

تحلیل عددی تأثیر خرج گود با آستری دوجنسی بر قطر حفره و عمق نفوذ در اهداف فولادی

حسین مهمان نواز^۱، غلام حسین لیاقت^۲، صادق رحمتی^۳ و محمد نجفی^۴، حمید فاضلی^۵
 دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
 دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
 دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
 دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
 مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

یکی از اجزای اصلی به‌کار رفته در خرج گود، آستری می‌باشد که جنس آن تأثیر بسیار زیادی در عملکرد تشکیل جت و نفوذ دارد. در سال‌های اخیر پژوهش در زمینه اثر دوجنسی نمودن آستری‌ها در رفتار خرج گود اهمیت پیدا کرده است. در این مقاله، ابتدا فرآیند تشکیل جت و نفوذ در هدف فولادی، برای یک خرج گود مسی با استفاده از نرم‌افزار انسیس- اتوداین شبیه‌سازی عددی شده است. با استفاده از تئوری‌های پر تعمیم‌یافته برای تشکیل جت، و تئوری هیدرودینامیک برای نفوذ، حل تحلیلی صورت گرفته و آزمون عملی نیز برای خرج گود مسی انجام شده است. نفوذ حاصل از سه روش عددی، تجربی و تحلیلی تطابق خوبی را نمایش می‌دهند. سپس فرآیند شبیه‌سازی عددی فوق که صحت‌سنجی شده است برای دو خرج گود تک‌جنسی با آستری‌های نیکلی و آلومینیومی، و دو خرج گود با آستری دوجنسی مس- نیکل و مس- آلومینیوم ادامه یافته است. سرعت نوک جت، عمق نفوذ و قطر دهانه نفوذ از جمله مواردی هستند که میان آستری‌های تک‌جنسی و دوجنسی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه بین عملکرد خرج گودهای تک‌جنسی و دوجنسی، در شکل‌گیری جت و نفوذ در هدف فولادی نشان می‌دهد که دوجنسی نمودن آستری‌ها قطر حفره و عمق نفوذ را به‌طور هم‌زمان بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آستری دوجنسی، خرج گود، عمق نفوذ، قطر دهانه، سرعت نوک جت

Numerical Analysis of Shaped Charge Bimetallic Liners Effects on Diameter and Depth of Penetration into Steel Targets

H. Mehmannaavaz
Mechanical Electrical and Computer Engineering, Department, Sciences and Research branch, University of Islamic Azad, Tehran, iran

G.H. Liaghat
Faculty of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares

S. Rahmati and M. Najafi
Mechanical Electrical and Computer Engineering, Department, Sciences and Research branch, University of Islamic Azad, Tehran, iran

H. Fazeli
Faculty of Mechanical Engineering, University of Malek Ashtar University

(Received: 05/May/2018 ; Accepted: 09/October/2018)

ABSTRACT

One of the main important components which are used in the shaped charges is liner that its material has a considerable influence on the jet formation and penetration profile. In recent years, researches have focused on the analysis of the effect of bimetallic liners and their effective behavior. In this paper, at the first step, the process of jet formation and the penetration in the steel target is numerically simulated for a shaped charge with copper liner using the Ansys-Autodyn software. Analytical solutions have been done using generalized PER theory for jet formation and hydrodynamics theory for penetration; as well the experimental tests were performed with copper liner. The comparison of penetration profiles obtained from numerical, experimental and analytical methods showed a good agreement. Then, the validated numerical simulations were developed for two single-metal liners of nickel and aluminum, and two bimetallic copper-nickels, and copper-aluminum liners. Also, the results of jet tip velocity, penetration depth and crater diameter have been compared between single and bimetallic liners. Regarding to jet formation and penetration in steel target, the comparison between single and bimetallic liners results shows that the using bimetallic liners, improve crater diameter and depth of penetration simultaneously.

Keywords: Bi-metallic Liner, Shaped Charge, Penetration Depth, Crater Hole Diameter, Jet Tip Velocity

۱- دانشجوی دکتری: mehmannavaz2000@gmail.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): ghlia530@modares.ac.ir

۳- دانشیار: srahmati@srbiau.ac.ir

۴- دانشیار: m.najafi36@gmail.com

۵- دانشیار: hamidfaz2000@yahoo.com

۱- مقدمه

جنس و نیمه پایینی آن از جنسی دیگر ساخته شده است. شیلینگ [۲] در کار خود تأثیر آستری انفعالی ساخته شده از مس و آلومینیوم را در افزایش قطر حفره نفوذ مورد بررسی قرار داده است. همین‌طور در رابطه با این نوع از آستری‌ها، میسون [۳]، ۱۳ نوع آزمون مختلف را برای محاسبه میزان نفوذ جت برای آستری دوجنسی با ابعاد مختلف انجام داده است.

برخی از محققین نیز به مطالعه روش‌های آلیاژ مواد به‌منظور ساخت آستری‌های دوجنسی پرداخته‌اند. تای - فو و همکاران [۴]، از آلیاژ مس و تنگستن، یک آستری برای خرج گود ساخته‌اند و نفوذ آن را در یک هدف فولادی همگن، مورد آزمایش قرار داده‌اند. طبق نتایج آن‌ها مقدار نفوذ جت حاصل از این آستری، حدود ۱/۳ برابر آستری تک‌جنسی مسی بوده است که علت اصلی آن افزایش چگالی و زمان گسست جت آستری مس - تنگستن بوده است.

یو و همکاران [۵] در پژوهش خود، به بررسی تشکیل جت در یک خرج گود پرداخته‌اند که از دو آستری به هم چسبیده از فولاد و مس تشکیل شده است. آن‌ها نتایج تجربی خود را با نتایج عددی مورد مقایسه قرار داده و طبق نتایج آن‌ها، خواص مواد تشکیل‌دهنده آستری تأثیر زیادی در سرعت و شکل جت دارد. کرتیس و همکاران [۶]، به محاسبه میدان فشار و تنش در جت حاصل از یک آستری دوجنسی مس - آلومینیوم پرداخته‌اند. آن‌ها از معادله جریان پلاستیک لوی - میسز^۸ و معیار تسلیم فون - میسز^۹ در مدل‌سازی خود استفاده کرده‌اند. کیم و همکاران [۷]، با استفاده از فرآیند پاشش سرد، یک لایه نازک از آلومینیوم بر روی یک آستری مسی ایجاد نموده‌اند و بدین ترتیب یک آستری دوجنسی ساخته‌اند. هدف آن‌ها بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری جت حاصل از آستری مذکور بوده است که دوجنسی بودن آن منجر به بهبود خواص جت از جمله نرخ کرنش، تنش خستگی و چسبندگی می‌انجامد.

