



شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی عملکرد نفوذگر چاه نفت

سید محمود هاشمی¹، احسان زمانی^{2*}، اصغر مهدیان³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
3- استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان
*شهرکرد، صندوق پستی 115، zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 06 دی 1394
پذیرش: 30 دی 1394
ارائه در سایت: 03 اسفند 1394

کلید واژگان:

نفوذگر چاه نفت
خرج گود
LS-DYNA
RHT

چکیده

نفوذگرهای چاه نفت، ابزارهای انفجاری هستند که در صنعت حفاری چاه‌های نفت و گاز و با هدف دستیابی به مخازن اطراف چاه و افزایش بازده آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. کارایی این نفوذگرها با عمق نفوذی که ایجاد می‌کنند مورد سنجش قرار می‌گیرد، به همین دلیل پارامتر عمق به عنوان پارامتر اصلی باید مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله، گزارش کاملی از شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی عملکرد این ابزارها که در حقیقت، خرج‌گودهایی با ابعاد کوچک هستند ارائه شده است. به این منظور، از روش‌های حل اویلرین چندماده‌ای و لاگرانژی، به ترتیب برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌گیری جت نفوذگر و نفوذ آن در صخره‌های زیرزمینی استفاده شده است. برای حل مشکل تغییر شکل زیاد المان‌ها در روش لاگرانژی، از معیار فرسایش المان‌ها استفاده شد. همچنین بدلیل اینکه نتایج هر دو فرآیند شکل‌گیری جت و نفوذ به شدت تحت تأثیر چگالی مش‌بندی قرار دارد، حساسیت به مش‌بندی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی عددی پایه، با استفاده از نتایج معتبر سایر مراجع درستی‌آزمایی و اعتبارسنجی شده و پس از آن، هندسه جدیدی برای خرج انفجاری پیشنهاد شده است که مشکل ناهمگنی توزیع سرعت در قسمت دنباله جت را رفع کرده و به دنبال آن، طول مؤثر جت در نفوذ را افزایش می‌دهد.

Numerical simulation and performance optimization of oil well perforator

Sayyed Mahmoud Hashemi¹, Ehsan Zamani^{1*}, Asghar Mahdian²

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Maleke Ashtar University, Esfahan, Iran
*P.O.B. 115, Shahrekord, Iran, zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 December 2015
Accepted 20 January 2016
Available Online 22 February 2016

Keywords:

Oil Well Perforator
shaped charge
LS-DYNA
RHT

ABSTRACT

Oil well perforators (OWP) are explosive devices that are used in drilling industries of oil and gas wells to access the reservoir and increase the wells efficiency. The performance of oil well perforators is measured by the depth of penetration that can be achieved, for this reason depth as the main parameter must be examined. In this article, a complete report of numerical simulation and performance optimization of these devices, which are indeed small size shaped charges, is presented. To do this, the multi-material Eulerian and the Lagrangian methods are used for simulation of the jet formation and its penetration into underground rock processes, respectively. For solving the problem of large deformation elements in Lagrangian method, erosion criterion elements were used. Because the results of jet formation and penetration process are heavily influenced by the density of the mesh, in this study mesh sensitivity was examined. The described simulation is validated by the use of reliable results of some references and then, a new charge geometry is suggested which resolves the inhomogeneities in the distribution velocity of the tail and increases the effective length of jet in the penetration process.

1- مقدمه

استوانه‌ای که بر روی آن خرج‌گودهایی با ابعاد کوچک نصب شده است، انجام می‌گیرد. این وسیله حفاری عرضی دارای سیستم انفجار الکترونیکی است که بعد از انفجار، جت‌های کوچک ولی با سرعت بسیار زیاد ایجاد می‌شود. جت فلزی قادر است که جداره فلزی چاه، لایه سیمانی پشت جداره چاه و ماسه‌های نفتی را سوراخ کند. به این ترتیب کانالی ایجاد می‌شود که اجازه ورود نفت و گاز موجود در اطراف چاه را به داخل لوله استخراج نفت می‌دهد. از آنجایی که فاصله بین محفظه تفنگ و جداره چاه نفت بسیار کم است فاصله توقف برای نفوذگرها یک محدودیت به حساب می‌آید همچنین نگه‌داشتن ماده منفجره در عمق 3 km زیر زمین که دارای دمایی حدود 260 C است کار دشواری می‌باشد، این شرایط طراحی نفوذگرهای چاه نفت را

نفوذگرهای¹ چاه نفت خرج‌گودهایی² با ابعاد کوچک هستند که در صنعت حفاری چاه‌های نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این نفوذگرها به منظور دستیابی به مخازن نفت و گاز اطراف چاه، به وسیله سوراخ کردن جداره فلزی چاه و صخره‌های اطراف استفاده می‌شود. چاه حفاری شده باید به وسیله یک جداره فلزی پوشانده شده و سطح بیرونی آن (پشت جداره) باید از سیمان مخصوص پر شود. به خاطر این که نفت و گاز مخزن اطراف چاه اجازه ورود به چاه را بیابد این جداره فلزی باید سوراخ شود. این کار به وسیله تفنگ

1- perforator
2- Shaped charge

Please cite this article using:

S. M. Hashemi, E. Zamani, A. Mahdian, Numerical simulation and performance optimization of oil well perforator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 17-26, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. M. Hashemi, E. Zamani, A. Mahdian, Numerical simulation and performance optimization of oil well perforator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 17-26, 2016 (in Persian)

است محاسبات پیچیده و سریع را به سرعت انجام دهد و همچنین از هیدروکد سی-تی - اچ⁴ جهت آنالیز بیشتر جزئیات حل مسئله استفاده شد. محاسبات این هیدروکد با اطلاعات جزئی در مورد شکل‌گیری جت، قطر حفره، عمق نفوذ، فشار موج تأثیرگذار، تغییرات چگالی، دما و فشار در ماده هدف را ارائه می‌دهد.

ساران و همکاران کارایی خرج‌گود با آستری آلومینیومی را مورد مطالعه قرار دادند [4]. در این مطالعه تجربی خرج‌گودهایی با هندسه گوناگون و آستری با الیازها و ضخامت‌های مختلف ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور بررسی کارایی نفوذ خرج‌گود دو نوع هدف یکی هدف فولادی و دیگری هدف از جنس ماسه انتخاب شد و همچنین فاصله توقف نیز 1.5 برابر و 3 برابر قطر خرج در نظر گرفته شد. نتایج به این صورت مشاهده شد که استفاده از الیازهای مختلف آلومینیوم برای آستری در فاصله توقف 3 برابر قطر خرج تأثیر بسزایی در عمق حفره نداشته است و پروفایل سوراخ ایجاد شده شبیه به هم بوده و برای خرج با آستری شیپوری شکل عمق نفوذ افزایش می‌یابد. اختلاف در کارایی نفوذ در فاصله توقف‌های بزرگ‌تر به دلیل پدیده گسست جت نمایان می‌شود همچنین در هدف از جنس ماسه مشاهده شد که چگالی ماسه (ماسه متراکم و متخلخل) روی پروفیل سرعت نفوذ به‌خصوص زمانی که ضخامت رأس آستری کاهش می‌یابد، تأثیر چندانی ندارد.

نیکولاس و همکاران روش اولپرین - لاگرانژین اختیاری دو بعدی⁵ را برای شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی از قبیل برخورد سرعت بالا، نفوذ میله بلند، پرتابه شکل یافته انفجاری و جت خرج‌گود پیشنهاد دادند [5]. در این روش مسئله به صورت دو بعدی و کاملاً متقارن محوری مدل‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی شبکه زمینه و اطراف به صورت خلاء مدل شد. فلز آستری و پوسته با استفاده از معادله حالت گرونایزن و مدل ماده جانسون کوک مدل‌سازی شدند. برای ماده منفجره از مدل ماده شدیدالانفجار⁶ و معادله حالت جونز - ویل کینز - لی⁷ استفاده شد. با مقایسه سرعت جت با داده‌های تجربی خطای 5.1 درصدی مشاهده شد.

