶	۶/۲	۳/۸	۲/۸	۳/۴۹	۲
۷/۹۸	۵/۴۳	۵/۰۴	۳/۴۹	۲		

مقدار عمق نفوذ با استفاده از رابطه پیشنهادی ۶ با استفاده از طول جت و سرعت مواد تشکیل دهنده آن نیز برابر با $46/7 \text{ mm}$ محاسبه شده است. لازم به ذکر است که طول جت و مقادیر سرعت مواد تشکیل دهنده جت قبل از برخورد با هدف از شبیه سازی عددی استخراج شده اند. همان طور که مشخص است این مقدار از مقدار آزمایش عملی و همچنین حل عددی بسیار بزرگتر است که می تواند به دلایل زیر باشد:

رابطه برنولی با در نظر گرفتن فرض هایی صادق است که در اینجا به طور کامل برقرار نیستند. این فرض ها عبارت اند از: پایابودن فرآیند نفوذ از نظر زمانی، صرف نظر کردن از اصطکاک و لزجت جت و همچنین حرکت در راستای خطوط حرکت سیال.

این رابطه برای نفوذ در اهداف پیوسته ارائه شده است، در حالی که در نفوذ در اهداف گسسته مقدار عمق نفوذ بسیار کمتر است. مهم ترین دلیل آن این است که هر بار که جت از لایه ای عبور می کند، آن را خم می کند و بخش زیادی از انرژی خود را از دست می دهد. این موضوع در شکل ۶ کاملاً مشخص است.

حضور آب در فضای بین لایه ها می تواند باعث افت سرعت جت باشد. به خصوص با توجه به اینکه سرعت صوت در آب حدود 1500 m/s است، با عبور جت با سرعت حدود 4700 m/s در آب شوک

فاصله قرار به اندازه فاصله بین دو لایه متوالی (یعنی ۱۲/۷mm) می‌تواند کیفیت تخریب هدف افزایش یابد.

۲-۴- مقایسه نتایج حل عددی خرج گود واکنشی دارای آستری دوجنسی با خرج گود دارای آستری تک‌جنسی

برای ارزیابی عملکرد خرج گود با آستری دوجنسی، ردیف ۲ و ۳ هم مشابه با هندسه ردیف ۱ از جدول ۱ و با آستری تک‌جنسی مس و آلومینیوم اجرا شده است که نتایج آن در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶) مقایسه میزان عمق نفوذ و قطر حفرة در لایه‌های هدف به‌وسیله خرج گود دوجنسی و تک‌جنسی در شبیه‌سازی عددی

ردیف	آستری	عمق نفوذ (mm)	قطر دهانه (mm)			
			ورق ۱	ورق ۲	ورق ۳	ورق ۴
۱	مس- آلومینیوم	۷/۹۶	۴/۶	۶/۲	۳/۸	۲/۸
۲	مس	۸/۳۶	۷/۸	۵/۴	۶/۲	۲/۸
۳	آلومینیوم	۴/۳۸	۹	۶/۴	-	---

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که میزان عمق نفوذ آستری تک‌جنسی مسی در اهداف فولادی لایه‌ای در آب از دوجنسی مس- آلومینیوم و تک‌جنسی آلومینیومی به‌ترتیب به میزان ۵ و ۹۰٪ بیشتر است. ولی قطر دهانه در هر یک از لایه‌ها در خرج گود آلومینیومی از نتایج بهتری برخوردار است. در نگاه کلی می‌توان مشاهده نمود که آستری دوجنسی مس- آلومینیوم دارای نفوذ بالایی نسبت به آستری آلومینیومی است. در عین حال دارای قطر دهانه نفوذ بالایی در لایه‌های هدف می‌باشد. یعنی میزان نفوذ آستری دوجنسی در حدود آستری مسی و میزان قطر دهانه در حدود آستری آلومینیومی است.

۵- نتیجه‌گیری

خرج گود واکنشی با آستری دوجنسی برای اهداف زیر آب طراحی و استفاده می‌شود. در محاسبه عمق نفوذ از رابطه ۶ چون از نیروی پسای آب صرف نظر شده، این مقدار از مقدار به‌دست‌آمده از آزمایش عملی و حل عددی بیشتر است. این نشان می‌دهد که وجود آب بین لایه‌ها در اهداف لایه‌ای تأثیر بسزایی در میزان عمق نفوذ دارد. بنابراین با توجه به فزونی سرعت جت از سرعت صوت در آب، استفاده از معادله حالت شوک برای آب از نتایج مناسبی برخوردار است.