ژائو و همکاران [۸] اثر دوجنسی بودن یک آستری گنبدی شکل، در ایجاد قطر دهانه نفوذ بزرگ‌تر در اهداف بتنی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها لایه داخلی آستری (لایه

خرج گود از یک پوسته استوانه‌ای شکل حاوی ماده‌ی منفجره^۱ ساخته شده است که یک سمت آن مخروط فلزی به‌نام آستری^۲ و سمت دیگر آن چاشنی انفجاری^۳ قرار دارد. خرج گودها برای اهداف نظامی و غیرنظامی استفاده می‌شوند. در کاربردهای غیرنظامی خرج گودها در تخریب بناها، حفاری چاه‌های نفت و معادن استفاده می‌شوند. در کاربردهای نظامی، خرج گودها در برابر انواع مختلف زره و همچنین سازه‌های امن استفاده می‌شوند. دستیابی به عمق و قطر حفره نفوذ بیشتر، از جمله مواردی است که در بهینه‌سازی خرج گودها مورد توجه می‌باشد. بدین منظور تغییرات در پارامترهایی چون هندسه و جنس اجزای مختلف آن مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که آستری یکی از مهم‌ترین اجزای خرج گود محسوب می‌شود، تغییر ضخامت، زاویه رأس، قطر و جنس آن می‌تواند موجب بهبود عملکرد و تغییرات زیادی در رفتار جت تشکیل شده داشته باشد. در سال‌های اخیر ایده‌هایی مبنی بر ترکیب مواد مختلف به روش‌های گوناگون به‌منظور ساخت آستری‌هایی با قابلیت نفوذ بالا ظهور کرده‌اند. این آستری‌ها معمولاً دوجنسی یا دوفلزی^۴ نامیده می‌شوند که در آن‌ها دو لایه فلزی متفاوت با الگوهای مختلف به یکدیگر متصل می‌شوند.

در این راستا، والترز و گلاسکی [۱] با استفاده از روشی به‌نام اتصال پخشی^۵ دو لایه مس و نیکل را به‌صورت طبقه‌ای^۶ از بالای آستری تا پایین آن، به یکدیگر چسبانده‌اند و بدین ترتیب یک روش برای ساخت این نوع از آستری‌ها ارائه نموده‌اند. در نتایج آن‌ها آمده است که فرآیند فروریزش و تشکیل جت دوجنسی مس - نیکل، به‌علت شباهت رفتار مس و نیکل تحت بارگذاری شوک به یکدیگر، به‌خوبی جت‌های تک‌جنسی مسی و نیکلی می‌باشد.

نوع دیگری از آستری‌ها وجود دارند که به آستری‌های انفعالی^۷ مشهور هستند. در آن‌ها نیمه بالایی آستری از یک

- 1- High Explosive Material
- 2- Liner
- 3- Detonator
- 4- Bimetallic
- 5- Diffusion Bonding Technique
- 6- Stratified
- 7- Reactive

8- Levy Misses

9- Von Misses

۲-۱- مدل تشکیل جت

برای شبیه‌سازی تحلیلی فرآیند تشکیل جت تئوری‌های مختلفی وجود دارد. از آنجایی که آستری خرج گود در این پژوهش مخروطی شکل می‌باشد، تئوری تعمیم‌یافته پر^۲ برای شبیه‌سازی شکل‌گیری جت حاصل از آن بسیار مناسب می‌باشد [۱۰]. در تئوری پر، زاویه بین نوک آستری و ضخامت دیواره آن، ثابت فرض می‌شود. موج انفجار نیز به صورت صفحه‌ای در نظر گرفته شده و در مدل اصلاح شده آن، انحراف از آستری مخروطی و اثرات شروع نقطه انفجار نیز در نظر گرفته می‌شود. سرعت جت در این مدل، طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود.

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

در رابطه (۱)، V_0 سرعت فروپاشی، α زاویه بین مماس بر آستری در نقطه X و محور تقارن، β زاویه بین امتداد فروپاشی دیواره آستری و محور تقارن و δ زاویه تیلور می‌باشد که در مدل تعمیم‌یافته پر به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

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

در رابطه (۲)، U_D سرعت انفجار ماده منفجره و $\epsilon(x)$ زاویه بین شعاع حامل موج انفجار و سطح آستری می‌باشد، که روی سطح آستری محاسبه می‌شود.

۲-۲- مدل نفوذ

برای محاسبه مقدار عمق نفوذ نیز از تئوری هیدرودینامیکی^۳ نفوذ استفاده شده است که در آن استحکام هدف نادیده گرفته می‌شود [۱۰]. در اثر سرعت بسیار زیاد جت، فشار تولید شده در هنگام برخورد با هدف بسیار زیاد می‌باشد. به دلیل فشار بیش از حد که از تنش تسلیم ماده هدف به مراتب بالاتر است، می‌توان از استحکام و لزجت هدف و جت صرف‌نظر نمود که با این فرضیات می‌توان معادله برنولی را مورد استفاده قرار داد و در نهایت به رابطه (۳) رسید.

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (3)$$

متصل به ماده منفجره) را از جنس مس و لایه خارجی آن را از جنس آلومینیوم انتخاب و با استفاده از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار اتوداین^۱ به این نتیجه رسیده‌اند که این امر موجب افزایش قطر دهانه نفوذ نسبت به یک آستری تک‌جنسی مسی شده است. در ضمن آن‌ها نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌سنجی نموده‌اند. دانگ و همکاران [۹] پارامترهای حاصل از تشکیل جت، اعم از سرعت نوک جت، چگالی انرژی جنبشی و عملکرد نفوذ دو نوع آستری دوجنسی مس- و انادیوم را مورد آزمایش قرار داده‌اند. در آستری نوع اول، لایه داخلی و انادیوم و لایه خارجی مس و در آستری نوع دوم لایه داخلی مس و لایه خارجی و انادیوم می‌باشد. طبق نتایج آن‌ها سرعت نوک جت و مقدار چگالی انرژی جنبشی آستری نوع اول، بیشتر از نوع دوم می‌باشد؛ درحالی‌که عملکرد نفوذ جت آستری نوع اول بهتر از عملکرد جت آستری نوع دوم نبوده است.

در این مقاله، هدف بررسی تأثیر دوجنسی بودن آستری در سرعت نوک جت، عمق نفوذ و قطر حفره نفوذ می‌باشد. شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌گیری جت و نفوذ در هدف فولادی با نرم‌افزار اتوداین صورت گرفته و برای اطمینان از صحت نتایج عددی، ابتدا شکل‌گیری و نفوذ یک آستری تک‌جنسی مسی شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل با نتایج تحلیلی تئوری‌های تعمیم‌یافته پر برای تشکیل جت و تئوری هیدرودینامیک برای نفوذ مقایسه شده و تطابق مناسبی میان آن‌ها مشاهده شده است. پس از صحت‌سنجی روند شبیه‌سازی آستری مسی، خرج گودهای تک‌جنسی نیکلی و آلومینیومی و دو نوع آستری دوجنسی مس- نیکلی و مس- آلومینیوم، با همان فرآیند شبیه‌سازی تشکیل جت و نفوذ در هدف فولادی اجرا شده، و تأثیر دوجنسی بودن جت در شکل‌گیری و نفوذ در هدف فولادی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که دوجنسی بودن آستری، تأثیر بسزایی در افزایش سرعت نوک جت، عمق نفوذ و همچنین قطر حفره آن دارد.

۲- حل تحلیلی خرج گود

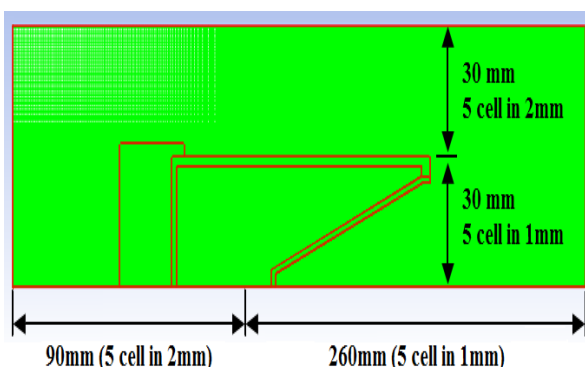
حل تحلیلی خرج گود، در دو بخش تشکیل جت و نفوذ مدل‌سازی شده و مورد بررسی دانشمندان قرار گرفته است.