الشنای و لی به بررسی اثر استحکام هدف بر روی عمق نفوذ، نفوذگرها پرداختند [6]. به دلیل سرعت بسیار بالای جت در لحظه اولیه برخورد می‌توان استحکام هدف را نادیده گرفت ولی به مرور زمان با کاهش سرعت جت اثر استحکام هدف یک اثر معنی‌دار می‌شود و نمی‌توان آن را نادیده گرفت. به همین منظور از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی برای بررسی اثر استحکام استفاده نمودند. در این آزمون از بتن‌هایی با استحکام فشاری 55، 47، 40، 26 MPa استفاده شد. برای شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری جت در این مطالعه از هیدروکد اتو - داینا استفاده شد. آن‌ها برای فرآیند شکل‌گیری جت از روش حل اولپرین و برای نفوذ از روش حل لاگرانژین استفاده کردند. با انجام شبیه‌سازی‌ها و آزمون‌های انجام شده آن‌ها توانستند ضریب اثر استحکام را به رابطه نفوذ آلیسون - ویتالی اضافه کنند. رابطه آلیسون - ویتالی و اصلاحات انجام شده در رابطه (1) مشخص است.

$$P = Z \left[\left(\frac{V_1}{V_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \left[1 - \frac{\lambda f_c}{\rho_1 (V_c)^2} \right] \quad (1)$$

در رابطه (1)، Z طول مؤثر جت، λ ثابت تجربی که از آزمون‌های تجربی به دست می‌آید، f_c استحکام فشاری هدف که تابعی از فشار هیدرواستاتیک

در مقایسه با نوع جنگ‌افزاری آن مشکل می‌کند [1]. شکل 1 موقعیت خرج-گودها در جهت طولی را نشان می‌دهد که با فاصله 2.54 cm از یکدیگر قرار گرفته‌اند، همچنین هر دو خرج نزدیک به هم با زاویه 120 deg در جهت قوس افقی و در جهت گردش عقربه‌های ساعت از یکدیگر مجزا شده‌اند.

1-1- خرج‌گود

استوانه‌ای از ماده منفجره با حفره توخالی در یک طرف و یک چاشنی در طرف دیگر خرج‌گود نامیده می‌شود. حفره توخالی در استوانه ماده منفجره را می‌توان با یک لایه‌ی نازک فلزی، شیشه‌ای یا سرامیکی پوشاند. پس از شروع انفجار یک موج کروی به بیرون گسترش می‌یابد. این موج دارای فشار بالایی (حدود 200 GPa) است و با سرعت زیادی حرکت کرده و نوعاً 8 km/s سرعت دارد. با رسیدن موج انفجار به آستری جامد، ماده آستری¹ در اثر فشار بالای انفجار شتاب گرفته و به شدت تغییر شکل می‌یابد.

تقارن هندسی موجود در طرح خرج‌گود باعث شتاب گرفتن ذرات آستری بعد از انفجار به طرف محور خرج‌گود می‌شود و در آنجا پس از برخورد به یکدیگر جریانی از ذرات پرسرعت به وجود می‌آورند که به آن جت گفته می‌شود و دنباله جرمی که در قسمت انتهایی جت قرار دارد اسلاگ² نامیده می‌شود. در حقیقت اسلاگ قسمت اعظم حدود 80 درصد جرم آستری را تشکیل می‌دهد و نقشی در نفوذ ندارد [2].

بررسی تحقیقات گذشته نشان‌دهنده این است که روش اجزاء محدود و کدهای تحلیلی می‌توانند در شبیه‌سازی این پدیده یعنی انفجار ماده منفجره و شکل‌گیری جت خرج‌گود بسیار سودمند باشد.

هورتا و وِجیل اقدام به طراحی و تحلیل خرج‌گود مخروطی به قطر 0.7 m نمودند [3]. هدف آن‌ها طراحی خرج‌گودی بود که بتواند در هدف‌های سخت مانند سنگ نفوذ نماید. این کار با برنامه‌ی اسکپ³ انجام شد که قادر

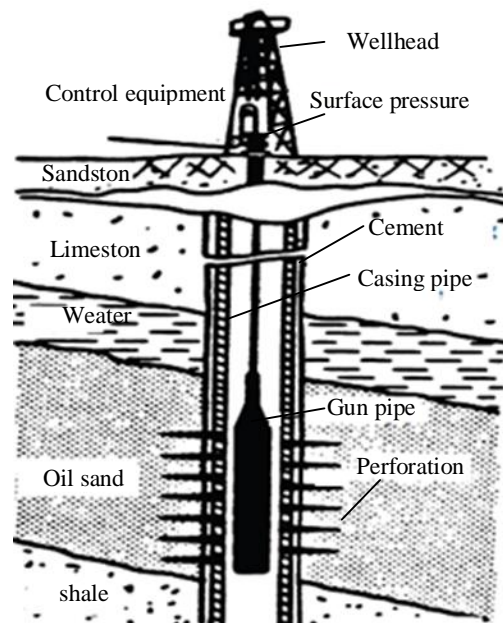


Fig. 1 The step of wellhead, pressure control, gun, case, cement and shaped charges [1]

شکل 1 موقعیت سر چاه، کنترل فشار، تفنگ، جداره، سیمان و خرج‌گودها [1]

4- CTH
5- ALE2D
6- High explosive burn
7- JWL

1- Liner
2- slug
3- SCAP

طبق شکل 3 برای المان‌های آستری به مرور زاویه β افزایش می‌یابد این عامل باعث کاهش سرعت آن المان در جت و افزایش نرخ جرم ورودی به جت می‌شود. در این مورد زاویه فروپاشی β برای هر المان از رابطه (2) محاسبه می‌شود [9].

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha + 2 \sin \delta \cos A - X \sin \alpha [1 - \tan \delta] V'_0/V_0}{\cos \alpha - 2 \sin \delta \sin A + X \sin \alpha [\tan A + \tan \delta] V'_0/V_0} \quad (2)$$

$$A = \alpha + \delta \quad (3)$$

$$V_j = \frac{V_0 \cos \left(\frac{\alpha + \delta - \beta}{2} \right)}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (4)$$

$$V_s = \frac{V_0 \cos \left(\frac{\alpha + \delta - \beta}{2} \right)}{\cos \frac{\beta}{2}} \quad (5)$$

با توجه به رابطه‌های (2) تا (5) سرعت جت از نوک به سمت اسلاگ کاهش می‌یابد که باعث کشیدگی و درنهایت گسست جت می‌شود.

3- تحلیل عددی

برای پدیده‌ای کاملاً غیرخطی و وابسته به زمان همانند شکل‌گیری جت خرج‌گود و نفوذ آن در اهداف مختلف می‌توان از هیدروکدها استفاده نمود. نام هیدروکد به کدهایی اشاره دارد که معمولاً برای مسائلی استفاده می‌شود که فشار به‌اندازه‌های زیاد است که می‌توان از استحکام مواد در مقابل آن چشم‌پوشی کرد. اخیراً و اغلب محققان از هیدروکد ال - اس - داینای³ و یا اتو - داینای⁴ برای چنین مسائلی استفاده می‌کنند. در تحقیق حاضر از هیدروکد ال - اس - داینای استفاده شده است. نرم‌افزار ال - اس - داینای دارای فرمول‌بندی‌های متعددی برای المان‌ها از قبیل لاگرانژین، اویلرین، اویلرین - لاگرانژین اختیاری، هیدروپنماتیک ذرات صاف⁵ است. با این فرمول‌بندی‌ها می‌توان از محدودیت‌های که در روش لاگرانژی در حل مسائلی با تغییر شکل‌های بزرگ روی می‌دهد رهایی یافت. در مطالعه حاضر از روش حل اویلرین - لاگرانژین اختیاری که در حقیقت ترکیبی از دو روش لاگرانژی و اویلری است استفاده شد. روش حل اویلرین - لاگرانژین اختیاری به صورت تک ماده‌ای و چند

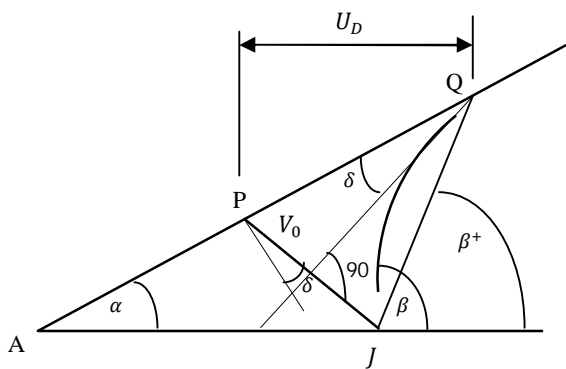


Fig. 3 Collapse process for variable collapse velocity [9]

شکل 3 فرآیند فروپاشی برای سرعت فروپاشی متغیر [9]

است و γ جذر نسبت چگالی هدف به چگالی جت می‌باشد. برای آزمون تجربی نحوه انجام آزمون طبق استاندارد شرکت ملی نفت آمریکا انتخاب شد (شکل 2).

