



شبیه سازی المان محدود فرایند خرج گود و مقایسه نتایج با تست های آزمایشگاهی و مدل جت بیرخوف

علیرضا فتحی^{1*}، پویا دهستانی²، حمیدرضا محمدی دانیالی³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 47148-71167 fathi@nit.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
هدف از این تحقیق شبیه سازی فرایند خرج گود با استفاده از روش حل اویلری می باشد. برای این منظور از تحلیل اجزای محدود برای شبیه سازی فرایند خرج گود استفاده شده است. در این شبیه سازی کل مدل از نوع المان های اویلری در نظر گرفته شده است. به علت سرعت بسیار زیاد انجام این فرایند، پارامتر نرخ کرنش و اثرات دمایی که تحت تغییر شکل های بسیار شدید ایجاد می شود، در این شبیه سازی لحاظ شده است. برای صحت سنجی روش حل المان محدود، نتایج شبیه سازی با نتایج بدست آمده در تست های آزمایشگاهی و مدل تحلیلی جت بیرخوف مقایسه شده است. مقایسه عمق نفوذ جت و نیز شکل حفره ایجاد شده در فرایند شبیه سازی با نتایج بدست آمده از آزمون نمونه های مشابه آزمایشگاهی به خوبی گواه بر صحت نتایج تحلیل اجزای محدود بوده است. همچنین مقایسه پارامترهایی نظیر سرعت فروپاشی لاینر، توزیع سرعت در طول جت و نیز هندسه جت شکل گرفته نشان داده است که نتایج شبیه سازی به خوبی با نتایج مدل جت بیرخوف همخوانی داشته است. لازم به ذکر است که در این شبیه سازی از نرم افزار المان محدود آباکوس جهت تحلیل فرایند خرج گود بهره گرفته شده است. همچنین فرایند کد نویسی نیز با استفاده از نرم افزار متلب صورت گرفته است.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 28 دی 1396 پذیرش: 21 فروردین 1397 ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397 کلید واژگان: خرج گود شبیه سازی المان محدود فروپاشی لاینر شکل گیری جت نفوذ جت

Finite element simulation of shaped charge and comparison of results with experimental tests and Birkhoff jet model

AliReza Fathi*, Pouya Dehestani, HamidReza Mohammadi Daniali

1- Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, fathi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 January 2018
Accepted 10 April 2018
Available Online 11 May 2018

Keywords:
Shaped charge
Finite element simulation
Liner collapse
Jet formation
Jet penetration

ABSTRACT

The aim of this paper is simulation of shaped charge process using Eulerian analysis. To this end, the finite element analysis was used to simulate the process of shaped charge. In this simulation, whole of the model has been considered from Eulerian elements. Since the processes of liner collapse, jet formation and penetration are performed in a very short time, as a result, the material behavior will be strongly dependent on the strain rate and temperature effects. So, strain rate dependency and thermal effect has been considered in this simulation. Verification of finite element method has been confirmed by comparing simulation with experimental tests and Birkhoff model. Comparison of penetration depth and profile of the cavity created in the target in finite element analysis with experimental samples has shown that the results are in good agreement with each other. Also comparing parameters such as liner collapse velocity, velocity distribution in jet length and jets profile has indicated that the simulation results are close to Birkhoff model. It should be noted that ABAQUS finite element software is used in this simulation to analyze the process of shaped charge. Also coding process is performed using Matlab software.

1- مقدمه

در داخل محفظه قرار می گیرند. ماده منفجره از قسمت جلویی توسط لاینر و از قسمت های پشتی و اطراف توسط محفظه احاطه شده است. با انفجار ماده منفجره یک موج پرفشار کروی ایجاد شده که با سرعتی بالغ بر 7000 کیلومتر بر ثانیه و فشاری در حدود 3×10^{10} پاسکال انتشار می یابد. وجود محفظه انفجاری سبب می شود تا انرژی آزاد شده حاصل از انفجار بر روی خط مرکزی (راس مخروط) لاینر متمرکز شود. با انتشار موج فشار حاصل از انفجار و

خرج گودها¹ تجهیزات انفجاری با قابلیت نفوذپذیری بسیار بالایی بوده و دارای کاربردهای وسیعی هم در صنایع نظامی و هم در صنایع غیرنظامی هستند. فرایند خرج گود از سه بخش اصلی شامل لاینر² مخروطی شکل، ماده منفجره³ و محفظه⁴ انفجاری توخالی تشکیل شده است. ماده منفجره و لاینر

¹ Shaped charge

² Liner

³ Explosive

⁴ Case

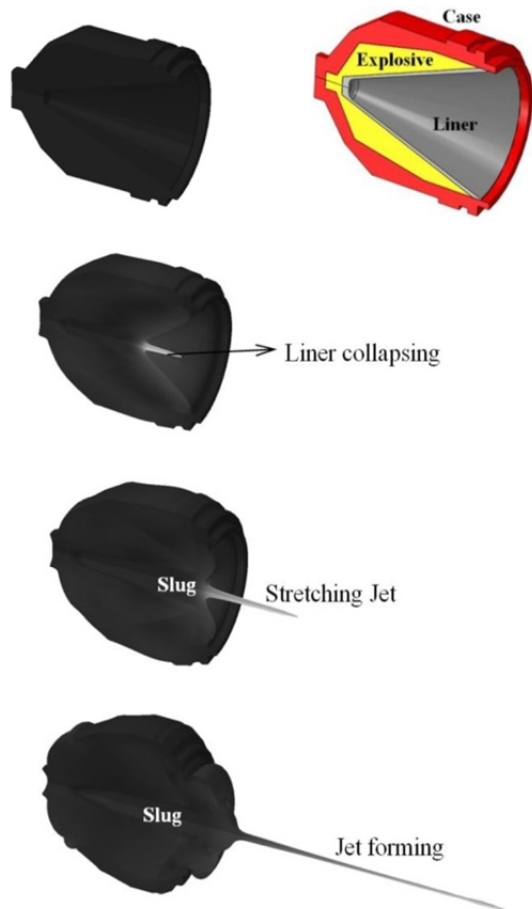


Fig. 1 A schematic of the jets formation and liner collapse process in shaped charge