2- Generalized PER Theory

3- Hydrodynamic Penetration Theory

1- AUTODYN

در فرآیند شبیه‌سازی از حل‌گر اوپلری و لاگرانژی استفاده شد. با توجه به مزایای روش اوپلری در زمان پردازش و نتایج مناسب در شبیه‌سازی فرآیند تشکیل جت و نفوذ در نرم‌افزار اتوداین [۱۲]، از حل‌گر اوپلری استفاده شد. برای شبیه‌سازی فرآیند تشکیل جت، از پیش‌زمینه خلأ و شبکه‌بندی مربعی یکنواخت با ابعاد 0.2×0.2 در ناحیه تشکیل جت، و شبکه‌بندی مستطیلی و غیریکنواخت در سایر نواحی استفاده شده است. شکل ۲، ابعاد دامنه حل و ابعاد شبکه‌بندی در این دامنه را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ نیز از حل‌گر اوپلری با شبکه‌بندی مربعی و یکنواخت با ابعاد 0.4×0.4 استفاده شده است که در آن هدف از جنس فولاد ۱۰۰۶ و به‌صورت استوانه‌ای با شعاع ۱۰۰ و طول ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی تغییر شکل فلزات بر اثر برخورد موج شوک ناشی از انفجار، به معادله حالتی نیاز است که بتواند رفتار آن را توصیف کند؛ بنابراین، برای مواد فلزی به‌کار رفته در اجزای خرج گود و همین‌طور برای ماده هدف از معادله حالت شوک^۶ استفاده شده است. این معادله حالت در تحلیل مسایلی که شامل سرعت و فشار زیاد و همین‌طور تغییر فاز هستند، کاربرد دارد. برای ماده منفجره از معادله حالت جی-دابلو-ال^۷ استفاده شده است. این معادله رابطه بین فشار، حجم نسبی و انرژی اولیه را بیان می‌کند و برای محاسبه فشار در محصولات انفجار استفاده می‌شود [۱۳].



شکل (۲): ابعاد دامنه حل در فرآیند تشکیل جت و

شیوه توزیع شبکه‌بندی در آن.

در رابطه (۳)، L طول جت، ρ_j چگالی ماده جت و ρ_t چگالی ماده هدف می‌باشد.

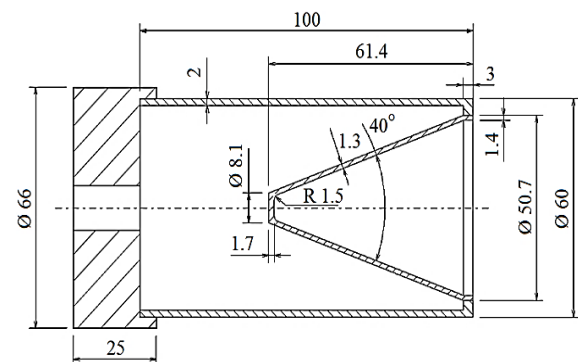
۳- حل عددی

در این پژوهش، یک خرج گود کوچک جهت مقایسه بین آستری تک جنسی و دوجنسی انتخاب شده و در هر دو حالت شبیه‌سازی شده است. در نهایت بین آستری تک‌جنسی و دوجنسی مقایسه صورت گرفته است.

۳-۱- حل عددی آستری تک‌جنسی و صحت‌سنجی

آن

خرج گود مورد پژوهش، دارای یک آستری با قطر ۵۶ و طول 61.4 میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ ابعاد هندسی و اجزای تشکیل‌دهنده آن را نشان می‌دهد. با توجه به در نظر گرفتن هزینه‌های ساخت و آزمایش‌های تجربی، این ابعاد برای خرج گود انتخاب شده است.



شکل (۱): ابعاد هندسی و اجزای خرج گود طراحی شده.

این خرج گود از چهار بخش آستری، پوسته، ماده انفجاری و محفظه بوستر تشکیل شده است. برای آستری تک‌جنسی، سه جنس مختلف مس^۱، نیکل و آلومینیوم^۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که آستری آلومینیوم از خانواده ۶۰۰۰ از قطر دهانه نفوذ بزرگ‌تری، در مقایسه با دیگر خانواده‌های آلومینیوم برخوردار بود از آلومینیوم 6061-T6 در فرآیند شبیه‌سازی استفاده شد [۱۱]. پوسته، ماده منفجره و محفظه بوستر نیز به ترتیب دارای جنس‌های فولاد ۱۰۰۶^۳، ترکیب بی^۴ و تفلون^۵ می‌باشند.

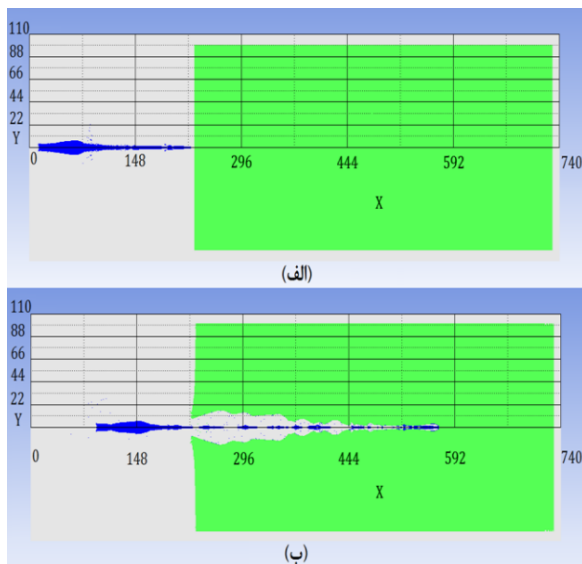
- 1- CUOFHC
- 2- Al 6061-T6
- 3- Steel 1006
- 4- Comp-B
- 5- Teflon

6- Shock

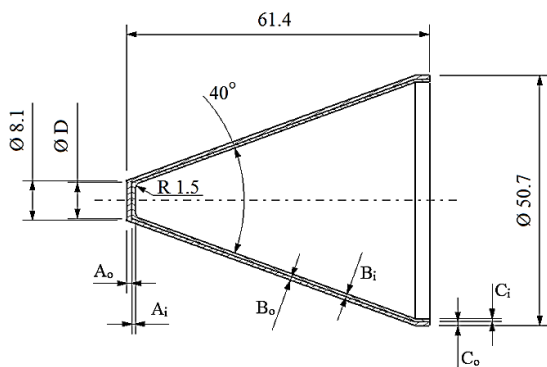
7- JWL(Jones-Wilkins-Lee equation of state)

بنابراین، فقط یک نوع لایه چینی در نظر گرفته شده است و در آن ضخامت لایه نیکلی یا آلومینیومی، 0.3 میلی‌متر و ضخامت لایه مسی 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است که ابعاد هندسی آن در شکل ۴ و جدول ۲ ارائه شده‌اند.

معادلات حالت و مدل مقاومت برای مس، نیکل و آلومینیوم، همانند خواص ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد. برای درک بهتر نحوه تشکیل جت حاصل از آستری دوجنسی، شکل ۵، تشکیل شدن یک جت دوجنسی مس- نیکل را نشان می‌دهد که در آن لایه خارجی مسی و لایه داخلی نیکلی می‌باشد.



شکل (۳): (الف) جت مسی قبل از نفوذ و (ب) بعد از نفوذ در هدف فولادی.



شکل (۴): ابعاد هندسی آستری دوجنسی.