2- تحلیل‌های نظری

2-1- تئوری بیرهوف¹

بیرهوف در سال 1948 اولین تئوری تشکیل جت خرج‌گود با آستری مخروطی را ارائه کرد [7]. این تئوری با این فرض به وجود آمد که فشار محصولات انفجار و موج حاصل از آن به قدری زیاد است که از مقاومت ماده تشکیل‌دهنده آستری در برابر آن می‌توان صرف‌نظر نمود. در حقیقت آستری را پس از فروپاشی می‌توان مانند یک سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت. در این تئوری جریان فروپاشی آستری در حالت دائم در نظر گرفته می‌شود. یکی دیگر از فرض‌های این مدل این است که المان‌های آستری فوراً شتاب گرفته و به سرعت نهایی فروپاشی خود می‌رسند.

2-2- تئوری پر²

اصلاحات مهم در مدل حالت دائم بیرهوف توسط پاک، ایشلبرگر و روستورک در سال 1975 انجام گرفته است [8]. این روش به تئوری پر معروف است. این تئوری بر پایه مفاهیم تئوری بیرهوف بنا شده است، با این تفاوت که سرعت فروپاشی المان‌های مختلف آستری یکسان نیست و تغییرات این سرعت به موقعیت اولیه المان‌ها بستگی دارد. بنابراین سرعت فروپاشی به‌طور پیوسته از رأس مخروط به طرف قاعده آن کاهش می‌یابد و این تغییر سرعت به نوبه خود باعث افزایش طول جت می‌شود. دلیل این کاهش سرعت از رأس به سمت قاعده، کاهش کمر بند ماده منفجره در محل قاعده مخروط آستری و افزایش جرم آستری در حال سیلان در این محل است. در لحظه‌ای که موج انفجار به آستری مخروطی برخورد می‌کند، فرض می‌شود که فشار اعمال شده بر تمام سطح آستری مساوی است و دیواره‌های آستری با سرعت ثابت V_0 به سمت داخل متلاشی می‌شوند. زاویه 2β که بین دیواره‌های در حال فروپاشی تشکیل می‌شود از زاویه رأس مخروط 2α بیشتر است.

سطح فروپاشی در این تئوری یک کانتور غیر مخروطی می‌باشد که در شکل 3 مشخص شده است، در این مورد زاویه فروپاشی برای المان‌های آستری متفاوت بوده و هر المان با توجه به موقعیتی که دارد با زاویه β (زاویه تلاقی) وارد محور شده و در آن‌جا به دو قسمت جت و اسلاگ تقسیم می‌شود

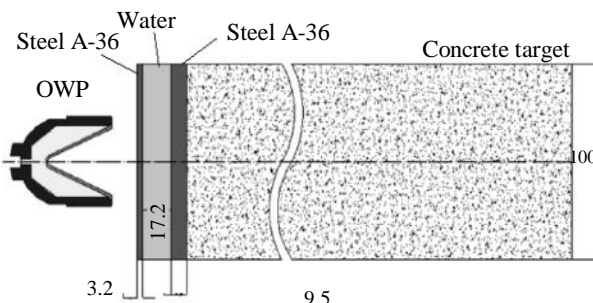


Fig. 2 The test setup according to API-RP43 (dimension mm) [6]

شکل 2 وضعیت آزمون طبق استاندارد شرکت ملی نفت آمریکا (ابعاد برحسب mm) [6]

3- LS-DYNA
4- AUTODYN
5- SPH

1- Birkhoff
2- PER

تنش‌های المان برای این نوع ماده به این شکل بیان می‌شود [10].

$$\sigma = 2\mu D - PI \quad (6)$$

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (7)$$

در رابطه (7)، I, P, μ, D, σ به ترتیب تانسور تنش، تانسور نرخ تغییر شکل، لزجت⁶ دینامیکی، فشار و ماتریس واحد است. رابطه (7) معادله حالت چندجمله‌ای خطی است. در رابطه (7)، $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ و E انرژی داخلی ماده هستند.

ضرایب مربوط به معادله حالت و مدل ماده نول در جدول 1 ارائه شده است. مقدار تمامی ضرایب C در معادله چندجمله‌ای به جز موارد ارائه شده صفر است.

3-2-2- ماده منفجره

برای مواد منفجره مورد استفاده در این تحقیق از مدل ماده شدیدالانفجار استفاده شد. این مدل ماده به همراه معادله حالت جونز - ویل کینز - لی می‌تواند رفتار خرج‌های انفجاری را به درستی شبیه‌سازی کند. در این معادله در هر لحظه حجم گازهای تولید شده و فشار انفجار با رابطه‌ای مبتنی بر بقای جرم، ممنتوم و انرژی محاسبه می‌شود [11]. رابطه (8) معادله حالت جونز - ویل کینز - لی را نشان می‌دهد.

$$P = A_1 \left[1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right] e^{-R_1 v} + B_1 \left[1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right] e^{-R_2 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (8)$$

در رابطه (8)، $A_1, e, R_1, R_2, B_1, \omega$ پارامترهای ماده منفجره و v حجم گاز تولید شده است. ضرایب و خواص سه خرج مورد استفاده در این پژوهش در جدول 2 و 3 ارائه شده است.

3-2-3- مدل ماده برای فلزات

برای فلزات مدل ماده جانسون - کوک⁷ نیز یکی از معادلات رفتاری ماده است که می‌تواند جهت شبیه‌سازی فرآیندهای شامل تغییر شکل سریع نظیر ضربه و نفوذ بکار رود. از آن‌جا که در تغییر شکل‌های پلاستیک سریع، کرنش و نرخ

جدول 1 خواص هوا در مدل نول و ضرایب معادله حالت چندجمله‌ای خطی [10]

Table 1 Air properties in null model and coefficients of the linear polynomial equation [10]

سیال	لزجت دینامیکی (Pa × s)	c_4	c_5	چگالی (kg/m ³)
هوا	10 ⁻³	0.4	0.4	1000

جدول 2 خواص مادی مواد منفجره [12]

Table 2 Explosive material properties [12]

نوع ماده	چگالی (gr/cm ³)	فشار چابمن جوگونت (GPa)	سرعت انفجار (cm/μs)
PE4	1.6	28	0.8193
Pbx-9011	1.777	34	0.8500
HMX	1.891	42	0.9110

جدول 3 ضرایب معادله حالت جونز - ویل کینز - لی [12]

Table 3 The JWL constants [12]

نوع ماده	ω	E_0	R_2	R_1	A_1	B_1
PE4	0.25	0.09	0.1295	6.098	4.5	1.4
Pbx-9011	0.3	0.089	0.08	6.3470	4.2	1
HMX	0.3	0.105	0.077	7.783	4.2	1

6- Viscosity
7- Jonson - coock

ماده‌ای است که در این‌جا از مدل چند ماده‌ای با توجه به رفتار مواد استفاده شد. برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی ابتدا نفوذگر مورد بحث در مرجع [6] با استفاده از انسیس¹ 12 مدل‌سازی و وارد محیط ال-اس-داینا شد. اگر چه در مرجع [6] این نفوذگر با استفاده از هیدروکد اتو - داینا و با روش تفاضل محدود² شبیه‌سازی شده است اما در صورت دستیابی به نتایج مشابه می‌توان الگوریتم انتخابی برای مسئله را معتبر دانست و مطالعه بر روی پارامترهای مؤثر بر عملکرد نفوذگر را با روش حاضر انجام داد.