شکل 1 شماتیکی از فرایند خرج گود و نحوه شکل‌گیری جت‌های حاصل از فروپاشی لاینر

عنوان یک سیال پیوسته و غیرقابل تراکم ارائه داده‌اند [9,8]. باگ، رستکر و همکاران تئوری حالت پایدار مدل بیرخوف را با لحاظ کردن ترم گرادیان سرعت اصلاح کردند [10]. تئوری آنها که با نام تئوری پی-ای-آر⁷ شناخته می‌شود، بر پایه همان فرضیات تئوری حالت پایدار بیرخوف است. اختلاف آنها تنها تفاوت در سرعت فروپاشی المان‌های لاینر می‌باشد. در واقع در تئوری پیشنهادی آنها سرعت فروپاشی دیگر ثابت در نظر گرفته نشده است. تیت نیز یک مدل الاستوپلاستیک برای نفوذ ارائه داده است [11]. او در مدل خود با فرض پلاستیسیته غیرقابل تراکم و صرف نظر از اثرات دمایی به یک رابطه ریاضی جهت تخمین شعاع حفره ایجاد شده در طی فرایند نفوذ دست یافته است. گرنی در مطالعات خود در زمینه فروپاشی لاینر از شتاب ذرات لاینر صرف نظر کرده و سرعت فروپاشی لاینر را ثابت در نظر گرفته است. او با فرض سرعت خطی موج انفجار و توزیع یکنواخت چگالی ماده منفجره، یک رابطه جهت تخمین سرعت فروپاشی لاینر ارائه کرده است. ترینکس، چو، فلیس⁸ و دیگر دانشمندان نیز روابطی مشابه بر پایه تئوری گرنی جهت تخمین سرعت فروپاشی ذرات لاینر ارائه داده‌اند [15-12]. راندرز و پرسون توانستند با دخالت دادن روابط تجربی برای شتاب لاینر، سرعت فروپاشی لاینر را بر حسب زمان تقریب بزنند [16]. هیرش نیز مطالعاتی بر روی مکانیزم گسست جت انجام داده و به یک رابطه تجربی جهت تخمین زمان

برخورد آن با راس مخروطی لاینر ذرات لاینر¹ در راستای انتشار موج فشار شتاب گرفته که در نهایت فروپاشی² ماده لاینر را در پی خواهد داشت. تحقیقات صورت گرفته نشان داده است که فشار ایجاد شده در راس مخروطی لاینر آنقدر زیاد می‌باشد (در حدود یک میلیون اتمسفر) که می‌توان از استحکام مکانیکی ماده لاینر و هدف مورد نظر چشم پوشی کرد. در نتیجه می‌توان رفتار آنها را همانند رفتار یک سیال در نظر گرفت [1].

با فروپاشی ذرات لاینر دو جت فلزی ایجاد می‌شود که هر دو دارای سرعت محوری در راستای انتشار موج فشار می‌باشند. یکی از جت‌های شکل گرفته با سرعت بالا در حدود 6 تا 12 کیلومتر بر ثانیه می‌باشد و در لحظه برخورد به هدف معمولاً به فرم باریکه‌ای کشیده و منسجم از یک جریان فلزی ظاهر می‌شود که فرایند نفوذ را انجام می‌دهد. اما برخی مواقع گسستگی‌هایی در این باریکه فلزی شکل‌گرفته مشاهده می‌شود و جت به صورت تعداد زیادی از تکه‌های فلزی مجزا و بدنبال هم ظاهر می‌شود. تحقیقات صورت گرفته نشان داده است که عدم پیوستگی و انسجام در پروفیل جت، موجب کاهش چشمگیری بر میزان عمق نفوذ آن در اهداف خواهد شد [2-4]. همچنین انحراف محوری در یک جت منسجم و پیوسته نیز می‌تواند یک عامل مهم در کاهش عمق نفوذ جت تلقی شود. جت دیگر که با نام اسلاگ³ شناخته می‌شود، دارای سرعتی پایین در حدود 1 کیلومتر بر ثانیه بوده که به دنبال جت هدف تشکیل می‌شود. در لاینرهای مخروطی بیشتر جرم لاینر پس از فروپاشی (حدود 80 تا 85 درصد جرم اولیه لاینر) وارد جت اسلاگ می‌شود. شماتیکی از فرایند خرج گود و نحوه شکل‌گیری جت‌های حاصل از فروپاشی لاینر در شکل 1 نشان داده شده است.

جت پس از برخورد به هدف، سبب ایجاد یک حفره طویل، باریک و تقریباً متقارن در هدف خواهد شد. سرعت اولیه نفوذ جت در هدف معمولاً در حدود 2 تا 3 کیلومتر بر ثانیه برآورد شده است. بررسی فرایند نفوذ جت در هدف، به شناخت کامل از رفتار پلاستیسیته ماده هدف نیازمند است. سرعت بالای نفوذ جت سبب ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک شدیدی شده که افزایش دما و نرخ کرنش‌های بالایی را در ماده هدف به دنبال خواهد داشت. همچنین آزمایش‌های صورت گرفته نشان داده است که پس از اتمام فرایند نفوذ جت در هدف، جرم ماده هدف قبل و بعد از نفوذ ثابت باقی می‌ماند [5]. تا به امروز تحقیقات زیادی در زمینه فرایند خرج گود صورت گرفته است. این پژوهش‌ها عمدتاً شامل نحوه فروپاشی لاینر و شکل‌گیری جت⁴، بررسی مکانیزم نفوذ جت⁵ در هدف و مطالعه بر روی پارامترهای تأثیرگذار جهت افزایش بازده نفوذ می‌باشند. ازل در مطالعات خود تأثیر پارامتر خواص مادی را بر عمق نفوذ جت مورد بررسی قرار داده است [6]. او در بررسی‌های خود از موادی با چگالی‌هایی در رنج 1000 تا 13000 کیلوگرم بر متر مکعب برای محفظه و لاینر و نیز شش نوع ماده منفجره استفاده کرده و تأثیر آنها را بر میزان عمق نفوذ مطالعه کرده است. آکسوی نیز در مطالعات خود تأثیر پارامترهایی نظیر ضخامت لاینر، نوع ماده منفجره و نقطه شروع انفجار را بر عملکرد فرایند خرج گود بررسی کرده است [7]. او جهت انجام تحقیقات خود از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار دیناتودی⁶ بهره گرفته است. بیرخوف، تیلور و همکاران نیز مکانیزم شکل‌گیری و نفوذ جت را بررسی کرده و یک مدل ساده هیدرودینامیکی غیرلزج با در نظر گرفتن جت و ماده هدف به