از آنجایی که خواص استحکامی مواد تشکیل‌دهنده خرج گود از جمله آستری مهم می‌باشد، در هنگام بررسی فشار هیدرواستاتیک، باید ارتباط بین فشار و برش مشخص باشد. این رابطه با مدل مقاومت مشخص می‌شود. در فرآیند انفجار، به علت وجود نرخ کرنش بسیار بالا، مدل مقاومت استینبرگ- گینان^۱ مناسب می‌باشد که برای آستری‌ها از این معادله حالت استفاده شده است [۱۴]. جدول ۱ مواد انتخاب شده، معادلات حالت و مدل مقاومت را برای اجزای خرج گود و هدف نشان می‌دهد.

جدول (۱): پارامترهای هندسی شکل ۴.

جنس آستری	D	C _o	C _i	B _o	B _i	A _o	A _i
مس- نیکل	۶/۹۲	۱/۱	۰/۳	۱/۰	۰/۳	۱/۳	۰/۴
مس- آلومینیوم	۶/۵۷	۱/۳۵	۰/۴	۱/۲۵	۰/۳	۱/۵۵	۰/۶

۳-۲- حل عددی آستری دوجنسی

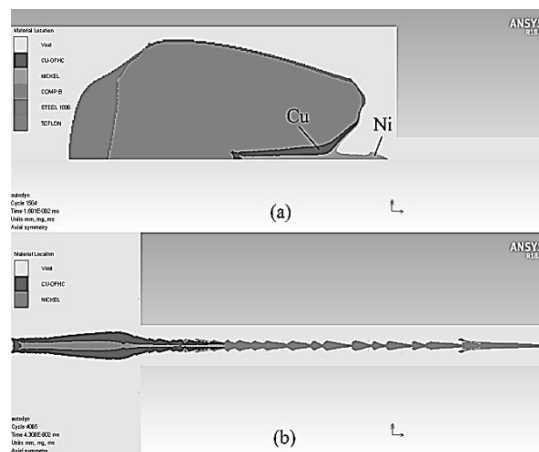
هدف از این شبیه‌سازی، مقایسه عملکرد جت دوجنسی با جت تک‌جنسی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود ابتدا یک آستری تک‌جنسی مسی مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. سپس به منظور بررسی رفتار آستری دوجنسی، دو حالت برای ترکیب مواد در نظر گرفته شده است. حالت اول ترکیب دو ماده‌ای است که آستری ساخته شده از آن‌ها رفتاری مشابه با یکدیگر و حالت دوم ترکیب دو ماده‌ای است که آستری ساخته شده از آن‌ها رفتاری متفاوت با یکدیگر دارند. از آنجایی که آستری نیکلی رفتاری مشابه و آستری آلومینیومی رفتاری متفاوت با آستری مسی دارند، ترکیب‌های مس- نیکل و مس- آلومینیوم برای آستری‌های دوجنسی استفاده شده‌اند [۱ و ۱۵]. لایه خارجی آستری (لایه در تماس با ماده منفجره) از جنس مس و لایه داخلی از جنس نیکل یا آلومینیوم در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مقدار عمق نفوذ جت تک جنسی مس در هدف فولادی در فاصله قرار ۳ برابر قطر (3CD).

جنس جت	حل عددی (میلی متر)	آزمون تجربی (میلی متر)	حل تحلیلی (میلی متر)
مس	۳۲۵	۳۳۰	۳۴۶

برای شبیه سازی رفتار فلزات در نرخ کرنش های بالا، استفاده از مدل مقاومت تا زمانی معنا دارد که فلز حالت مایع نداشته باشد. در پدیده شکل گیری جت، به لحظه ای که آستری به طور کامل به جت تبدیل می شود، لحظه فروریزش آستری گفته می شود. از این لحظه به بعد باید مدل مقاومت ماده آستری غیرفعال شود، زیرا تعریف مدل مقاومت باعث فرارسیدن زود هنگام زمان شکست می شود. در اثر آن مقدار عمق نفوذ حاصل از شبیه سازی از مقدار واقعی آن فاصله پیدا می کند. در نرم افزار اتوداین، لحظه ای که آستری کاملاً به جت تبدیل شد، باید حذف مقاومت ماده اعمال گردد.

به منظور افزایش سرعت محاسبات توسط نرم افزار نیز می توان مواد تشکیل دهنده اجزای خرج گود به جز آستری را حذف نمود. این کار باید زمانی انجام شود که سطح انرژی درونی جت ثابت شود. زیرا از این لحظه به بعد انرژی حاصل از انفجار هیچ تأثیری در شکل گیری جت نداشته و شبیه سازی تغییر شکل مواد انفجاری و اجزای دیگر خرج گود، محاسبات اضافی برای رایانه هستند. در شکل ۵ فرآیند حذف ماده منفجره، پوسته و محفظه بوستر بعد از شکل گیری جت مشاهده می شود. شکل ۶ زمان مناسب برای حذف مواد مذکور و شکل ۷ نمایی از شبیه سازی فرآیند شکل گیری و نفوذ آستری دوجنسی را نشان می دهد.

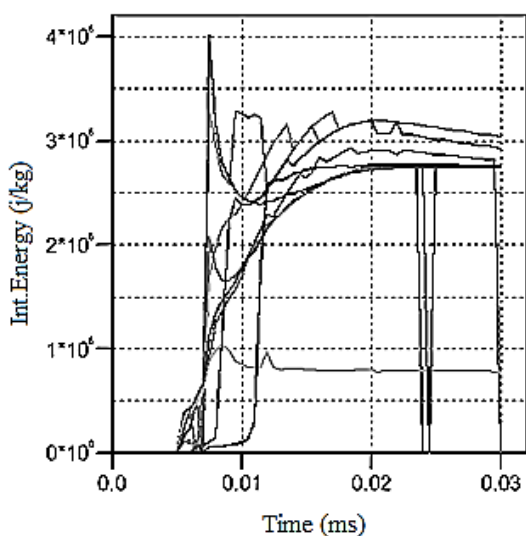


شکل (۵): شکل گیری جت دوجنسی مس- نیکل (لایه داخلی نیکل و لایه خارجی مسی) الف) قبل از حذف مواد منفجره و پوسته ب) بعد از حذف مواد.

برای شبیه سازی نفوذ نیز از فرضیات بخش ۲، اعم از نوع حل گر، ابعاد شبکه بندی، معادلات حالت و نیز مدل های مقاومت استفاده شده و ماده هدف نیز همان فولاد ۱۰۰۶ در نظر گرفته شده است.

در پدیده های ضربه و انفجار به دلیل بارگذاری شدید، نرخ کرنش مواد بسیار بالاست. برای همین از حلگر صریح^۱ برای حل این مسائل استفاده می گردد. حل صریح هم به طور مشروط پایدار و همگراست. برای همین تعیین گام زمانی بسیار تعیین کننده است.

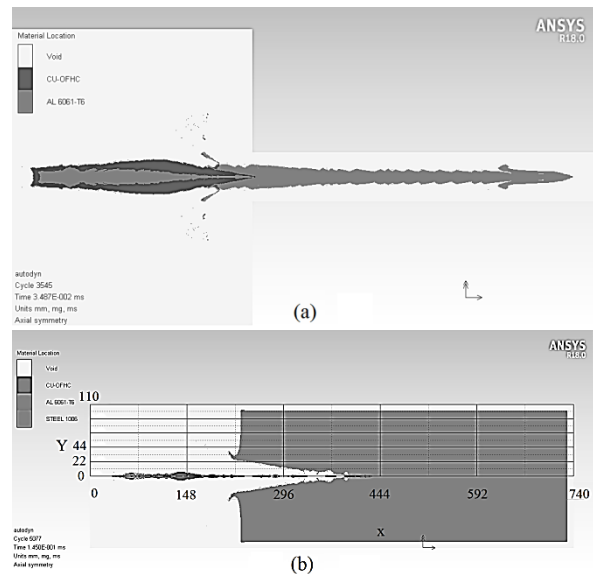
برای شبیه سازی فرآیند تشکیل جت و نفوذ آن در هدف فولادی از حلگر اوپلری با پیش زمینه خلأ دارای شبکه بندی مربعی یکنواخت با ابعاد ۰/۲ در ۰/۲ در ناحیه تشکیل جت و از شبکه بندی مستطیلی و غیریکنواخت در سایر نواحی استفاده شده است [۱۴].