3-1- مدل هندسی مسئله

در آزمون و شبیه‌سازی انجام شده در تحقیق مرجع [6]، جنس آستری مورد استفاده از مس بدون اکسیژن³ است، این ماده دارای خلوص بالا 99.99 درصد، اکسیژن پایین و حاوی فسفر جهت بالا بردن نرمی ماده است، زاویه رأس آستری 46 deg و ضخامت دیواره آستری 1.4 mm و ضخامت دیواره پوسته از جنس فولاد و 4.5 mm است. جنس خرج از PE4 با وزن 40 gr است. در مدل‌سازی مربوط به دینامیک سیالات یا مکانیک جامدات غیرخطی، یکی از مهم‌ترین موضوع‌ها انتخاب توصیف سینماتیکی مناسب برای محیط پیوسته است. منظور از توصیف سینماتیکی، تعیین رابطه بین محیط تغییر شکل‌دهنده با شبکه یا مش است. در تحلیل حاضر از دو نوع فرمول‌بندی لاگرانژی و اویلری استفاده شده است. بدین صورت که ماده منفجره، آستری، هوای اطراف، به صورت اویلری و محفظه خرج و هدف بتنی به صورت لاگرانژی تحلیل شدند. در شکل 4 مدل هندسی مسئله نشان داده شده است. به دلیل متقارن محوری بودن، مسئله به صورت دو بعدی مدل شده است.

3-2-3- مدل مواد

3-1-2- هوا

برای مدل‌سازی هوا از مدل ماده نول⁴ استفاده شد. این ماده همانند سیال عمل می‌کند و از ویژگی‌های بارز این مدل ماده نداشتن استحکام تسلیم برشی است. تنش کلی که در یک سیستم ایجاد می‌شود مجموع تنش انحرافی و تنش هیدرواستاتیکی است. مدل ماده نول نمی‌تواند به تنهایی تنش کل را محاسبه کند و تنها قادر به محاسبه تنش انحرافی است، برای محاسبه تنش هیدرواستاتیکی این مدل ماده نیاز به یک معادله حالت⁵ دارد، معادله حالت رابطه بین فشار، چگالی، انرژی داخلی را بیان می‌کند که از معادله حالت چندجمله‌ای خطی برای هوا استفاده شد. در حالت کلی

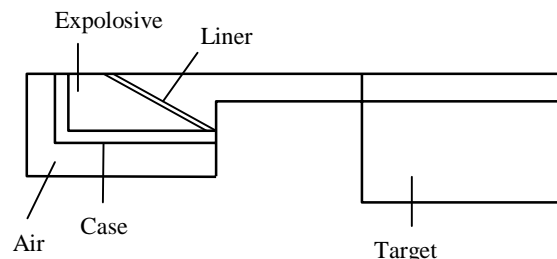


Fig. 4 Finite element models in this study

شکل 4 مدل المان محدود در تحقیق حاضر

1- ANSYS
2- Finite difference
3- OFHC
4- Null
5- E.O.S

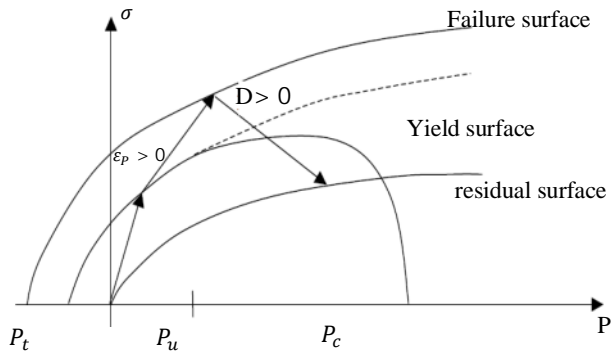


Fig. 5 Stress limit surfaces scenario in the RHT strength model [14]

شکل 5 شرح سطح تنش در مدل استحکام آر - اچ - تی [14]

برای فشارهای هیدرواستاتیکی بیشتر از $f_c/3$ رابطه زیر برای محاسبه Y_{TXC} استفاده می‌شود.

$$Y_{TXC} = f_c \left[A \left[\frac{P}{f_c} - \frac{P_{HTL}}{f_c} \times f_{Rate} \right]^N \right] \quad P \gg f_c/3 \quad (10)$$

در رابطه (10)، A ثابت سطح گسیختگی، N توان سطح گسیختگی، ثوابت عددی هستند که توسط کاربر تعیین می‌شوند و شکل منحنی ترسیم می‌شود. f_c مقاومت فشاری تک محوری استوانه‌ای و P_{HTL} حد کشش هیدرواستاتیکی می‌باشد. f_{Rate} تابعی از نرخ کرنش و نمایانگر ضریب افزایش دینامیکی است. این مدل ماده به همراه معادله حالت پی - آلفا³ مورد استفاده قرار می‌گیرد [14]. آلفا یک متغیر داخلی است که رابطه بین چگالی ماده کاملاً متراکم و ماده متخلخل را بیان می‌کند. این پارامتر با افزایش فشار کاهش می‌یابد و یک فرآیند بارگذاری غیر قابل بازگشت ایجاد می‌کند. همان طور که از شکل 6 مشخص است باربرداری در محدوده P_{crush} در امتداد ناحیه الاستیک اتفاق می‌افتد و یک کرنش حجمی ماندگار در ماده ایجاد می‌شود. بارگذاری مجدد در ماده در امتداد منحنی باربرداری آغاز می‌شود و زمانی که فشار به مقدار P_{comp} در ماده رسید ماده به صورت کاملاً متراکم $(\alpha = 1)$ محسوب می‌شود و پس از این نقطه معادله حالت ماده از یک معادله حالت معمول و رایج پیروی می‌کند. پارامترهای ورودی مدل آر - اچ - تی در جدول 5 آورده شده است.

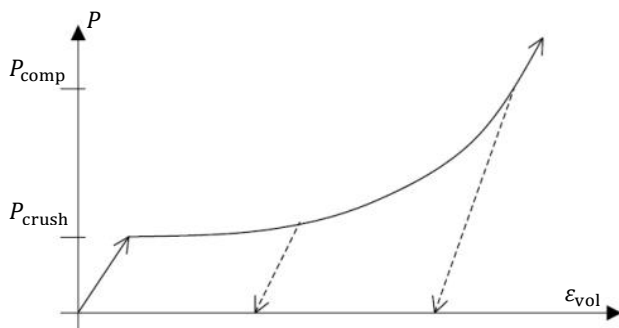


Fig. 6 Schematical description of the p - α equation of state [15]

شکل 6 شرح شماتیکی معادله حالت پی - آلفا [15]

کرنش بزرگ است هر دو این عوامل منجر به افزایش تنش جریان فلز می‌شوند و از طرفی گرمای تولید شده بر اثر کار پلاستیک نیز فرصت خروج از قطعه را ندارد و این گرما موجب کاهش تنش شارش می‌شود. در رابطه (9) اثرات فوق به صورت مستقل وارد شده است [12].

$$\bar{\sigma}_p = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C \log\left(\frac{\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_{p0}}\right))\left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{Melt} - T_{room}}\right)^m\right) \quad (9)$$

این مدل ماده به همراه معادله حالت گرونایزن بکار می‌رود ضرایب این مدل ماده و معادله حالت برای فلزات مورد استفاده در این تحقیق در جدول 4 داده شده است.

در رابطه (9)، $\bar{\epsilon}_p$ کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\epsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک، $\bar{\epsilon}_{p0}$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع بوده و سایر پارامترها در رابطه (A, B, C, n, m) پارامترهای ماده بوده و با استفاده از آزمون‌های دینامیکی کشش - پیچش و آزمون میله هایپکینسون¹ حاصل می‌شوند.

3-2-4- مدل بتن آر - اچ - تی²

مدل آر - اچ - تی یک مدل پلاستیسیته پیشرفته است که نام آن برگرفته از نام سه نفری است که این مدل را ایجاد نمودند [13]. این مدل برای شبیه سازی بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته‌اند، بسیار کارآمد است. در این مدل سخت شدگی کرنشی و وابستگی به ثابت سوم نصف‌النهار کششی - فشاری مدنظر است؛ و جهت مدل‌سازی آسان، رفتار نرم شدگی 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 می‌باشد؛ که عبارتند از سطح حدود الاستیک Y_{el} ، سطح گسیختگی Y_{fail} ، سطح مقاومت پسماند Y_{fric} که در شکل 5 نشان داده شده است.