¹ Liner particles

² Collapse

³ Slug

⁴ Jet forming

⁵ Jet penetration

⁶ DYNA2D

⁷ P-E-R

⁸ Flis

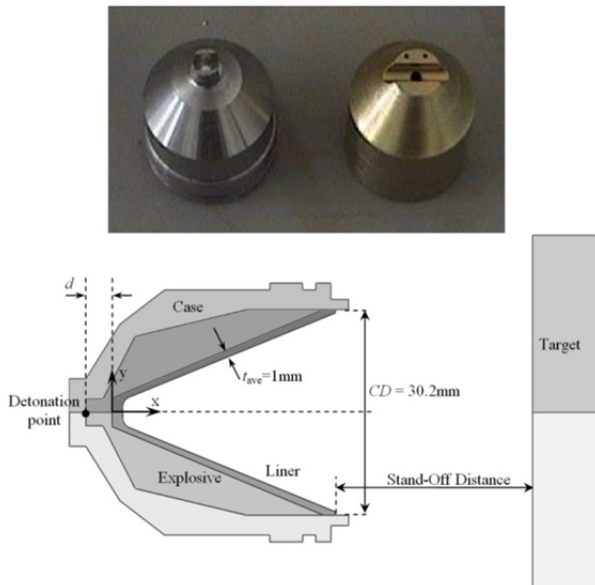


Fig 2 Experimental setup of shaped charge equipments along with a schematic of constituent parts

شکل 2 ستاپ آزمایشگاهی از تجهیزات خرج گود به همراه شماتیکی از بخش‌های تشکیل دهنده

2-2- معادلات ساختاری و خواص مکانیکی مواد

از آنجایی که پروسه فروپاشی لاینر، شکل‌گیری جت و نفوذ در مدت زمان بسیار کوتاه (در حدود 80 میکروثانیه) انجام می‌گیرد، در نتیجه رفتار ماده به شدت به نرخ کرنش و دما وابسته خواهد بود. از این رو در این شبیه‌سازی از مدل مادی جانسون-کوک⁵ برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی لاینر، محفظه انفجاری و ماده هدف استفاده شده است. مدل پلاستیسیته جانسون-کوک نوع خاصی از مدل پلاستیسیته ایزوتروپیک مایسز⁶ می‌باشد که در آن از یک رابطه تحلیلی جهت بیان وابستگی رفتار ماده به نرخ کرنش و تغییرات دمایی استفاده شده است. معادله ساختاری حاکم بر مدل مادی جانسون-کوک به صورت رابطه (1) بیان می‌شود:

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left[\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] \right] [1 - \bar{\theta}^m] \quad (1)$$

که در رابطه فوق $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک، $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک، A ، B ، C ، m و n نیز پارامترهای مادی اندازه‌گیری شده می‌باشد. پارامتر $\bar{\theta}$ نیز به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{برای } \theta < \theta_{transition} \\ \frac{\theta - \theta_{melt}}{\theta_{melt} - \theta_{transition}} & \text{برای } \theta_{transition} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & \text{برای } \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه فوق θ دمای ماده، θ_{melt} دمای نقطه ذوب و $\theta_{transition}$ دمای گذار ماده می‌باشد. در جدول 1 پارامترهای مدل جانسون-کوک برای فولاد و مس مورد استفاده در ساخت لاینر و محفظه انفجاری نشان داده شده است.

مدل مادی که برای شبیه‌سازی ماده منفجره در نظر گرفته شده است، معادله حالت جونز-ویلکنز-لی⁷ می‌باشد. این مدل مادی برای شبیه‌سازی فشار ایجادشده در اثر آزاد شدن انرژی شیمیایی حاصل از انفجار به کار می‌رود. معادله ساختاری حاکم بر این مدل مادی بر حسب انرژی داخلی بر

گسست دست یافته است [17]. در ادامه پژوهش‌های انجام شده در زمینه مکانیزم گسست، چو، والترز و بیکر نیز توانستند به طور مشابه روابطی نیمه تجربی جهت تخمین زمان گسست جت با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایشات ارائه دهند [18-20].

اخیراً مطالعات عددی به یک ابزار قدرتمند جهت شبیه‌سازی فرایند خرج گود تبدیل شده است. تاکنون تحقیقات وسیعی در این زمینه با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود صورت پذیرفته است [21-23]. ملیناری یک کد لاگرانژی المان محدود جهت شبیه‌سازی فرایند شکل‌گیری و نفوذ جت ارائه کرده است [24]. ونگ و همکاران با تکیه بر روش‌های عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی، تأثیر جنس ماده لاینر بر فرایند شکل‌گیری جت و قابلیت نفوذ را مورد مطالعه قرار داده‌اند [25]. مواد لاینر استفاده شده در تحقیقات او از جنس مس، فولاد و آلومینیوم انتخاب شده بودند. او و همکاران نیز از شبیه‌سازی عددی جهت تحلیل المان محدود سازه لاینر از زمان شروع شکل‌گیری جت تا پایان فرایند نفوذ استفاده کردند [26]. در مطالعات آنها، پارامترهای هندسی لاینر شامل زاویه راس مخروط، فاصله استند-آف و موقعیت شروع انفجار مورد تحلیل قرار گرفت.

در این مقاله قصد بر آن است تا با استفاده از فرایند شبیه‌سازی المان محدود، مکانیزم فروپاشی، شکل‌گیری و نفوذ جت در هدف مورد بررسی قرار گیرد. در شبیه‌سازی صورت گرفته پارامتر نرخ کرنش و اثرات دمایی که تحت تغییر شکل‌های بسیار شدید ایجاد می‌شود در نظر گرفته شده است. جهت صحت‌سنجی تحلیل المان محدود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و میزان عمق نفوذ جت در هدفی با جنس مشخص تخمین زده شده است. پس از فرایند صحت‌سنجی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج مدل تحلیلی فروپاشی و شکل‌گیری جت بیرخوف مقایسه شده است. شایان ذکر است که در این مقاله جهت انجام فرایند شبیه‌سازی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس¹ استفاده شده است.

2- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با تست آزمایشگاهی

2-1- مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی

برای انجام فرایند صحت‌سنجی، یک مجموعه² آزمایشگاهی از تجهیزات خرج گود در نظر گرفته شد. نمونه لاینر ساخته شده یک مخروط توخالی از جنس مس اکسیژن زدوده³ با ضخامت متوسط بدنه 1 میلی‌متر، قطر قاعده 30.2 میلی‌متر و زاویه راس 43 درجه بوده است. این ماده از 99.99 درصد مس خالص به همراه تنها 0.0005 درصد محتویات اکسیژن تشکیل شده که ماده-ای رایج در ساخت لاینر در فرایند خرج گود می‌باشد. ارتفاع لاینر از راس مخروط تا قاعده در حدود 34 میلی‌متر بوده است. محفظه و ماده هدف از جنس فولاد در نظر گرفته شد. هندسه ماده هدف یک استوانه با قطر 52 میلی‌متر و ارتفاع 80 میلی‌متر بود. انفجار نیز توسط ماده منفجره تی ان تی⁴ انجام شد. جرم کل ماده منفجره حدوداً 21 گرم بوده است. همچنین فاصله لاینر تا هدف و فاصله راس لاینر تا نقطه شروع انفجار به ترتیب 30 میلی‌متر و 4 میلی‌متر در نظر گرفته شده بود. لازم به ذکر است که آزمون‌های آزمایشگاهی در شرایط محیطی 1 اتمسفر و دمای 25 درجه سانتی‌گراد انجام شد. در شکل 2 مجموعه آزمایشگاهی از تجهیزات خرج گود به همراه شماتیکی از بخش‌های تشکیل دهنده نشان داده شده است.