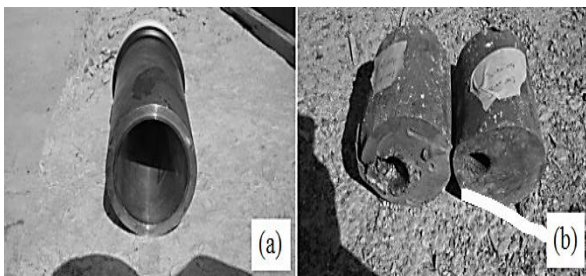
شکل (۶): تغییرات انرژی درونی ۱۰ نقطه از جت نسبت به زمان.

پیشرفته بوده و هزینه هنگفتی را تحمیل می‌نماید. بنابراین، استفاده از روش‌هایی چون اندازه‌گیری میزان عمق و قطر دهانه نفوذ همواره مورد توجه بوده است.

در این پژوهش جهت صحت‌سنجی نتایج عددی از یک خرج گود با آستری تک‌جنسی مس بهره‌گیری شده و مورد آزمون قرار گرفت. این خرج گود دارای جرم یکسان در آستری، ماده منفجره، پوسته نسبت به آستری دوجنسی بوده و ابعاد آن کاملاً مشابه با ابعاد آستری‌های دوجنسی می‌باشد. ضخامت آستری برابر با $1/3$ و از لحاظ هندسی مطابق با شکل ۴ می‌باشد. نتیجه حاصل از این آزمون که با چینش عمودی صورت گرفته در جدول ۳ مشاهده می‌شود. شکل ۹ نمایی از خرج گود مسی و همچنین هدف فولادی که مورد آزمون قرار گرفته مشاهده می‌شود.



شکل (۷): آستری دو جنسی مس- آلومینیوم (لایه داخلی آلومینیوم و لایه خارجی مسی) (الف) شکل‌گیری جت (ب) نمایی از فرآیند نفوذ در هدف فولادی.

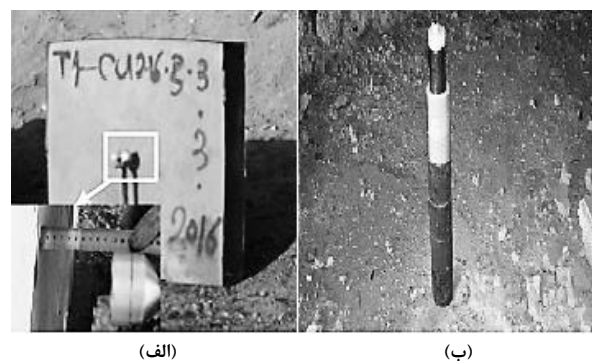


(الف) (ب)

شکل (۹): (الف) نمایی از خرج گود مسی (ب) نمایی از هدف فولادی.

۴- آزمون تجربی

شیوه چیدمان در آزمون‌های تجربی برای خرج گودها در حالت کلی به دو گونه می‌باشد: (الف) به صورت عمودی و (ب) به صورت افقی که در شکل ۸ نمونه‌هایی از آن نمایش داده شده است.



شکل (۸): چیدمان آزمون تجربی خرج گود (الف) افقی [۱۵] و (ب) عمودی.

۵- تحلیل نتایج و بحث

شبیه‌سازی عددی خرج گود دارای دو بخش می‌باشد. بخش اول مربوط به شبیه‌سازی شکل‌گیری جت بوده و بخش دوم مربوط به نفوذ جت در هدف می‌باشد. در این پژوهش از حل‌گر اولبری با پیش‌زمینه خلأ برای شبیه‌سازی شکل‌گیری جت استفاده شده است. برای شبیه‌سازی نفوذ جت نیز از حل‌گر اولبری استفاده شد. مقایسه نتایج نفوذ با نتایج تحلیلی نشان‌دهنده این موضوع هستند که نتایج حل‌گر اولبری برای شبیه‌سازی شکل‌گیری جت و پدیده نفوذ مناسب می‌باشد.

در نرم‌افزار اتوداین شبکه‌بندی فقط از نوع چهارضلعی است. با توجه به شبیه‌سازی‌هایی که در این پژوهش صورت

البته استفاده از چیدمان‌هایی برای اندازه‌گیری سرعت نوک جت پس از شکل‌گیری نیز در بسیاری پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از عکس رادیوگرافی هم از قدیم، جهت بررسی شیوه شکل‌گیری جت مورد توجه بوده است. اما استفاده از این روش‌ها وابسته به دستگاه‌های

با استفاده از همین روش برای آستری با جنس‌های دیگر نیز مسیر ادامه یافت. جدول ۴ و ۵ به ترتیب مقادیر سرعت نوک جت و عمق نفوذ را برای سه خرج گود با آستری تک‌جنسی در فاصله قرار سه برابر قطر خرج (قطر داخلی پوسته) با استفاده از ماده منفجره ترکیبی ۱ نشان می‌دهد.

جدول (۴): مقدار عمق نفوذ جت‌های تک‌جنسی در هدف فولادی در فاصله قرار ۳ برابر قطر (3CD).

جنس جت	عمق نفوذ (میلی‌متر) حل عددی	عمق نفوذ (میلی‌متر) حل تحلیلی	خطای نسبی (درصد)
مس	۳۲۵	۳۴۶	۶/۱
نیکل	۲۹۰	۳۴۶	۱۶/۲
آلومینیوم 6061-T6	۱۸۰	۱۷۳	۴/۰

جدول (۵): مقدار عمق و قطر دهانه نفوذ جت‌های تک‌جنسی و دوجنسی در هدف فولادی در فاصله قرار ۳ برابر قطر (3CD).

جنس جت	عمق نفوذ (میلی‌متر)	قطر دهانه نفوذ (میلی‌متر)
مس	۳۲۵	۱۷
نیکل	۲۹۰	۱۳
آلومینیوم	۱۸۰	۵۸
مس-نیکل	۲۸۴	۱۶
مس-آلومینیوم	۲۴۰	۵۰

با توجه به نتایج جدول ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار خطاهای نسبی برای تخمین سرعت جت و عمق نفوذ حاصل از فرآیند شبیه‌سازی نرم‌افزار صحیح بوده و با نتایج تحلیلی تطابق خوبی دارد؛ بنابراین، می‌توان گفت که ابعاد شبکه‌بندی، شرایط مرزی، معادلات حالت و مدل‌های مقاومت ذکر شده در این بخش، برای شبیه‌سازی این نوع آستری بسیار مناسب هستند؛ بنابراین، نتایج آستری مسی به‌عنوان یک شاهد، می‌تواند مبنای مقایسه مناسبی برای نتایج آستری‌های دیگر اعم از نیکلی، آلومینیومی و همین‌طور آستری‌های دوجنسی باشد.