مقاومت تسلیم Y با افزایش فشار هیدرواستاتیکی P افزایش می‌یابد. Y_{TXC} یک تابع مورد استفاده برای بیان فشار هیدرواستاتیکی است که وابسته به نصف‌النهار فشاری است. برای فشارهای پایین‌تر از $f_c/3$ نصف‌النهار فشاری توسط یک خط راست که از میان نقاط معلوم می‌گذرد، ترسیم می‌شود اما

جدول 4 پارامترهای ورودی برای فولاد و مس [6]

فولاد	مس بدون اکسیژن	نوع ماده
گرونایزن	گرونایزن	معادله حالت
7.83	8.93	چگالی (gr/cm ³)
792	89.6	A (MPa)
510	292	B (MPa)
0.26	0.31	n
0.014	0.025	C
1.03	1.09	m
1.93	1.96	پارامتر گرونایزن
4569	3940	سرعت صوت (m/s)
1.4	1.49	پارامتر S
2380	1356	دمای ذوب (K)

1- Hopkinson
2- RHT

می‌کند، برای حل این مشکل از روش زیر استفاده شد.

5-1- روش مرگ (فرسایش) المان

در این روش زمانی که وضعیت در یک المان به یک حد بحرانی تعیین شده برسد المان از محاسبات حذف می‌شود. محدوده حذف المان یک حد اختیاری است و به میزان تغییر شکل در ماده ارتباط دارد. مثلاً زمانی که کرنش پلاستیک یا تنش اصلی در یک المان به حد تعیین شده توسط کاربر برسد آن المان از محاسبات حذف می‌شود. این روش کاربرد گسترده‌ای در مسائل نفوذ دارد. به همین منظور در این مطالعه از معیار کرنش پلاستیک برای حذف المان‌ها استفاده شد. در این تحلیل از کرنش پلاستیک 200، 180، 150، 130، 100 درصد استفاده شد. نتایج عمق نفوذ در جدول 6 نشان داده شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده، کرنش 130 درصد برای فرسایش المان‌ها مناسب بوده و نتایج با مقاله مرجع کمتر از 5 درصد اختلاف دارد.

6- آنالیز حساسیت به مش بندی

به طور قطع می‌توان گفت در شبه‌سازی مسئله نفوذ خرج‌گود همانند تمامی شبه‌سازی‌ها چگالی مش و شکل آن اثر زیادی بر نتایج دارد. معمولاً شبه‌سازی‌هایی با مش ریزتر نتایج دقیق‌تر را نسبت به مش درشت‌تر حاصل می‌کند ولی شبکه مش بندی ریزتر زمان حل بیشتری را نیاز دارد لذا برای رسیدن به یک مش بهینه باید آنالیز حساسیت به مش بندی انجام شود. همچنین زمانی که معیار فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد اثر چگالی مش بندی بر نتایج معنی‌دار خواهد شد. به منظور مطالعه این اثر بر روی شکل‌گیری جت حاصل از نفوذگر مورد مطالعه، مش چهارگوش اویلری ماده منفجره، آستری، هوای اطراف با سایزهای 0.3، 0.7، 1.1، 1.6، 2، 3 و مش چهارگوش لاگرانژی هدف بتنی با سایز 0.3، 0.5، 0.8، 1.5، 2، 3 مدل‌سازی و تحلیل شد. آنالیز حساسیت به مش بندی برای فرآیند شکل‌گیری جت در جدول 7 نشان داده شده است. در این جدول سرعت نوک جت در $18 \mu\text{s}$ برای سایزهای مختلف محاسبه شد. با توجه به این که سرعت نوک جت در مقاله مرجع 6698 m/s متر بر ثانیه گزارش شده است با کاهش سایز مش از 2 mm به 0.3 mm همگرایی در نتایج (سرعت نوک جت) مشاهده شد؛ بنابراین از شبکه مش با اندازه $0.3 \times 0.3 \text{ mm}$ برای شبه‌سازی فرآیند شکل‌گیری جت استفاده شد. بعد از مدل‌سازی مسئله تعداد المان‌ها به 56400 عدد رسید.

جدول 6 عمق نفوذ برای کرنش‌های فرسایش مختلف

Table 6 penetration depth for different Erosion strains

عمق نفوذ (mm)	کرنش فرسایش
19.52	2
26.8	1.8
20.13	1.5
23.16	1.3
20.74	1

جدول 7 سرعت نوک جت در لحظه $18 \mu\text{s}$ برای سایزهای مختلف

Table 7 jet tip velocity for different mesh size at $18 \mu\text{s}$

سایز مش بندی (mm)						سرعت نوک جت (m/s)
0.2	0.3	0.7	1.1	1.6	2	
6685	6679	6050	5769	5234	4985	

جدول 5 پارامترهای ورودی مدل استحکام آر - اچ - تی [6]

Table 5 The input parameters for the RHT strength model [6]

140	40	استحکام فشاری بتن (MPa)
		معادله حالت
		چگالی (g/cm ³)
2.52	2.32	فشار در لحظه خرد شدن (MPa)
93.3	26.6	فشار در حالت تراکم کامل (GPa)
6	6	NP
3	3	مدل استحکام
		آر - اچ - تی
22.06	17	مدول برشی (GPa)
0.1	0.1	نسبت استحکام کششی (ft/fc)
0.18	0.18	نسبت استحکام برشی (fs/fc)
1.6	1.6	A
0.61	0.61	N
0.68	0.68	Q
0.01	0.01	B
0.7	0.7	GT
0.53	0.53	GC
1.6	1.6	AF
0.61	0.61	NF
0.009	0.031	BETAC
0.0125	0.035	BETAT

4- اثر فشار هیدرواستاتیک بر استحکام بتن

به دلیل این که نفوذگرهای چاه نفت در اعماق زمین به کار برده می‌شوند و صخره‌های زیرزمینی در چنین شرایطی خواص متفاوتی نسبت به حالت معمول و در سطح زمین دارند، اثر فشار هیدرواستاتیک مورد بررسی قرار گرفت. مواد موجود در اعماق زمین تحت فشار و تنش‌های جانبی قرار می‌گیرند. این تنش‌ها به صورت تنش قائم، تنش افقی ماکزیمم، تنش افقی مینیمم نامیده می‌شوند ($\sigma_H, \sigma_H, \sigma_V$) که معمولاً $\sigma_H \leq \sigma_V$ و در بسیاری مورد $\sigma_H \sim \sigma_V$ در نظر گرفته می‌شود. این تنش‌های باعث می‌شوند که صخره‌های زیرزمینی استحکام فشاری بیشتری نسبت به حالت معمول (سطح زمین) داشته باشند. به همین دلیل برای افزودن اثر هیدرواستاتیک، رابطه (11) برای محاسبه استحکام معادل بتن استفاده شد [15].

$$f'_c = \left(\frac{2}{3} - \frac{2}{9} \tan \theta \right) f_{c0} + \left(1 + \frac{2}{3} \tan \theta \right) P_H \quad (11)$$

در معادله (11)، f'_c استحکام فشاری در شرایط بدون تنش جانبی، P_H فشار هیدرواستاتیک که برای عمق 3000 m زیر زمین، 68 MPa گزارش شده است [16]، θ زاویه اصطکاک داخلی که برای بتن 50 deg است. با توجه به رابطه بالا بتن با استحکام فشاری 40 MPa در چنین عمقی همانند بتن 140MPa رفتار می‌کند.