¹ Abaqus

² Set up

³ Oxygen-free copper

⁴ TNT

⁵ Johnson-Cook

⁶ Mises

⁷ Jones-Wilkins-Lee [JWL]

علت وجود شرایط متقارن محوری⁶ و نیز جهت کاهش زمان تحلیل، تنها یک قطاع 10 درجه از هندسه بخش‌های مختلف در تحلیل المان محدود مدل شده بود. فرایند همگرایی مش نشان داد که حجم اولیه مورد نظر به تعداد حداقل 132000 المان (حدود 4.752 میلیون برای کل هندسه) جهت انجام فرایند شبیه‌سازی نیاز دارد. اندازه المان در مجاورت خط مرکزی لاینر (ناحیه‌ای که جت شکل می‌گیرد) حدود 0.3 میلی‌متر در نظر گرفته شده بود، در حالی که این مقدار در نواحی دورتر بین 0.5 میلی‌متر تا 1 میلی‌متر متغیر بوده است. المان بکار رفته در این تحلیل از نوع EC3D8RT بود که یک المان 8 گره‌ای سه بعدی با قابلیت کنترل ساعت شنی⁷ می‌باشد. در شکل 3 مراحل شکل‌گیری جت حاصل از فروپاشی لاینر با ضخامت 1 میلی‌متر و نفوذ آن در هدف در زمان‌های مختلف نشان داد.

آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعداد هشت نمونه مشابه انجام شده و شرایط آزمون برای تمامی نمونه‌ها کاملاً یکسان بوده است. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان عمق نفوذ جت در هدف در بازه 50 میلی‌متر تا 65 میلی‌متر متغیر بوده است، به طوری که کمترین میزان عمق نفوذ 51 میلی‌متر

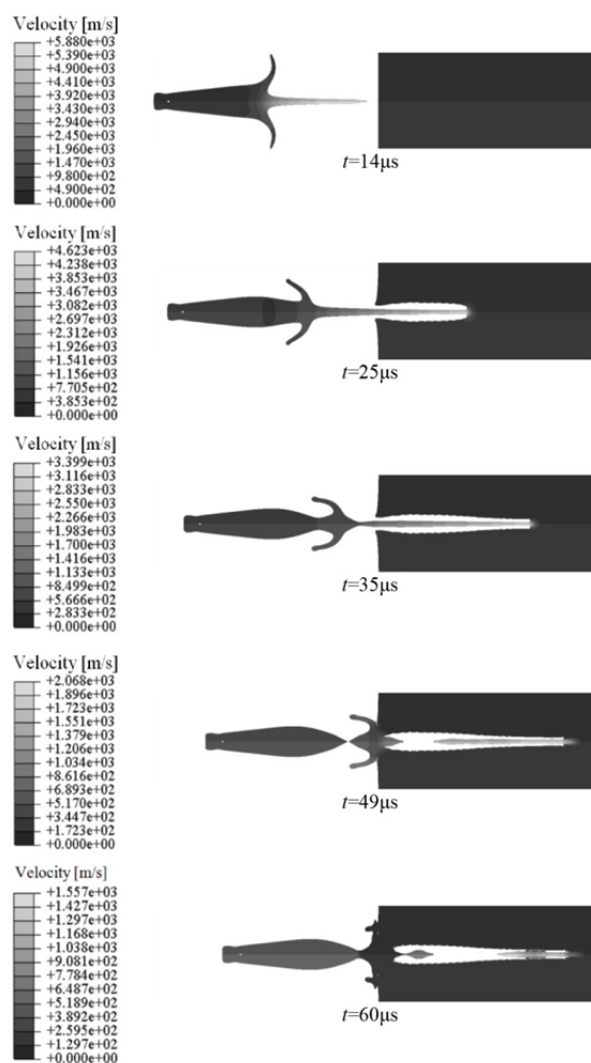


Fig. 3 Stages of jet formation and penetration in the target

شکل 3 مراحل شکل‌گیری و نفوذ جت در هدف

⁶ Axisymmetric

⁷ Hourglass Control

جدول 1 پارامترهای مدل مادی جانسون-کوک برای ماده لاینر و محفظه انفجاری [27,22]

Table 1 Johnson-Cook material model parameters for the liner and explosion case [22,27]

نوع ماده	Steel- AISI 1045	Copper-OFHC
ثابت‌های مادی		
A (MPa)	553	1425
B (MPa)	600	168
n	0.234	0.12
m	1	1
C	0.013	0.032
ρ (kg/m ³)	7850	8960
E (GPa)	210	125
ν	0.3	0.34
$\theta_{\text{transition}}$ (K)	293	293
θ_{melt} (K)	1733	1356

واحد جرم (E_m) به فرم رابطه (3) بیان می‌شود:

$$p = A \left[1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right] \exp \left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left[1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right] \exp \left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \omega \rho E_m \quad (3)$$

در رابطه فوق ρ_0 چگالی اولیه ماده منفجره قبل از شروع احتراق، ρ چگالی محصولات حاصل از احتراق، E_m چگالی انرژی انفجار و ω ، A ، B ، R_1 ، R_2 ثابت‌های مادی¹ می‌باشند که برای ماده منفجره مدنظر اندازه‌گیری شده‌اند. در جدول 2 ثابت‌های مادی اندازه‌گیری شده در معادله حالت جونز-ویلکنز-لی برای ماده منفجره تی ان تی نشان داده شده است.

3- صحت سنجی

وقوع تغییر شکل‌های بسیار زیاد در فرایند خرج گود، سبب خواهد شد تا المان‌ها به شدت دچار اعوجاج شوند، در نتیجه امکان شبیه‌سازی این فرایند با استفاده از آنالیز المان محدود لاگرانژی² وجود نخواهد داشت. بنابراین از تحلیل اولیه³ جهت شبیه‌سازی فرایند خرج گود استفاده شده است. در آنالیز اولیه نودها در فضای تحلیل ثابت بوده و ماده می‌تواند در المان‌ها جابجا شود، بدون آنکه المان‌ها تغییر شکل یابند. جابجایی ماده در المان‌ها بدون وقوع تغییر شکل در آنها سبب خواهد شد تا مشکل اعوجاج المان‌ها برطرف شده و قابلیت پیش‌بینی پدیده جریان ماده⁴ در آنالیز اولیه وجود داشته باشد. همچنین به علت سرعت بسیار زیاد انجام این فرایند، پارامتر نرخ کرنش و اثرات دمایی که تحت تغییر شکل‌های بسیار شدید ایجاد می‌شود، در این شبیه‌سازی لحاظ شده است.