گرفت این نتیجه حاصل شد که استفاده از شبکه‌بندی مربعی مناسب می‌باشد؛ زیرا شبکه‌بندی مستطیلی علاوه بر افزایش زمان پردازش، پاسخ‌های قابل اعتمادی ارائه نمی‌کند. برای شبیه‌سازی شکل‌گیری جت باید از ابعاد شبکه‌بندی کوچک‌تری در ناحیه حل نسبت به شبکه‌بندی در شبیه‌سازی نفوذ استفاده کرد؛ زیرا این امر منجر به تخمین دقیق سرعت نوک جت می‌شود. هر قدر شکل‌گیری جت دقیق‌تر شبیه‌سازی شود، شبیه‌سازی نفوذ نیز دارای دقت بیشتری خواهد بود.

نکته حائز اهمیت این است که با استفاده از قابلیت نرم‌افزار اتوداین، می‌توان قسمت‌هایی که نیاز به دقت بالاتری دارند، مانند ناحیه تشکیل جت و ناحیه نفوذ جت را به‌صورت یکنواخت و مربعی، و سایر نواحی را به‌صورت غیریکنواخت و مستطیلی مش‌بندی نمود تا به این‌صورت سرعت و دقت محاسبات را افزایش و حجم آن را کاهش داد. در این پژوهش از شبکه‌بندی مربعی یکنواخت با ابعاد 0.2×0.2 برای شبیه‌سازی شکل‌گیری جت، و ابعاد 0.4×0.4 برای شبیه‌سازی نفوذ استفاده شده است.

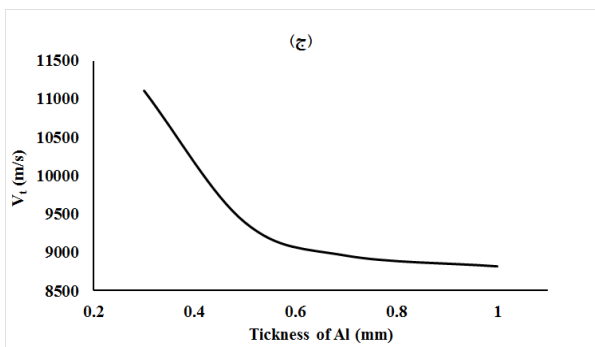
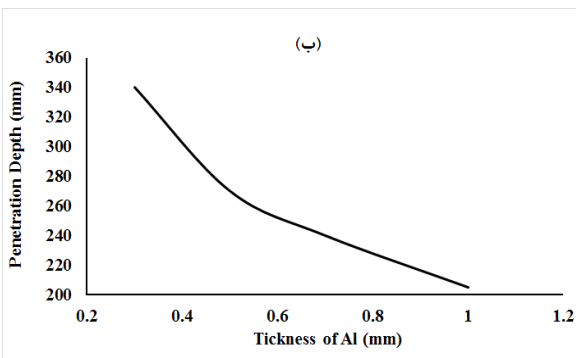
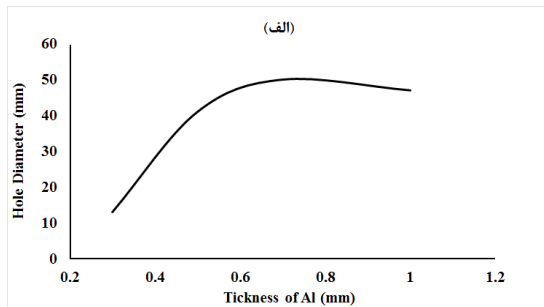
استفاده از حل عددی دوبعدی و همچنین استفاده از تقارن محوری در راستای محور فروریزش جت، ضمن آن‌که نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد، در عین حال زمان پردازش را بسیار کوتاه می‌نماید.

در ابتدا جهت صحت‌سنجی روش عددی از یک خرج گود تک‌جنسی بهره‌گیری شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی عددی به‌کار رفته برای یک خرج گود تک‌جنسی مسی، با نتایج تحلیلی و تجربی صحت‌سنجی شده و تطابق بالایی را نشان می‌دهند.

جدول (۳): سرعت نوک جت‌های تک‌جنسی در هدف فولادی در فاصله قرار ۳ برابر قطر (3CD)

جنس جت	حل شبیه سازی عددی (m/s)	حل تحلیلی (m/s)	خطای نسبی
مس	۸۴۷۲	۷۷۵۱	۹/۳
نیکل	۸۳۷۴	۷۷۵۱	۸/۰
آلومینیوم 6061-T6	۹۷۰۱	۹۷۶۹	۰/۷

می‌توان نتیجه گرفت که این نوع آستری به‌لحاظ فنی و اقتصادی مطلوب نمی‌باشد. اما آستری دوجنسی مس-آلومینیوم منجر به بهبود عمق نفوذ نسبت به آستری تک‌جنسی آلومینیومی شد. تغییر ضخامت آلومینیوم نیز می‌تواند منجر به افزایش قطر دهانه حفره شود که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

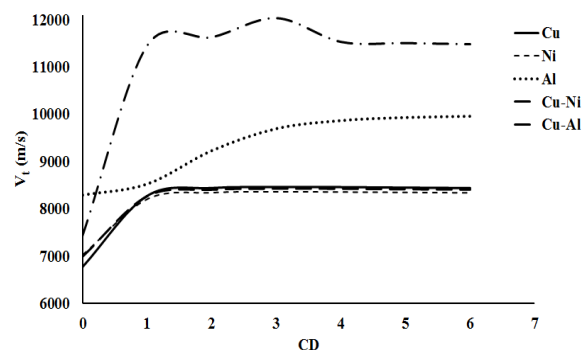


شکل (۱۱): تغییر پارامترهای نفوذ جت دوجنسی مس-آلومینیوم نسبت به تغییرات ضخامت آلومینیوم (الف) قطر حفره (ب) عمق نفوذ و (ج) سرعت نوک جت.

در شبیه‌سازی شکل‌گیری جت مشاهده شد که جت از سطح درونی آستری (سطح غیر مرتبط با ماده منفجره) شروع به تشکیل شدن می‌کند؛ بنابراین، در چینش لایه‌ها باید ماده با توانایی ایجاد قطر دهانه حفره بزرگ‌تر را در لایه درونی و ماده دوم را در لایه خارجی آستری جاگذاری نمود.

پس از اطمینان از صحت نتایج نرم‌افزار اتوداین و روش به‌کار رفته در آن، از همین روش برای شبیه‌سازی آستری دوجنسی بهره گرفته شد. شکل ۱۰، نمودار سرعت نوک جت را در فاصله قرارهای مختلف برای پنج نوع آستری (سه عدد تک‌جنسی و دو عدد دوجنسی) نشان می‌دهد که از شبیه‌سازی عددی محاسبه شده‌اند.

با توجه به شکل ۱۰، مشخص است که تغییرات سرعت نوک دو جت تک‌جنسی مسی و نیکلی دارای رفتار بسیار مشابه می‌باشند، اما سرعت نوک جت در آستری آلومینیومی، مقدار بیشتری نسبت به جت‌های تک‌جنسی مسی، نیکلی و دوجنسی مس-نیکل دارد. نکته جالب این است که جت دوجنسی مس-آلومینیوم دارای سرعت بسیار بیشتری نسبت به جت‌های تک‌جنسی مسی و آلومینیومی می‌باشد. برای روشن‌تر شدن موضوع، بایستی عملکرد این پنج جت در نفوذ نیز بررسی شود. جدول ۶، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نفوذ جت‌ها در فاصله‌ی توقف برابر با سه برابر قطر خرج در هدف فولادی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): سرعت نوک جت‌های تک‌جنسی و دوجنسی.