5- مدل عددی نفوذ و معیار فرسایش المان

برای شبه‌سازی نفوذ پرتابه در بتن باید از یک الگوریتم محاسبه‌گر استفاده کنیم، به طوری که جت قادر به نفوذ در داخل هدف باشد، همان طور که گفته شد هدف به صورت لاگرانژی و جت به صورت اویلری تحلیل شده است برای تعامل بین المان‌های اویلری و لاگرانژی از قید لاگرانژ-این-سالیید استفاده شد. در روش حل لاگرانژی که در این مقاله برای پدیده نفوذ مورد استفاده قرار گرفت، شبکه ماده به همراه ماده تغییر شکل می‌دهد از این رو در مسائلی که تغییر شکل زیاد در ماده داریم مثل نفوذ، تحلیل مسئله به وسیله نرم‌افزار بسیار مشکل و بعضاً ناممکن است. چون برای رفع این مشکل باید نمونه‌های زمانی بسیار کوچک انتخاب شوند که حل مسئله را طولانی و ناممکن

برای این‌که جریانی که از دو طرف وارد محور شده برخورد کاملاً چسبنده‌ای داشته باشند و جت شکل پیدا کند باید رابطه (12) برقرار باشد [17].

$$v_{\text{flow,max}} \leq 1.23 \times C_0 \quad (12)$$

در اینجا $v_{\text{flow,max}}$ ماکزیمم سرعت جریان مواد آستری و C_0 سرعت موج صوت در مس که 3940 m/s است. با توجه به نتایج به دست آمده این شرط ارضا می‌شود. پارامترهای جت در جدول 8 آورده شده است که خطای کمتر از 10 درصد با داده‌های مرجع دارد که صحت شبیه‌سازی انجام گرفته و مدل‌های انتخابی برای مسئله را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل 8 مشخص است المان‌هایی که نزدیک به رأس آستری می‌باشند فرصت کافی برای رسیدن به سرعت نهایی خود را ندارند بنابراین یک گرادیان معکوس سرعت در این ناحیه به وجود می‌آید و موجب انباشتگی جرم در ناحیه نوک جت می‌شود این فرآیند به شکل‌گیری نوک جت معروف است. برای یک آستری کاملاً مخروطی 30 تا 40 درصد از ابتدای رأس مخروط به نوک جت تبدیل می‌شود که دارای شعاعی بزرگ‌تر نسبت به بقیه جت است.

به خاطر سرعت بسیار بالای جت، فشاری که در حین برخورد جت با المان‌های هدف ایجاد می‌شود بسیار بیشتر از مقاومت تسلیم هدف است لذا کرنش پلاستیک در المان‌های هدف از معیار فرسایش بالاتر می‌رود و این المان‌ها از تحلیل حذف می‌شوند به عبارت دیگر جت در هدف نفوذ می‌کند. شکل 9 نفوذ به همراه خسارت وارده به بتن را نشان می‌دهد. عمق نهایی نفوذ در بتن 140 MPa، 23.16 cm به دست آمد، با توجه به جدول 9 و با مقایسه با نتایج مقاله مرجع و با استفاده از رابطه تحلیلی اصلاح‌شده آلیسون - ویتالی، که یک ترم برای اثر دادن استحکام ماده هدف لحاظ شده است [6]، نتایج خطای کمتر از 10 درصد دارند که صحت الگوریتم انتخابی برای مسئله را نشان می‌دهد.

1-7- افزایش چگالی در راستای یال آستری مخروطی

با توجه به نتایج بخش قبل و اطمینان نسبت به صحت الگوریتم اختیار شده اکنون به ارائه مدلی برای خرج انفجاری می‌پردازیم که باعث افزایش عملکرد

جدول 8 پارامترهای جت در زمان 18 μs

Table 8 jet parameter at 18 μs		
نتایج منتشر شده در مقاله	نتایج شبیه‌سازی	پارامترهای جت
مرجع	ساز	جت
6698	6679	سرعت نوک جت (m/s)
2054	1997	سرعت دنباله جت (m/s)
12.7	12.02	طول مؤثر جت (cm)

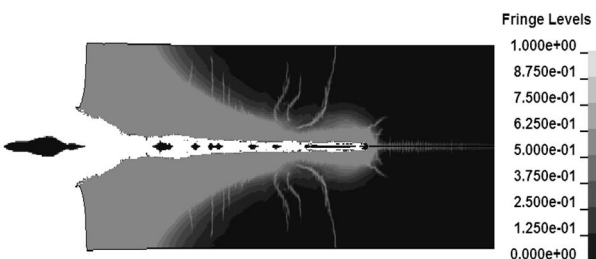


Fig. 9 The concrete damage contours

شکل 9 کانتورهای خسارت در هدف بتنی

نمودار شکل 7 حساسیت مسئله نفوذ لاگرانژی را به مش‌بندی نشان می‌دهد. در نمودار شکل 7 تغییرات عمق نفوذ در برابر تغییر سایز مش‌بندی برای بتن 140 MPa رسم شده است. همگرایی نتایج عمق نفوذ در مش با سایز 0.3 × 0.3 mm به دست آمد. به دلیل این‌که عمق نفوذ به دست آمده با سایز 0.5 × 0.5 mm حدود 1.02 درصد با عمق به دست آمده از سایز 0.3 × 0.3 mm اختلاف دارد از همین سایز برای این مسئله استفاده شد. بعد از انتخاب این سایز برای المان‌های هدف تعداد المان‌ها مجموعاً به 174400 عدد رسید.

7- نتایج و بحث

پس از شروع انفجار و فعال شدن خرج انفجاری امواج فشاری به صورت کروی شکل در خرج منتشر می‌شود و پس‌ازاینکه به آستری مسمی رسیدند به دلیل این‌که فشار در این امواج بسیار بیشتر از مقاومت تسلیم مس است آستری مسمی به راحتی سیلان کرده و از دو طرف وارد محور می‌شود و در آن‌جا به دو قسمت جت و اسلاگ تقسیم می‌شود. دلیل کشیدگی جت تغییرات سرعت فروپاشی از رأس مخروط به سمت قاعده است. این تغییرات در سرعت فروپاشی عامل ایجاد گرادیان سرعت در طول جت است. این گرادیان برای زمان 18 μs در شکل 8 نشان داده شده است.

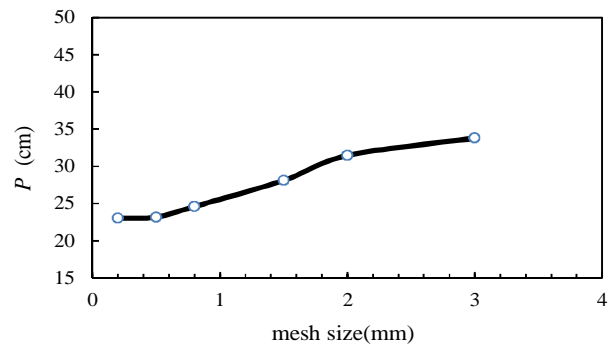


Fig. 7 The numerical penetration into 140 MPa concrete using different mesh sizes

شکل 7 نفوذ عددی در بتن 140 MPa با سایزهای مختلف مش‌بندی

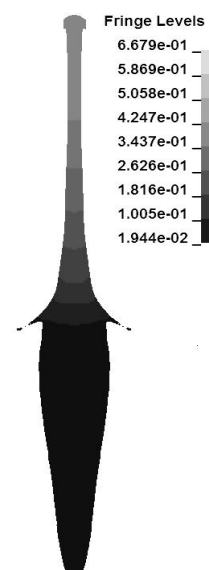


Fig. 8 velocity gradient in jet at 18 μs (cm/μs)

شکل 8 گرادیان سرعت جت در زمان 18 μs (cm/μs)

همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است مدلی که در آن فقط از یک ماده منفجره استفاده شده، پدیده گلوبی شدن و گسست جت ابتدا در ناحیه دنباله جت اتفاق می‌افتد که باعث کاهش طول مؤثر جت و عمق نهایی نفوذ می‌شود. در شکل 11 پدیده گلوبی شدن در ناحیه دنباله جت در زمان 50 μs مشخص است، جت در زمان 75 μs در این ناحیه دچار پدیده انقطاع می‌شود. تکه‌های جت دارای سرعت انحرافی شعاعی هستند که باعث برخورد با بدنه حفره می‌شود و عمق نفوذ کاهش می‌یابد و از طرفی طول مؤثر جت که رابطه مستقیم با عمق دارد کاهش می‌یابد که باعث کاهش در عمق نهایی نفوذ می‌شود. در هندسه جدید، توزیع سرعت در ناحیه دنباله جت همگن‌تر می‌شود، همگن شدن توزیع سرعت، پدیده گلوبی شدن و گسست را در این ناحیه بهبود می‌بخشد. با مقایسه شکل 11 و 12 مشخص می‌شود که در مدل اولیه که در تمام خرج‌گود از یک ماده منفجره استفاده شده است دنباله جت به 6 تکه تقسیم شده ولی با استفاده مدل جدید در ناحیه دنباله جت، به دلیل همگن‌تر شدن توزیع سرعت، دنباله جت به 2 قسمت تقسیم می‌شود. این امر موجب افزایش طول مؤثر جت و افزایش عملکرد نفوذگر می‌شود. همان‌طور که در جدول 10 مشخص است استفاده از سه ماده منفجره با ترتیب گفته شده موجب افزایش 20.21 درصدی در عملکرد نفوذگر می‌شود. با توجه به نمودارهای شکل 13 و 14 که برای هندسه جدید رسم شده است روند کاهش سرعت نوک جت نسبت به زمان بعد از برخورد با هدف را نشان می‌دهد همان‌طور که از این دو نمودار مشخص است در زمانی که هنوز سرعت نوک جت کاهش چندانی نیافته، نرخ افزایش عمق چشمگیر بوده ولی زمانی که سرعت نوک جت کاهش می‌یابد نرخ افزایش عمق نیز کاهش می‌یابد.