در این تحقیق از تحلیل دینامیکی صریح⁵ برای شبیه‌سازی فرایند فروپاشی، شکل‌گیری و نفوذ جت در هدف استفاده شد. ابعاد هندسی مدل مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی توضیح داده شده در بخش قبل بوده است. به

جدول 2 ثابت‌های مادی ماده منفجره TNT [27]

نوع ماده	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω	ρ (kg/m ³)	D (m/s)
TNT	374	3.23	4.15	0.95	0.3	1630	6930

¹ Material constants

² Lagrangian Analysis

³ Eulerian Analysis

⁴ Material flow

⁵ Explicit Dynamic

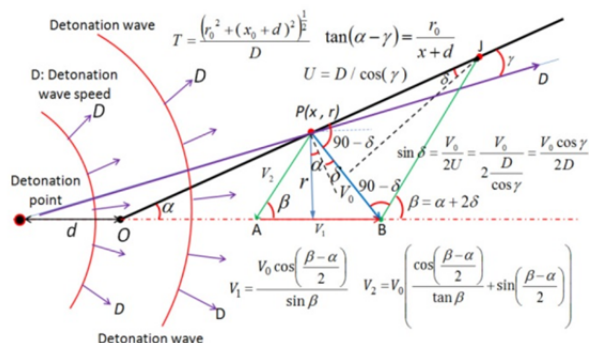


Fig. 5 A schematic of the Birkhoff model for predicting the process of liner collapse and jet formation

شکل 5 شماتیکی از مدل فروپاشی و شکل گیری جت بیرخوف

در رابطه فوق T ثابت زمانی، μ نسبت جرم لایر به جرم ماده منفجره و ترم $\sqrt{2E_{gur}}$ نیز به عنوان ثابت سرعت گرنی شناخته می شود. همچنین $T(i)$ مدت زمان لازم برای رسیدن موج فشار حاصل از انفجار بوده و مقدار آن به موقعیت اولیه المان نام (r_0, x_0) وابسته می باشد و از رابطه (5) محاسبه می شود:

$$T(i) = \frac{(r_0(i)^2 + x_0(i)^2)^{0.5}}{D} \quad (5)$$

در رابطه فوق D سرعت موج انفجار می باشد. در مدل بیرخوف زاویه تصویر³ از رابطه (6) تخمین زده می شود [20]:

$$\delta(i) = \sin^{-1} \left(\frac{V(i, t) \cos(\gamma(i))}{2D} \right) \quad (6)$$

در این رابطه γ زاویه برخورد⁴ می باشد که با توجه به هندسه شکل 5 از رابطه (7) بدست می آید [20]:

$$\gamma(i) = \alpha(i) - \tan^{-1} \left(\frac{r_0(i)}{x_0(i) + d} \right) \quad (7)$$

با مشخص بودن زاویه تصویر δ و سرعت فروپاشی $V(i, t)$ ، می توان با استفاده از مدل بیرخوف موقعیت هر المان لایر را پس از گذشت نمو زمانی dt از رابطه (8) محاسبه کرد [20]:

$$\begin{aligned} \dot{r}(i) &= r(i) - V(i, t) \cos(\alpha(i) + \delta(i)) dt \\ \dot{x}(i) &= x(i) + V(i, t) \sin(\alpha(i) + \delta(i)) dt \end{aligned} \quad (8)$$

با فرض فروپاشی پایدار، زاویه فروپاشی حالت پایا (فرض فروپاشی با سرعت ثابت) β^+ را می توان با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل 5 از رابطه (9) تقریب زد [20]:

$$\beta^+(i) = \alpha(i) + 2\delta(i) \quad (9)$$

اما مشاهدات حاکی از آن بوده که سرعت واپاشی از مسیر راس به سمت انتهای لایر کاهش می یابد و در نتیجه یک سطح واپاشیده با پروفیل غیرخطی ایجاد می شود. در این حالت زاویه فروپاشی در طول پروفیل لایر دیگر ثابت نبوده و رابطه 9 صادق نخواهد بود. با در نظر گرفتن سرعت فروپاشی غیرثابت، می توان زاویه فروپاشی تصحیح شده را از رابطه (10) تخمین زد [20]:

$$\tan \beta = \frac{\sin \beta^+ - X \sin(1 - \tan A \tan \delta) \frac{V_0}{V_0}}{\cos \beta^+ + X \sin(\tan A + \tan \delta) \frac{V_0}{V_0}} \quad (10)$$

در رابطه فوق:

$$A(i) = \frac{\beta^+(i) + \alpha(i)}{2} \quad (11)$$

بیرخوف و همکاران در ادامه پژوهش های خود تئوری نحوه شکل گیری جت را

و بیشترین میزان نفوذ در حدود 64 میلی متر گزارش شده است. میانگین عمق نفوذ برای هشت آزمون صورت گرفته نیز در حدود 59 میلی متر بوده است. فرایند شبیه سازی با استفاده از تحلیل المان محدود نیز میزان عمق نفوذ جت در هدف را در حدود 57 میلی متر پیش بینی کرده است. مقایسه نتایج بدست آمده در تخمین عمق نفوذ بیانگر صحت فرایند شبیه سازی بوده و نشان داد که تحلیل المان محدود قابلیت پیش بینی پروسه¹ فروپاشی لایر، شکل گیری و نفوذ جت را خواهد داشت. شکل 4 حفره ایجاد شده در اثر نفوذ جت در هدف را برای یکی از نمونه های تست آزمایشگاهی نشان می دهد که با نتایج بدست آمده از شبیه سازی مقایسه شده است.

4- مدل فروپاشی لایر و شکل گیری جت بیرخوف

هدف از این بخش ارائه مدل هیدرودینامیکی غیرلزج بیرخوف جهت پیش بینی پروسه فروپاشی لایر و شکل گیری جت در فرایند خرج گود می باشد که با در نظر گرفتن جت و ماده هدف به عنوان یک سیال پیوسته و غیرقابل تراکم ارائه شده است. همچنین در این مدل از تئوری فروپاشی پی ای-آر استفاده شده است. این تئوری بر پایه همان فرضیات تئوری حالت پایدار بیرخوف است، با این تفاوت که سرعت فروپاشی دیگر ثابت در نظر گرفته نشده است. شماتیکی² از مدل بیرخوف در شکل 5 نشان داده شده است.