حذف المان مواد به‌کاررفته در خرج گود به غیر از آستری، پس از ثابت‌شدن میزان انرژی آستری و همچنین صرف نظر کردن از مدل مقاومت پس از تشکیل شدن کامل جت، تأثیر بسزایی در کاهش مدت زمان حل بدون آسیب به صحت نتایج دارد.

استفاده از رابطه ۱۱ که برای محاسبه سرعت قطع نفوذ در اهداف یک‌پارچه در محیط هوا ارائه شده‌اند، می‌تواند در اهداف گسسته لایه‌ای و در محیط‌های آبی هم نتایج منطقی داشته باشد.

تئوری اصلاح‌شده رابطه ۱۴ که برای آستری دوجنسی در این پژوهش پیشنهاد شده و حاصل میانگین‌گیری سرعت‌های قطع نفوذ هر یک

از جنس‌های آستری است، به نتیجه قابل قبولی انجامید. به‌طوری که میزان عمق نفوذ خرج گود با آستری دوجنسی در حل عددی در مقایسه با آزمایش تجربی خطای قابل قبولی دارد.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای آستری دوجنسی و تک‌جنسی می‌توان نتیجه گرفت که در اهداف فولادی گسسته لایه‌ای در محیط آب، اگرچه میزان عمق نفوذ آستری مسی و قطر دهانه آستری آلومینیومی بیشتر است، اما میزان تخریب خرج گود با آستری دوجنسی که از مجموع عمق، قطر و مقطع عرضی نفوذ حاصل می‌شود، از نتایج بهتری نسبت به آستری‌های تک‌جنسی برخوردار است. در واقع از نظر عمق نفوذ، آستری مسی و از نظر عمق دهانه نفوذ، آستری آلومینیومی بهتر هستند؛ ولی خرج گود با آستری دوجنسی علاوه‌بر اینکه عمق نفوذ نزدیک به آستری مسی را دارا است، در قطر دهانه لایه دوم نیز قطر نفوذ آن نزدیک به آستری آلومینیومی است. یعنی تقریباً ویژگی‌های مثبت هر دو آستری را دارا است.

۶- پیوست

مقدار متغیرهای مقاومتی مواد به‌کاررفته در آستری^[22]

نام ضریب	مس	آلومینیوم
Shear module (kPa)	۴/۷۷e۷	۲/۷۶e۷
Yield Stress (kPa)	۱/۲e۵	۲/۹e۵
Max. Yield Stress (kPa)	۶/۴e۵	۶/۸e۵
Hardening const.	۳۶	۱۲۵
Hardening exp.	۰/۴۵	۰/۱
dG/dP	۱/۳۵	۱/۸
dG/dT (kPa/K)	-۱/۷۹۸e۴	-۱/۷e۴
dY/dP	۰/۰۰۳۳۹۶	۰/۰۱۸۹۰۸
Melting Temp. (K)	۱/۷۹e۳	۱/۲۲e۳

پارامترهای مقاومتی فولاد به‌کاررفته در لایه‌های هدف^[22]

نام ضریب	جانسون- کوک
Shear Modulus (kPa)	۷e۸/۱۸۰۰۰۱
Yield Stress (kPa)	۵e۳/۵
Hardening Const.	۵e۲/۷۵
Hardening Exp.	۰/۳۶
Melting Temp (K)	۱۸۱۱
Strain Rate const.	۰/۰۲۲
Thermal Softening Exp.	۱
Ref. Strain Rate	۱
Strain Rate Correction	order۱

ضرایب معادله حالت شوک^[22]

نام ضریب	مس	آلومینیوم	فولاد
Gruneisen Coeff.	۲/۰۲	۱/۹۷	۶۷۰/۱
C ₁ (m/s)	۳/۹۴e۳	۵/۲۴e۳	۴۶۱۰
S ₁	۱/۴۸۹	$\frac{1}{4}$	۷۳۰/۱
Reference Temp. (K)	۳۰۰	۳۰۰	۰
Specific heat (J/kg.K)	۳۸۳	۸۸۵/۰۰۰۱۲۲	۰