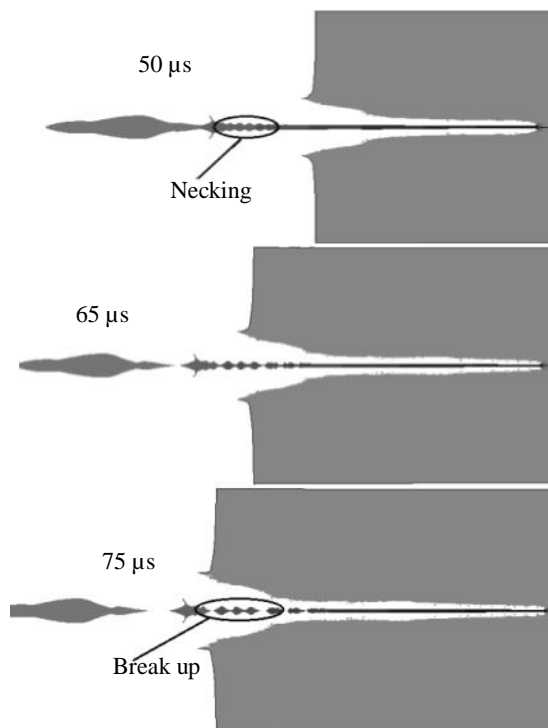


Fig. 11 Necking and breakup of jet in initial geometry

شکل 11 پدیده گلوبی شدن و گسست جت در هندسه اولیه خرج

جدول 9 مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مرجع و روابط تحلیلی
Table 9 Comparison of simulation results with reference data and analytic relations

عمق نفوذ (cm)	روش تحلیل
23.02	رابطه تحلیلی آلیسون-وینتالی
23.64	نتایج مقاله مرجع
23.16	شبیه‌سازی با ال - اس - داینا

نفوذگر می‌شود. در استاندارد ASTM $C_{33} - C_{67}$ کارایی نفوذگرها با عمق نفوذ سنجیده می‌شود [6]، لذا در این تحقیق عمق نفوذ به‌عنوان پارامتر اصلی اندازه‌گیری شد.

نوع ماده منفجره در شکل‌گیری جت و سرعت آن نقش بسزایی دارد. در این بخش با استفاده از سه ماده منفجره HMX, PBX, PE4 که مشخصات آن‌ها در جدول 2 و 3 داده شده است، هندسه‌ای مطابق شکل 10 برای خرج انفجاری پیشنهاد شد. این مدل به این دلیل پیشنهاد شد که فرآیند بارگذاری مواد منفجره به این صورت است که ابتدا مواد را به حالت مذاب درآورده و درون محفظه ریخته‌گری می‌کنند. به همین دلیل به راحتی می‌توان به هندسه شکل 10، دست پیدا کرد.

در تئوری پر موج انفجار که با سرعت U حرکت می‌کند پس از رسیدن به هر المان آن را مستقل از المان‌های مجاور با سرعت سیلان V_0 به‌طرف محور حرکت می‌دهد. سرعت حرکت المان‌ها بستگی به مکان اولیه آن‌ها دارد و از رأس به سمت قاعده عموماً کاهش می‌یابد. البته دلیل این امر کاهش کمربند ماده منفجره در محل قاعده مخروط آستری است و از یک طرف افزایش جرم آستری در حال سیلان می‌باشد. این کاهش سرعت سیلان باعث به وجود آمدن یک گرادیان سرعت می‌شود که در شکل 8 نشان داده شد. این گرادیان سرعت در نهایت منجر به کشیدگی جت و پدیده گسست می‌شود. سرعت سیلان با توجه به رابطه گرنی به دست می‌آید. رابطه کلی گرنی به‌صورت زیر است [17].

$$\frac{V_0}{\sqrt{2E}} = f\left(\frac{C}{M}\right) \quad (13)$$

در رابطه گرنی E ثابت تجربی که به‌عنوان انرژی گرنی شناخته می‌شود. F بستگی به هندسه خرج و صفحه فلزی دارد، C جرم مؤثر ماده منفجره، M جرم مؤثر المان آستری است. با توجه به رابطه گرنی، استفاده از این هندسه که در ناحیه قاعده آستری که ما کاهش کمربند ماده منفجره را داریم و از طرفی جرم المان در حال فروپاشی نیز افزایش می‌یابد از یک ماده‌ای همچون HMX و به ترتیب در ناحیه میانی از PBX و در ناحیه نوک هم از ماده منفجره PE4، باعث همگن شدن توزیع سرعت در ناحیه دنباله جت می‌شود.

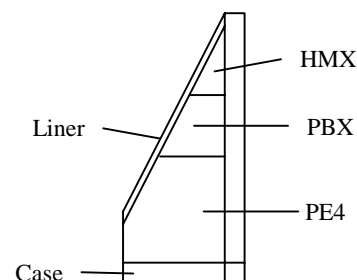


Fig. 10 the new geometry for Charge

شکل 10 هندسه جدید برای خرج انفجاری

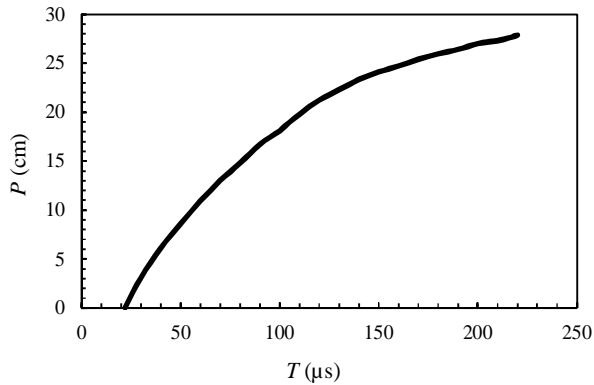


Fig. 14 Increase the penetration depth of time

شکل 14 افزایش عمق نفوذ نسبت به زمان

مدل‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد می‌توان از این هیدروکد برای بهینه‌سازی نفوذگرها استفاده کرد.

2- بعد از این که موج انفجار به رأس آستری می‌رسد به دلیل فشار بسیار بالا که از استحکام ماده آستری بسیار زیادتر است، آستری به سمت محور تقارن سیلان پیدا می‌کند برای این که المان‌های آستری که از دو طرف سیلان پیدا می‌کنند و روی محور تقارن با هم برخورد می‌کنند و به جت و اسلاگ تقسیم می‌شوند، برخورد کاملاً چسبنده داشته باشند باید سرعت جبهه موج تنش در ماده آستری بیشتر از 1.23 برابر سرعت برخورد آن المان به محور تقارن باشد تا به این طریق چسبندگی المان‌ها پس از برخورد به محور تضمین شود.

3- طبق استاندارد شرکت ملی نفت آمریکا بتن می‌تواند رفتار صخره‌های زیرزمینی را به خوبی شبیه‌سازی کند. در این تحقیق از مدل آر-اچ-تی برای شبیه‌سازی بتن تحت بارگذاری دینامیکی استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده این مدل می‌تواند در مسائلی همچون نفوذ و برخورد و ... به خوبی رفتار بتن و خسارت وارده و ترک‌های ایجاد شده تحت بارگذاری‌های سریع را شبیه‌سازی کند.