در این مدل سرعت فروپاشی لایر در راستای ضخامت یکسان فرض شده است. با توجه به پژوهش های صورت گرفته در زمینه فروپاشی لایر، محققین توانستند تا با دخالت دادن روابط تجربی برای شتاب لایر، سرعت فروپاشی لایر را تقریب بزنند. پرکاربردترین فرمول جهت تخمین سرعت فروپاشی ذرات لایر در هر موقعیت توسط راندرز-پرسون ارائه شده است [16] که از رابطه (4) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\begin{aligned} V(i, t) &= V_0(i) \left[1 - \exp \left(-\frac{t - T(i)}{\tau} \right) \right], \\ V_0(i) &= \sqrt{2E_{gur}} \left[\frac{1}{4\mu(i)^2 + 5\mu(i) + 1} \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (4)$$

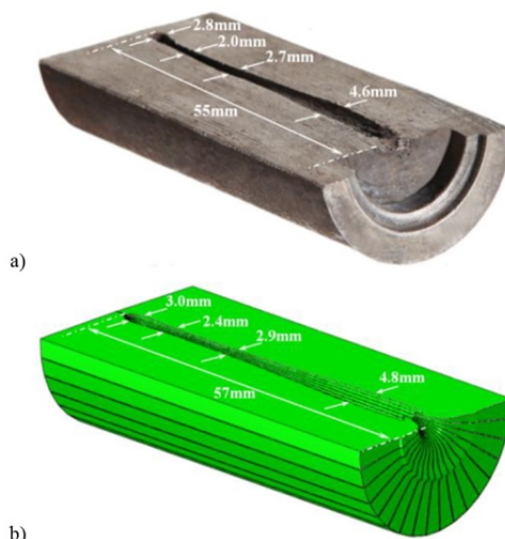


Fig. 4 The cavity created due to jet penetration into the target by using a) experimental testing; b) simulation process

شکل 4 حفره ایجاد شده در اثر نفوذ جت در هدف با استفاده از (a) تست آزمایشگاهی، (b) شبیه سازی المان محدود

³ Projection angle

⁴ Angle of incidence

¹ Process

² Schematic

نرم‌افزار متلب برای انجام فرایند کدنویسی استفاده شده است. در شکل 7 شبیه‌سازی مراحل فروپاشی لاینر و شکل‌گیری جت در زمان‌های مختلف، با استفاده از این مدل تحلیلی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ابعاد هندسی و خواص مادی در مدل بیرخوف مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی توضیح داده شده در بخش 2 بوده است.

در شکل 8 نمودار سرعت فروپاشی در راستای عمودی برای موقعیتی از لاینر که به فاصله 40 درصد از راس واقع شده، با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده شده که با نتایج مدل بیرخوف مقایسه شده است.

بررسی نمودار سرعت فروپاشی در شکل 8 نشان داده است که منحنی سرعت در فرایند شبیه‌سازی تا قبل از زمان ورود به جت، به خوبی با نتایج مدل تحلیلی مطابقت داشته است. به طوری که مقدار سرعت فروپاشی در راستای عمودی در لحظه ورود به جت، در شبیه‌سازی المان محدود 1684 متر بر ثانیه و در مدل بیرخوف 1886 متر بر ثانیه تخمین زده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که مقایسه انجام شده در شکل 8 می‌تواند گواه بر دقت بالای مدل تحلیلی بیرخوف در پیش‌بینی دینامیک حرکت ذرات در فرایند خرج گود باشد. در شکل 9 نیز نمودار سرعت جت شکل‌گرفته از فروپاشی لاینر پس از گذشت مدت زمان 15 میکروثانیه، بازی طول جت برای هر دو مدل مورد مطالعه نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاکی از سازگاری خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج بدست آمده از مدل بیرخوف بوده است.

شکل 10 نیز پروفایل جت و اسلاگ حاصل از فروپاشی لاینر را پس از گذشت مدت زمان 18 میکروثانیه، با استفاده از دو روش تحلیل المان محدود و مدل بیرخوف نشان می‌دهد که با هم مقایسه شده‌اند. این مقایسه نیز حکایت از آن دارد که پروفایل جت شکل‌گرفته در مدل تحلیلی، به خوبی با نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود همخوانی داشته است.

مورد بررسی قرار دادند [8]. به علت فشار بسیار زیاد حاصل از موج انفجار، آنها از استحکام لاینر صرف نظر کرده و رفتار آن را مشابه به یک سیال غیرلزج در نظر گرفتند. همچنین آنها فرایند شکل‌گیری جت را یک فرایند هیدرودینامیک غیرقابل تراکم در حالت پایا فرض کردند، که منجر به ایجاد یک جت با سرعت ثابت می‌شود. در نهایت با اعمال معادله برنولی غیرچرخشی و غیرقابل تراکم در حالت پایا و با در نظر گرفتن قانون بقای ممنتوم در راستای محور برای یک لاینر با زاویه راس ثابت، آنها توانستند سرعت و جرم جت و اسلاگ را با استفاده از روابط (12-15) استخراج کنند [20]:

$$V_j(i) = V_1(i) + V_2(i) = \frac{V_0(i) \cos\left(\alpha(i) + \delta(i) - \frac{\beta(i)}{2}\right)}{\sin \frac{\beta(i)}{2}} \quad (12)$$

$$V_s(i) = V_1(i) - V_2(i) = \frac{V_0(i) \cos\left(\alpha(i) + \delta(i) - \frac{\beta(i)}{2}\right)}{\cos \frac{\beta(i)}{2}} \quad (13)$$

$$m_j(i) = m(i) \sin^2\left(\frac{\beta(i)}{2}\right) \quad (14)$$

$$m_s(i) = m(i) \cos^2\left(\frac{\beta(i)}{2}\right) \quad (15)$$

لازم به ذکر است که در این مقاله از نرم افزار متلب جهت انجام فرایند کدنویسی استفاده شده است. در شکل 6 فلوچارتی از مراحل مدل بیرخوف جهت شبیه‌سازی فروپاشی لاینر و شکل‌گیری جت با استفاده از فرایند کدنویسی نشان داده شده است.