دو نوع چینش مختلف برای آستری‌های دوجنسی پیشنهاد شد. چینش اول ترکیب مس-نیکل و چینش دوم ترکیب مس-آلومینیوم بود. علت اصلی انتخاب این دو چینش این بود که جت حاصل از آستری‌های تک‌جنسی مس و نیکل به‌علت چگالی نزدیک به هم، رفتاری مشابه با یکدیگر دارند، اما آستری‌های تک‌جنسی مس و آلومینیوم رفتاری غیرمشابه دارند.

نتایج نهایی نشان دادند که آستری دوجنسی مس-نیکل همان رفتار آستری‌های تک‌جنسی را دارد و هیچ بهبودی در رفتار جت نهایی حاصل نشد. بنابراین،

تک‌جنسی آلومینیومی، و به لحاظ قطر حفره نیز نسبت به آستری تک‌جنسی مسی بهبود چشم‌گیری پیدا کرده است. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل در این پژوهش، نرم‌افزار اتوداین یک ابزار بسیار قدرتمند برای شبیه‌سازی پدیده شکل‌گیری و نفوذ جت در اهداف می‌باشد که لازمه آن طی کردن مسیر صحیح به لحاظ انتخاب نوع حل‌گر، شبکه‌بندی، معادلات حالت، مقاومت مواد، شرایط مرزی، پارامترهای تعریف شونده، تقارن محوری در هندسه و ... می‌باشد. حلگر اویلری با توجه به صرفه‌جویی در زمان و افزایش دقت پاسخ‌ها می‌تواند برای شبیه‌سازی دو پدیده شکل‌گیری و نفوذ جت نتایج مناسبی داشته باشد. استفاده از شبکه‌بندی یکنواخت مربعی برای شبیه‌سازی تشکیل جت و نفوذ، از دقت بالایی برخوردار خواهد بود. از طرفی معادلات حالت و مدل‌های مقاومتی که برای مواد خرج‌گود در نظر گرفته شده نیز با نتایج تحلیلی و تجربی تطابق بالایی را نشان می‌دهد. استفاده از حل دوبعدی همراه با تقارن محوری در راستای محور فروریزش آستری، ضمن کاهش زمان حل از نتایج مناسبی برخوردار خواهد بود.

در آستری دوجنسی مس- نیکل مشاهده شد که رفتار آن از نظر شکل‌گیری و نفوذ، تشابه بسیاری به جت‌های تک‌جنسی مس و نیکلی دارد و همان‌طور که بحث شد، به علت عدم بهبود عملکرد جت در نفوذ، گزینه مناسبی نبود.

جت دوجنسی مس- آلومینیوم به‌علت رفتار متفاوت مس و آلومینیوم عملکرد بهتری در نفوذ از خود نشان داد؛ زیرا نسبت به جت تک‌جنسی آلومینیومی که نفوذ کمی داشت، عمق نفوذ بیشتری را ایجاد کرد. علت اصلی افزایش عمق نفوذ، افزایش چگالی معادل آستری دوجنسی نسبت به آستری تک‌جنسی آلومینیومی بوده است. ضمناً قطر دهانه نفوذ نیز نسبت به آستری تک‌جنسی مس از مقدار بسیار بیشتری برخوردار است. این بدین معناست که آستری دوجنسی مس- آلومینیوم ضمن افزایش قطر دهانه نفوذ نسبت به آستری تک‌جنسی مسی، افزایش نفوذ را نسبت به آستری تک‌جنسی آلومینیومی به‌همراه داشته است. در نهایت همان‌طور که مشاهده می‌شود آستری دوجنسی

در آستری دوجنسی مس- آلومینیوم، از آن‌جایی که آلومینیوم قابلیت ایجاد قطر دهانه بزرگ‌تر دارد [۱۱]، در لایه درونی جاگذاری شده و مس که توانایی ایجاد عمق نفوذ بیشتری دارد در لایه خارجی جاگذاری شده است تا پس از ایجاد حفره توسط آلومینیوم، نفوذ توسط قسمت مسی جت ادامه یابد.

در نمودار شکل ۱۱، تغییرات قطر حفره نشان می‌دهد که افزایش مقدار ضخامت آلومینیوم تا یک حد مشخصی منجر به افزایش قطر حفره می‌شود که علت اصلی آن افزایش مواد انباشته شده آلومینیومی در نوک جت می‌باشد. بنابراین، افزایش ضخامت آلومینیوم تا یک حد مشخصی می‌تواند باعث افزایش قطر دهانه حفره شود.

طبق تئوری هیدرودینامیک نفوذ، اگر بتوان در آستری دوجنسی، مواد را طوری انتخاب نمود که چگالی معادل آستری دوجنسی، بیشتر از چگالی آستری تک‌جنسی شود، می‌توان عمق نفوذ را افزایش داد. افزایش چگالی آستری دوجنسی مس- آلومینیوم نسبت به آستری تک‌جنسی آلومینیوم، باعث افزایش عمق نفوذ آن می‌شود. در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که عمق نفوذ با افزایش ضخامت آلومینیوم کاهش می‌یابد که علت آن افزایش مقدار آلومینیوم در قسمت جلوی جت بوده که منجر به میل رفتار جت به رفتار جت آلومینیومی می‌شود.

برای افزایش قطر دهانه نفوذ نیز بایستی از موادی استفاده کرد که توانایی ایجاد قطر حفره زیادی دارند [۱۲-۱۳]. اگر بتوان آستری را طوری طراحی نمود که این مواد در نوک جت انباشته شوند، آنگاه می‌توان انتظار افزایش قطر دهانه حفره را داشت.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت آلومینیوم، سرعت نوک جت کاهش می‌یابد و بعد از ضخامت تقریباً ۰/۶ میلی‌متر، تغییرات سرعت نوک جت با شیب کمتری شروع به کاهش می‌کند. سرعت‌های بالای ۱۰۰۰۰ متر بر ثانیه نیز منجر به گسسته شدن زود هنگام جت می‌شود که این برای جت مناسب نیست.

با توجه به موارد فوق و همچنین توجیه‌پذیری فرآیند ساخت، می‌توان نتیجه گرفت که رفتار جت دوجنسی مس- آلومینیوم در ضخامت حدود $t=0/7 \text{ mm}$ ، بهینه‌ترین حالت خود را دارد؛ زیرا به لحاظ عمق نفوذ نسبت به آستری

