

## بررسی مدل تحلیلی لوک و پیکوتووسکی برای پیش بینی عملکرد پرتابه میله بلند فرسایشی در اهداف فلزی

امین مسلمی پطرودی\*، محمدحسن کامیاب

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران  
\*مسئول مکاتبات: amin.moslemi2020@gmail.com

### واژگان کلیدی

مدل تحلیلی نفوذ پرتابه میله بلند فرسایشی انبساط حفره کروی

### تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰  
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

### چکیده

مدل سازی و تحلیل مسأله ضربه و نفوذ پرتابه‌ها در اهداف و آثار ناشی از آن نیز از جمله موضوعات کاربردی است که از کاربردهای مهم می‌توان به طراحی پانل ضدگلوله و تجهیزات نظامی، ساخت سازه‌های مقاوم در برابر ضربه و نفوذ، طراحی پرتابه‌ها با قدرت نفوذ مناسب و کارایی بالا اشاره کرد. در این مقاله از مدل تحلیلی برای پیش‌بینی عملکرد پرتابه میله بلند فرسایشی استفاده شده که با سرعت  $2 \text{ km/s}$  بصورت نرمال در اهداف فلزی نفوذ کرده و این مدل قطر حفره، عمق نفوذ و سرعت نفوذ را به عنوان توابع سرعت پرتابه پیش‌بینی می‌کند. آزمون عکس‌های اشعه ایکس نشان می‌دهد که نوک پرتابه پس از نفوذ در هدف به شکل قارچی درآمده و تقریباً شکل سر نیم‌کروی خود را در تمام مراحل اولیه شبه‌ثابت نفوذ حفظ کرده است. برای ارزیابی بالستیک نهایی، پرتابه فولادی و تنگستنی در هدف آلومینیومی با سرعت بین  $2 \text{ km/s}$  تا  $3/1 \text{ km/s}$  نفوذ کرده و در ادامه از نتایج تحلیل انبساط حفره کروی بر روی پرتابه‌های غیر تغییرشکل‌پذیر استفاده شده تا مقاومت هدف را در برابر نفوذ پرتابه‌های فرسایشی بتوان محاسبه کرد. مدل تحلیلی ارائه‌شده با توجه به فرضیات حاکم بر آن، توافق کاملاً مناسبی با مقادیر تجربی مختلف دارد.

## Investigation of Luk and Piekutowski analytical model for predicting the performance of long rod eroding projectiles into metal targets

Amin Moslemi Petruodi, Mohammad Hassan Kumyub

Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

### Abstract

Modeling and analyzing the problem of impact and penetration of projectiles in the targets and the effects are also among the practical issues that can be used to design bulletproof panels and military equipment, construction of impact and impact resistant structures, design of projectiles with appropriate penetration power and high efficiency noted. In this paper, the analytical model is used to predict the performance of a long rod eroding projectile that normally penetrates metal targets at speed of  $2 \text{ km/s}$ , and this model predicts the hole diameter, penetration of depth, and penetration velocity as functions of the projectile velocity. X-ray evaluation shows that the nose of the projectile becomes mushroom after penetrating the target and retains almost its hemispherical head shape in all the early stages of quasi-constant penetration. For the final ballistic evaluation, steel and tungsten projectiles penetrated the aluminum target at a speed between  $1.3$  to  $2 \text{ km/s}$  and then the results of spherical cavity expansion analysis on non-deformable projectiles were used to calculate the target resistance to erosive projectiles. The aimed analytical model, according to the available hypotheses, agrees quite well with different experimental values.

### Keywords

Analytical model  
Penetration  
Long rod eroding projectile  
Spherical cavity expansion