5- مقایسه مدل بیرخوف با نتایج شبیه‌سازی المان محدود

در این بخش به مقایسه نتایج شبیه‌سازی المان محدود با نتایج مدل بیرخوف پرداخته و توانایی این مدل در پیش‌بینی پروسه شکل‌گیری جت در فرایند خرج گود مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی مدل بیرخوف، از

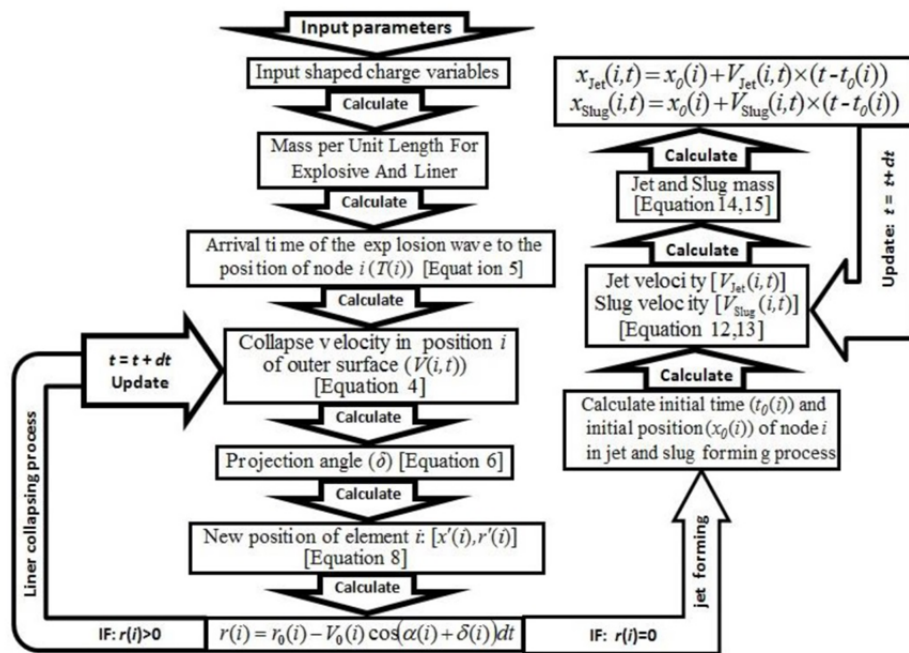


Fig. 6 Flowchart of the Birkhoff model for simulation of liner collapse and jet formation process

شکل 6 فلوچارتی از مدل بیرخوف جهت شبیه‌سازی فرایند فروپاشی لاینر و شکل‌گیری جت

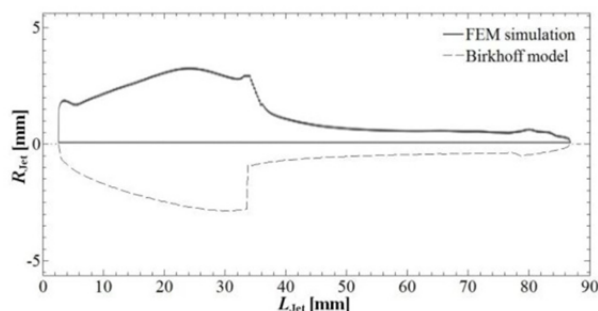


Fig. 10 Jet and slug profiles resulting from the collapse of the liner after a period of time $18 \mu s$ using both methods

شکل 10 پروفایل جت و اسلاگ حاصل از فروپاشی لاینر پس از گذشت مدت زمان 18 میکروثانیه، با استفاده از دو روش مورد مطالعه

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند خرج گود با بکارگیری روش تحلیل اویلری مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامتر نرخ کرنش و اثرات دمایی که تحت تغییر شکل‌های بسیار شدید ایجاد می‌شود، در این شبیه‌سازی لحاظ شده است. برای صحت‌سنجی تحلیل المان محدود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و عمق نفوذ جت در هدف با استفاده از هر دو روش تخمین زده شد. مقایسه صورت گرفته حاکی از دقت بالای تحلیل صورت گرفته در تخمین عمق نفوذ جت بوده است. پس از صحت‌سنجی، به مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج مدل تحلیلی جت بیرخوف پرداخته شد. در این مقایسه پارامترهایی نظیر سرعت فروپاشی المان‌های لاینر، توزیع سرعت در جت و پروفایل جت مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی نمودار سرعت فروپاشی المان‌های لاینر نشان داد که منحنی سرعت در فرایند شبیه‌سازی تا قبل از زمان ورود به جت، به خوبی با نتایج مدل بیرخوف مطابقت داشته است. مقایسه نمودار سرعت جت شکل‌گرفته از فروپاشی لاینر بازای طول جت برای هر دو مدل حاکی از سازگاری خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج بدست آمده از مدل بیرخوف بوده است. همچنین مقایسه پروفایل جت و اسلاگ حاصل از فروپاشی لاینر حکایت از آن داشت که پروفایل جت شکل‌گرفته در مدل تحلیلی، به خوبی با نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود همخوانی داشته است.

7- مراجع

- [1] C. Poole, *Penetration of a Shaped Charge*, PhD thesis, Oxford University, UK, 2005.
- [2] J. H. Brunton, High speed liquid impact, *Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series A*, Vol. 260, No. 1110, pp. 79-85, 1966.
- [3] M. Hashish, A modeling study of metal cutting with abrasive water jets, *Journal of Engineering Material*, Vol. 106, No. 1, pp. 88-100, 1984.
- [4] J. P. Curtis, R. J. Kelly, Circular streamline model of shaped-charge jet and slug formation with asymmetry, *Journal of Applied Physics*, Vol. 75, No. 12, pp. 7700-7709, 1994.
- [5] W. P. Walters, An overview of the shaped charge concept, *11th annual ARL/USMA technical symposium*, USA, 2003.
- [6] S. Özel, *Formation and Penetration of Shaped Charge Jets*, PhD thesis, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Turkey, 2000.
- [7] G. I. Aksoy, *Investigation of Liner Collapse in the Shaped Charge Technology*, PhD. Thesis, Mechanical Engineering Department, Ataturk University, 2006.
- [8] G. Birkhoff, D. P. MacDougall, E. M. Pugh, E. Taylor, Explosives with Lined Cavities, *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, No. 6, pp. 563-582, 1948.
- [9] T. E. Caywood, G. Birkhoff, Fluid flow patterns, *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, No. 11, pp. 646-659, 1949.
- [10] E. M. Pugh, R. J. Eichelberger, N. Rosteker, Theory of jet formation by charges with lined conical cavities, *Journal of Applied Physics*, Vol. 23, No. 8, pp. 532-538, 1976.