4- یکی از عوامل بسیار مهم در کارایی خرج گودها چگالی خرج انفجاری است. با افزایش چگالی سرعت انفجار و فشار و در نهایت سرعت فروپاشی المان‌های آستری افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه در قسمت قاعده آستری کمربند ماده منفجره کاهش می‌یابد و از طرفی جرم المان در حال فروپاشی افزایش پیدا می‌کند، کاهش سرعت سیلان را در المان‌های این ناحیه داریم که منجر به ناهمگن شدن توزیع سرعت در این قسمت می‌شود و گسست جت در این قسمت اتفاق می‌افتد. با استفاده از مدلی که برای خرج پیشنهاد شد ناهمگنی توزیع سرعت در این ناحیه رفع شد و طول مؤثر جت در نفوذ افزایش پیدا کرد که با این مدل افزایش عملکرد 20.57 درصدی مشاهده شد. همچنین در فرآیند نفوذ با کاهش سرعت نوک جت، نرخ افزایش عمق نفوذ جت در هدف کاهش می‌یابد

9- فهرست علائم

P	فشار (Pa)
T	دما (K)
U_D	سرعت جبهه موج (ms^{-1})
V_0	سرعت فروپاشی (ms^{-1})
V_j	سرعت جت (ms^{-1})

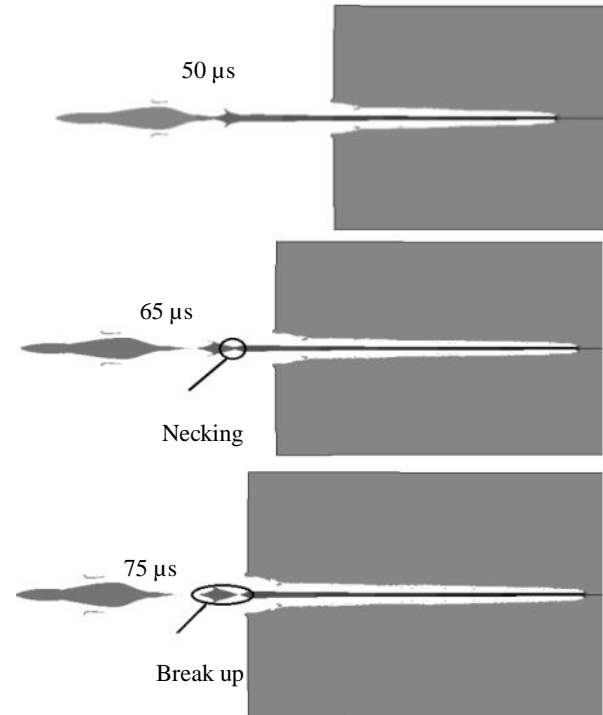


Fig. 12 Necking and breakup of jet in new geometry

شکل 12 پدیده گلوبی شدن و گسست جت در هندسه جدید خرج

جدول 10 مقایسه عمق نفوذ به دست آمده با هندسه جدید و اولیه خرج

Table 10 Compare the depth of penetration in new and basic geometry of charge

عمق نفوذ (cm)	نوع خرج انفجاری
23.16	PE4
27.84	HMX, PBX, PE4

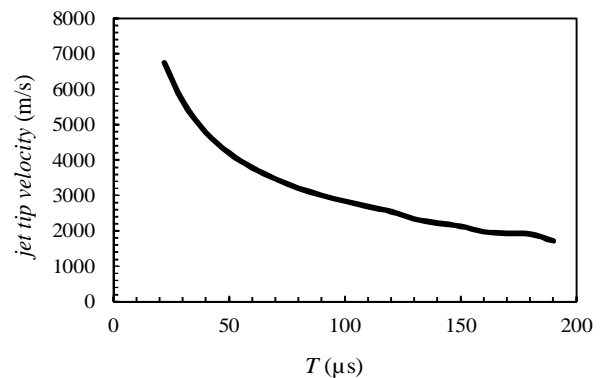


Fig. 13 decrease jet velocity by increasing the penetration depth

شکل 13 کاهش سرعت جت با افزایش عمق نفوذ

8- نتیجه گیری

1- در این تحقیق برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌گیری جت حاصل از خرج-گود از روش حل اویلرین چند ماده‌ای که به عنوان بخشی از روش حل ALE در هیدروکد ال-اس-داینا در دسترس است، استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی پدیده نفوذ از روش حل لاگرانژی با انتخاب معیار فرسایش استفاده شد که با این روش می‌توان این پدیده را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کرد. با توجه به پارامترهای خروجی جت اعم از سرعت نوک جت، گرادیان سرعت، طول مؤثر جت، شکل‌گیری نوک جت، که صحت روش حل و

- lined cavities, *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, No. 6, pp. 563-582, 1948
- [8] E. Pugh, R. Eichelberger, N. Rostoker, Theory of jetformation by charges with lined cavities, *Journal of Applied Physics*, Vol. 23, No. 5, pp. 532-536, 1952.
- [9] A. Mahdian, G. Liyaghat, M. Ghayour, M. Farzin, Examine ways to increase the speed of the shaped charge jet with specific geometry for simulation of space debris, *Proceedings of The 11th International conference of Iran Aerospace*, Tehran, shahid satari University of Science and Technology, 2012. (in persian فارسی)
- [10] M. Takalofi, A. Yosefikoma, Finite element modeling of steel material cutting with water jet contain particles winner, *Publication of Technical College*, Tehran, Vol. 43, No. 4, pp. 489 - 499, 2009. (in Persian فارسی)
- [11] S. Ghadami badrlou, E. Zamani, Analytical and numerical modeling explosive forming double pipes for pipe production, *Proceedings of The 1th Conference pipe and related industries*, Tehran, Institute of management in oil, gas and petrochemical, 2007 (in Persian فارسی).
- [12] M. L. Wilkins, *Computer simulation of dynamic phenomena*, pp. 80, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [13] T. Alizadeh, J. Moradlou, K. Naserasadi, Nonlinear dynamic behavior of concrete under impact loading and reviews parametric RHT model, *Proceedings of The 9th International Congress of Civil Engineering*, Isfahan, Isfahan University of Technology, 2012 (in Persian فارسی).
- [14] T. Borral, W. Riedel, The RHT concrete model in LS-DYNA, *Proceedings of The 8th European LS-DYNA user conference*, Strasbourg, 2011.
- [15] Q. M. Li, H. Meng, About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 2, pp. 343-360, 2003
- [16] Z. Tu, Y. Lu, Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 132-146, 2009
- [17] A. Mahdian, G. Liyaghat, M. Ghayour, M. Farzin, S. H. Banihashemi, Means for shaped charge perforator designed due to increase penetration efficiency and permeability, *Proceedings of The International conference of Iran Aerospace*, Tehran, Tarbiat Modares University, 2011 (in Persian فارسی).

سرعت دنباله (ms^{-1})	V_S
مشتق سرعت فروپاشی در جهت یال	V'_0
حد کشش هیدرودینامیکی (Pa)	P_{HTL}
کرنش پلاستیک معادل	$\bar{\epsilon}_P$
نرخ کرنش پلاستیک	$\dot{\epsilon}_P$
فشار هیدرواستاتیک (Pa)	P_H

علائم یونانی

حجم گازهای تولیدشده (m^3)	v
زاویه فروپاشی در تئوری پر (deg)	β
زاویه فروپاشی در تئوری بیرهوف (deg)	β^+
زاویه رأس آستری (deg)	α
زاویه اصطکاک داخلی (deg)	θ

10- مراجع

- [1] W. H. Lee, Oil well perforator design using 2D Eulerian code, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 535-559, 2002.
- [2] M. Taeri, Factors affecting depth and recrystallization of the shaped charge and provide strategies for improvement, *Proceedings of The 3th International conference of explosive material*, Tehran, Imam Hossein University, 2003 (in persian فارسی).
- [3] M. Huerta, M. G. Vigil, Design, analyses, and field test of a 0.7m conical shaped charge, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 8, pp. 1201-1213, 2006.
- [4] S. Saran, O. Ayisit, M. S. Yavuz, Experimental investigations on aluminum shaped charge liners, *Journal of Procedia Engineering*, Vol. 58, No. 1, pp. 479 - 486, 2013.
- [5] V. D. Nicolas, L. Vincent, A contribution to new ALE 2D Method validation, *Proceedings of The 11th International LS-DYNA user conference*, Dearborn, Michigan, 2010
- [6] T. Elshenawy, Q. M. Li, Influences of target strength and confinement on the penetration depth of an oil well perforator, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 54, No. 1, pp. 130-137, 2013.
- [7] G. Birkhoff, D. MacDougall, E. Pugh, G. Taylor, Explosives with