تشکر و قدردانی: در پایان لازم است از زحمات و کمک‌های آقای

- stretching of bi-material shaped charge jets. AIP Conference Proceedings. 2012;1426(1):116-119.
- 10- Shekhar H. Theoretical modelling of shaped charges in the last two decades (1990-2010): A review. Central European Journal of Energetic Materials. 2012;9(2):155-185.
- 11- Zhang XF, Qiao L. Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2011;47(2):241-248.
- 12- Shimamura K, Ootsuka T. Study of water entry of high-speed projectile. Procedia Engineering. 2013;58:232-239.
- 13- Schilling TJ. Reactive-injecting follow-through shaped charges from sequent-material conical liners. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2007;32(4):307-313.
- 14- Zheng Y, Wang XM, Li WB, Yao WJ. Effects of materials on formation of double-layered liners shaped charges. Advanced Materials Research. 2009;79-82:1277-1280.
- 15- Mehmannaavaz H, Liaghat GH, Rahmati S, Najafi M, Fazeli H. Numerical analysis of shaped charge bimetallic liners effects on diameter and depth of penetration into steel targets. Aerospace Mechanics Journal. 2019;15(3):93-105. [Persian]
- 16- Bisadi H, Mehmannaavaz H. Theoretical and numerical analysis of non-homogeneous layers through explosive shaping. Scientific Journal of Energetic Materials. 2006;2(1):59-70. [Persian]
- 17- Heidari Pebdani H, Mehmannaavaz H, Liaghat G, Rahmati S, Fazeli H. Manufacture of copper cone shell using electroforming process and investigation of effective parameters on the process using numerical simulation. Metallurgical Engineering. 2018;21(3):198-206. [Persian]
- 18- Harrison JT. Improved analytical shaped charge code: Basc. Unknown city: US Army Ballistic Research Laboratory; 1981.
- 19- Flis WJ. A jet penetration model incorporating effects of compressibility and target strength. Procedia Engineering. 2013;58:204-213
- 20- Anbarlooei HR, Mazaheri K. Comparison of Steinberger and Johnson-cook model in simulation of the behavior of metals under the influence of blast waves. Modares Technical and Engineering. 2004;(17):11-19. [Persian]
- 21- Pugh EM, Eichelberger RJ, Rostoker N. Theory of jet formation by charges with lined conical cavities. Journal of Applied Physics. 1952;23(5):532-536.
- 22- Steinberg D. Equation of state and strength properties of selected materials. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory; 1991.

سیدحسین محمدی تشکر کنیم.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله با تلاش نویسندگان و بدون سوء استفاده از منابع دیگری نوشته شده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: حسین مهمان‌نواز (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ غلامحسین لیاقت (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۱۰٪)؛ محمدامین نباخته (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ حمید فاضلی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۵٪)؛ محسن روحبخش (نویسنده پنجم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪)؛ علی حیدری (نویسنده ششم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Van Theil M, Levatin J. Jet formation experiments and computations with a Lagrange code. Journal of Applied Physics. 1980;51(12):6107-6114.
- 2- Walters WP, Zukas JA. Fundamentals of shaped charges. Hoboken: Wiley; 1989.
- 3- Dashtian Gerami N, Liaghat GH, Rahimi Sharbaf Moghaddas GH, Khazraiyani N. Analysis of liner effect on shaped charge penetration into thick concrete targets. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017;39(8):3189-3201.
- 4- Kalia HN. Penetration in granite by shaped charge liners of various metals [Dissertation]. Rolla: University of Missouri Rolla; 1970.
- 5- Dashtian Gerami N, Liaghat GH, Rahimi Sharbaf Moghaddas GH, Khazraiyani N. Investigation of performance of anti structure tandem projectiles in to the concrete targets by numerical and experimental method. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(10):9-18. [Persian]
- 6- Mahdian A, Liaghat GH, Farzin M, Ghayour M. A Method for designing shaped charges with increasing efficiency and penetrability. Conference of Aerospace Society of Iran, 2011 March 1-3, Tehran, Iran. Tehran: Iranian Aerospace Society, Tarbiat Modarres University; 2011.
- 7- Mason JS. Experimental testing of bimetallic and reactive shaped charge liners [Dissertation]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign; 2010.
- 8- Xiao QQ, Huang ZX, Zu XD, Zhu CS. Penetration research of jacketed jet into concrete. International Journal of Impact Engineering. 2013;54:246-253.
- 9- Curtis JP, Smith FT, White A. The formation and