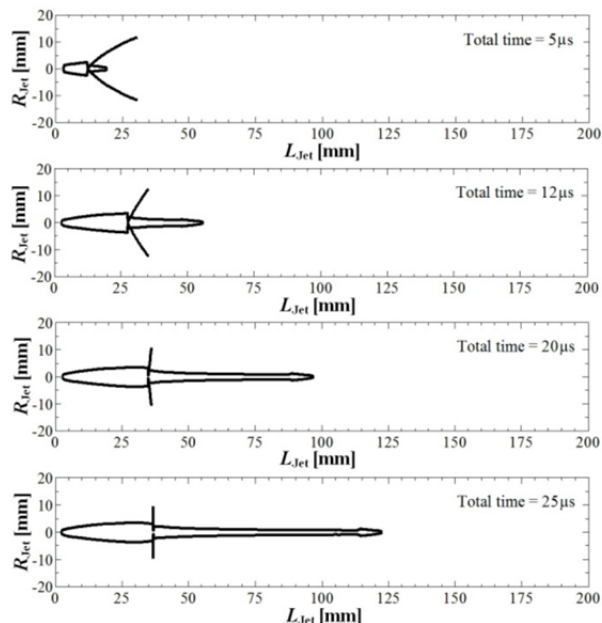


Fig. 7 Simulation of the liner collapse and jet formation process at different times using the proposed model

شکل 7 شبیه‌سازی مراحل فروپاشی لاینر و شکل‌گیری جت در زمان‌های مختلف، با استفاده از مدل بیرخوف

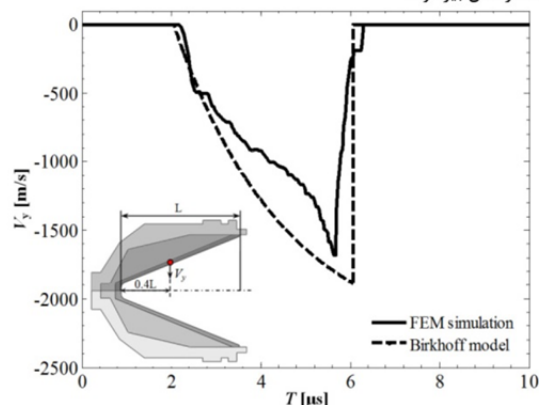


Fig. 8 collapse velocity in vertical direction at a distance of 40% from the cone apex by using both studied methods

شکل 8 نمودار سرعت فروپاشی در راستای عمودی نقطه‌ای از لاینر در فاصله 40 درصد از راس، با استفاده از هر دو روش مورد مطالعه

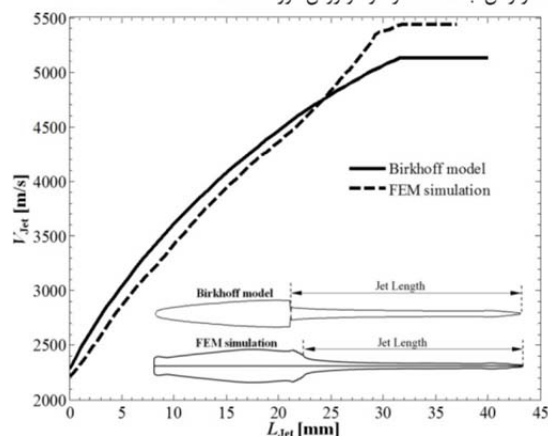


Fig. 9 Jet velocity curve per jet length resulting from both studied methods after passing $15 \mu s$

شکل 9 نمودار سرعت جت حاصل از فروپاشی لاینر پس از گذشت زمان 15 میکروثانیه، بازای طول جت برای هر دو روش مورد مطالعه

- [21] S. Chen, W. B. Li, X. M. Wang, W. J. Yao, Penetration research of dual-mode penetrator formed by shaped charge with wave shaper, *Porcedia Engineering*, Vol. 173, pp. 57-64, 2017.
- [22] H. Junqing, Z. Wei, W. Wenyue, H. Kelei, The 3D numerical simulation of the shaped charge jet penetration through the steel target, *The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*, Atlantis Press, Paris, France, pp. 152-164, 2012.
- [23] D. L. Feng, M. B. Liu, H. Q. Li, G. R. Liu, Smoothed particle hydrodynamics modeling of linear shaped charge with jet formation and penetration effects, *Journal of Computers & Fluids*, Vol. 86, No. 11, pp. 77-85, 2013.
- [24] J. F. Molinari, Finite element simulation of shaped charges, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, pp. 921-936, 2002.
- [25] C. Wang, J. Ding, H. Zhao, Numerical Simulation on jet formation of shaped charge with different liner materials, *Defence Science Journal*, Vol. 65, pp. 279-286, 2015.
- [26] J. H. Ou, J. B. Ou, Y. J. Jhu, The design and analysis for shaped charge liner using Taguchi method, *International Journal of Mechanics*, Vol. 8, No. 4, pp. 53-61, 2014.
- [27] C. Z. Duan, T. Dou, Y. J. Cai, Y. Y. Li, Finite element simulation and experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 hardened steel, *International Journal of Production and Industrial Engineering*, Vol. 2, No. 6, pp. 28-32, 2011.
- [11] A. Tate, Long rod penetration models - part I: A flow field model for high speed long rod penetration, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 28, No. 12, pp. 535-548, 1986.
- [12] P. C. Chou, W. J. Flis, Recent developments in shaped charge technology, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 11, pp. 99-114, 1986.
- [13] G. E. Duvall, J. O. Erkman, Technical Report No.1, *Stanford Research Institute*, USA, 1958.
- [14] A. N. Mikhailov, A. Dremlin, Flight speed of plate propelled by products from sliding detonation, *Fizika Gorenia I Vzryva*, Vol. 10, No. 4, pp. 877-884, 1974.
- [15] L. A. Shushko, B. I. Shekter, S. L. Krysh'kov, Bending of a metal strip by a sliding detonation wave, *Fizika Gorenia I Vzryva*, Vol. 11, No. 4, pp. 264-274, 1975.
- [16] G. Randers, An improved equation of calculating fragment projection angle, *Proceedings of 2nd Symposium on Ballistics, Daytona Beach, USA*, pp. 23-40 1976.
- [17] E. Hirsch, Scaling of the shaped charge jet break up time, *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, Vol. 31, pp. 230-233, 2006.
- [18] E. Baker, *Modeling and Optimization of Shaped Charge Liner Collapse and Jet Formation*, PhD. Thesis, Washington State University, USA, 1992.
- [19] W. P. Walters, R. L. Summers, A review of jet break up models, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 18, pp. 241-246, 1993.
- [20] W. P. Walters, J. A. Zukas, An overview of fundamental of Shaped Charge Jets, *Journal of Materials and Manufacturing processes*, Vol. 9, pp. 151-157, 1994.