7. Kim, S. J., Mun S. H., Lee K. A., Lee C. and Lee S. "Manufacturing and Evaluating for the Two Layer/Explosive Materials and Their Numerical Simulations", Materials Science Forum, Trans. Tech. Publications, Vol. 767, pp. 52-59, 2014.
8. Xiao, Q. Q., Huang, Z.X., Zu, X.D. and Zhu C. S. "Penetration Research of Jacketed Jet Into Concrete", Int. J. Impact Eng., Vol. 54, pp. 246-253, 2013.
9. Dong, W. I., Liu, J. X., Cheng, X. W., Li, S. K., Zou, Q. H. and Guo, W.Q. "Penetration Performance of W/Cu Double-Layer Shaped Charge Liners", Rare Metals, Vol. 35, No. 2, pp.184-191, 2016.
10. Zukas, J. A. and Walters, W. P. "Fundamentals of Shaped Charges", CMC Press, Baltimore, 1989.
11. Sarana, S., Ayisit O. and Yavuza, M. S. "Experimental Investigations on Aluminum Shaped Charge Liners", Proc. Eng., Vol. 58, pp. 479 - 486, 2013.
12. Dashtian Gerami, N., Liaghat G.H. and Rahimi Sharbaf Moghadas, G.H. "Investigation of Performance of Anti Structure Tandem Projectiles in to the Concrete Targets by Experimental and Numerical Method", J. Modares Mech. Eng. Vol. 16, No. 10, pp. 9-18, 2016. (in Persian)
13. Dashtian Gerami, N., Liaghat G.H., Rahimi Sharbaf Moghadas G.H., and Khazraiyen N., "Experimental and Numerical Analysis of the Follow Warhead Penetration of Tandem Projectiles in to the Finite Concrete Targets", J. Iranian Sci. Asso. Energetic Mat., Vol. 11, No. 3, pp. 37-46, 2016. (in Persian)
14. Bolstad, J. and Mandell D. "Calculation of Shaped Charge Jet Using MESA-2D and MESA-3D Hydrodynamic Computer Codes", Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1992.
15. Dashtian Gerami, N., Liaghat, G.H., Rahimi Sharbaf Moghadas, G.H. and Khazraiyen, N. "Analysis of Liner Effect on Shaped Charge Penetration into Thick Concrete Targets", J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, Vol. 39, pp. 3189-3201, 2017.

مس - آلومینیوم می‌تواند هم به لحاظ عمق نفوذ و هم قطر دهانه حفره، در اهداف فولادی مؤثر عمل کند.

در مورد جنس آستری دوجنسی مس - آلومینیوم به‌وضوح مشاهده شد که دوجنسی بودن آستری، دست‌کم در افزایش یکی از مقادیر عمق یا قطر نفوذ، نسبت به حالت تک‌جنسی تأثیر دارند. پیش‌بینی می‌شود استفاده از مس و آلومینیوم در کنار یکدیگر برای ساخت آستری دوجنسی، گزینه مناسبی جهت استفاده علیه اهداف فولادی و بتنی به‌طور هم‌زمان باشد.

۷- منابع

1. Walters W. P. and Golaski S. K. "Hemispherical and Conical Shaped Charge Liner Collapse and Jet Formation", Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD; Tech. Rep. ARBRL-TR-2781, 1987.
2. Schilling, T. J. "Reactive-Injecting Follow-Through Shaped Charges from Sequent-Material Conical Liners", Propellants, Explosives, Pyrotechnics: Int. J. Sci. Tech. Aspects Energetic Mat., Vol. 32, No. 4, pp. 307-313, 2007.
3. Mason, J. S. "Experimental Testing of Bimetallic and Reactive Shaped Charge Liners", Master Dissertation, Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
4. Tie-Fu, W. and He-Rong, Z. "Copper-Tungsten Shaped Charge Liner and its Jet", Propellants, Explosives, Pyrotechnics: Int. J. Sci. Tech. Aspects Energetic Mat., Vol. 21, pp. 193-196, 1996.
5. Yu, Z., Xiao-ming W., Wen-bin L. and Wen-jin Y. "Effects of Materials on Formation of Double-Layered Liners Shaped Charges", Advanced Materials Research, Trans. Tech. Publications, Vol. 79, No. 89, pp. 1277-1280, 2009.
6. Curtis, J. P., Smith F. T. and White A. H. "The Formation and Stretching of Bi-Material Shaped Sharge Jets", Shock Compression of Condensed Matter, Conf. Proc. AIP, pp. 116-119, 2012.

پیوست:

معادله حالت و مدل مقاومت اجزای خرج گود

جزء	جنس ماده	معادله حالت	مدل مقاومت
آستری اول	مس ^۲	شوک ^۱	استینبرگ-گینان
آستری دوم	نیکل	شوک	استینبرگ-گینان
آستری سوم	آلومینیوم 6061-T6	شوک	استینبرگ-گینان
پوسته	فولاد ۱۰۰۶	شوک	جانسون-کوک ^۳
ماده منفجره	ترکیب بی ^۵	جی-دابلیو-ال ^۴	ندارد
درپوش	تفلون ^۶	شوک	ندارد
هدف	فولاد ۱۰۰۶	شوک	ون-مایسز ^۷

ضرایب معادله حالت جی-دابلیو-ال برای ماده منفجره ترکیب بی

مقادیر	نام ضریب
$2/0.925E8$	A(kPa)
$5/6.89001E6$	B (kPa)
۴/۴	R1
۱/۲	R2
۰/۳	ω
$6/2.8E3$	C-J Detonation Velocity(m/s)
$5/1E6$	C-J Energy/Unit Volume (kj/m ³)
$1/2.5E7$	C-J Pressure(kpa)

ضرایب مدل مقاومت استینبرگ-گینان برای مواد آستری

نیکل	آلومینیوم	مس	نام ضریب
$8/5.5E7$	$2/7.6E7$	$4/7.7E7$	Shear module (kPa)
$1/4E5$	$2/9E5$	$1/2E5$	Yield Stress(kPa)
$1/2E6$	$6/8E5$	$6/4E5$	Max. Yield Stress(kPa)
۴۶	۱۲۵	۳۶	Hardening const.
۰/۵۳۰	۰/۱	۰/۴۵	Hardening exp.
$-2/7.8730$	۱/۸	۱/۳۵	dG/dP
$-2/7.873E4$	$-1/7E4$	$-1/7.98E4$	(dG/dT kPa/K)
۰/۰۰۲۲۸۲	۰/۰۱۸۹۰۸	۰/۰۰۳۳۹۶	dY/dP
$2/3.3E3$	$1/2.2E3$	$1/7.9E3$	Melting Temp. (K)

1-Shock
 2-CU-OFHC
 3-Johnson-Cook
 4-JWL
 5-Comp-B
 6-Teflon
 7-Von Misses

ضرایب معادله حالت شوک برای مواد آستری

نام ضریب	مس	آلومینیوم	نیکل
Gruneisen Coeff.	۲/۰۲	۱/۹۷	۱/۹۵۰
C_1 (m/s)	۳/۹۴ E۳	۵/۲۴ E۳	۴/۱۹۰ E۳
S_1	۱/۴۸۹	۱/۴	۱/۵۴۰
Reference Temp. (K)	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
Specific heat (J/kg.K)	۳۸۳	۸۸۵/۰۰۰۱۲۲	۴۱۱/۰۰۰۰۳۱

ضرایب مدل مقاومت فولاد ۱۰۰۶

نام ضریب	ون- مایسز	جانسون- کوک
Shear Modulus (kPa)	۷/۶۹۲۳ E۷	۸/۱۸۰۰۰۱ E۷
Yield Stress (kPa)	۳/۵ E۵	۳/۵ E۵
Hardening Const.	-----	۲/۷۵ E۵
Hardening Exp.	-----	۰/۳۶
Melting Temp(k)	-----	۱۸۱۱
Strain Rate const.	-----	۰/۰۲۲
Thermal Softening Exp.	-----	۱
Ref. Strain Rate	-----	۱
Strain Rate Correction	-----	۱ order

ضرایب معادله حالت شوک برای فولاد ۱۰۰۶

نام ضریب	مقادیر
Gruneisen Coeff.	۱/۶۷۰
C_1 (m/s)	۴۶۱۰
S_1	۱/۷۳۰
Reference Temp. (K)	.
Specific Heat (J/kg.K)	.

ضرایب معادله حالت شوک برای تفلون

نام ضریب	مقادیر
Gruneisen Coeff.	۰/۵۹
C_1 (m/s)	۱/۸۴۱ E۳
S_1	۱/۷۰۷
Reference Temp. (K)	.
Specific Heat (J/kg.K)	.