### Article history

Received: 29 Feb 2020  
Accepted: 06 Mar 2021

## ۱ مقدمه

فرمول‌های تجربی و یا مدل‌سازی تحلیلی و یا شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند انجام پذیرد. معمولاً ایجاد فرمول‌های تجربی براساس آزمایش‌های جامعی استوار است که در مطالعات پارامتریک ایجاد هزینه هنگفتی می‌نمایند و شبیه‌سازی‌های عددی نیز معمولاً به ابرکامپیوترها جهت حل معادلات فضایی با نمو زمانی نیازمندند. بنابراین استفاده از مدل‌های تحلیلی، که براساس حفظ اصول و ایجاد فرضیاتی برای ساده‌سازی استوار شده است، مورد علاقه می‌باشد [۲]. آلکسیوسکی<sup>۲</sup> [۳] و تیت<sup>۳</sup> [۴، ۵] با اصلاح تئوری‌های جت سیال، برای در نظر گرفتن مقاومت‌های مواد میله و هدف، مدل‌هایی را که نفوذ سرعت بالا را با میله‌های فرسایشی توصیف می‌نمایند، توسعه بخشیده‌اند. این مدل‌ها که به «مدل‌های هیدرودینامیک اصلاح شده» مشهور هستند و به شدت مورد توجه قرار گرفتند، پیشگویی‌کننده‌های خوبی برای مشخصه‌های عمومی واقعه نفوذ بودند [۶]. هوهرل و استیلپ<sup>۴</sup> [۷، ۸] یکسری آزمایش‌های بالستیک نهایی را، با میله‌های فولادی و تنگستنی در اهداف آلومینیومی و فولادی، رهبری نمودند و سازگاری خوب و معقولی را مابین داده‌های آزمایش‌ها و پیشگویی‌های این مدل‌ها یافتند. فورستال<sup>۵</sup> و همکارانش [۹] میله‌های فولادی را در اهداف شبیه‌سازی شده شلیک نمودند و مقایسه امید بخشی را مابین پیشگویی‌های مدل‌ها و داده‌ها به اثبات رساندند. با وجود این، مدل‌های اصلاح شده هیدرودینامیک نمی‌توانند اثرات مقاومت میله و هدف را در متن تئوری‌ها توضیح دهند. تیت [۱۰، ۱۱] در طی آخرین مقاله، مدل میدان جریان را برای توصیف فازهای گذرا و شبه‌پایدار اولیه و پس جریان نفوذ مواد غیرقابل تراکم، توسعه بخشید. در این مدل او رابطه‌ای را مابین عوامل مقاومت در مدل اصلاح شده هیدرودینامیک و مقاومت تسلیم دینامیک مواد ایجاد نمود. پیشگویی مدل او و داده‌های آزمایش‌های تجربی بر روی قطر حفره و عمق نفوذ سازگاری خوبی را نشان دادند. در این مقاله یک مدل تحلیلی برای پیشگویی عملکرد میله‌های بلند فرسایشی نفوذکننده در اهداف فلزی توسعه داده شده است. این مدل بر اساس حفظ اصولی همانند: تئوری بقای مومنت تیلور<sup>۶</sup> [۱۲] و تئوری بقای انرژی هاوکینارد<sup>۷</sup> [۱۳] بر روی پرتابه‌های با انتهای تخت برخوردکننده به هدف مسطح و صلب و با استفاده از نتایج مشاهدات تصاویر اشعه ایکس مواد، در حین نفوذ و پس از آن، استوار شده است. شکل ۱ دو تصویر اشعه ایکس را پس از آزمایش، از مقطع هدف آلومینیومی T651-6061 و مقطع هدف فولادی ۴۳۴۰ نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، حفره نسبتاً مستقیم با سطح مقطع ثابت بجز در نزدیکی انتهای حفره که در آن باریک شدگی اتفاق می‌افتد، مشاهده می‌گردد. در ضمن دو تصویر پیاپی اشعه ایکس که از میله فولادی ۴۳۴۰ در حین نفوذ در هدف آلومینیومی T651-6061 تهیه شده است، شکل ۲ نشان می‌دهد که دماغه پرتابه فرسایشی قارچی شکل شده تقریباً حالت نیم‌کروی نفوذ می‌نماید. این مشاهدات نشان می‌دهند که علی‌رغم فرسایش میله، باز هم امکان استفاده از روش نفوذ میله صلب برای محاسبه مقاومت هدف در مقابل نفوذ میله‌های فرسایشی فراهم است. بصورت تحلیلی، این عمل با استفاده از نتایج تحلیل انبساط کروی حفره بر روی پرتابه‌های صلب انجام می‌گردد [۱۴، ۱۵]. آیشلبرگر و گرینگ<sup>۸</sup> [۱۶]، برخورد سرعت بالا را با چهار فاز پی‌درپی: گذرا، اولیه، ثانویه و

مکانیک نفوذ به بررسی اثرات متقابل پرتابه‌ها و اهداف می‌پردازد و عوامل مؤثر در نفوذ را معرفی می‌کند. در طراحی زره‌ها با حداقل وزن، این نکته حائز اهمیت می‌باشد که زمانی وزن زره کاهش می‌یابد، مقاومت به نفوذ آن باید هم‌چنان بالا باقی بماند. از این رو پیشرفت‌های وسیعی در این زمینه صورت گرفته است که از موادی برای ساهت زره استفاده شود که وزن پایین و مقاومت به نفوذ بالایی داشته باشند؛ که به عنوان نمونه می‌توان به سرامیک اشاره کرد که در ساخت زره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که هم دارای وزن پایین بوده و هم چنین مقاومت به نفوذ بالایی، دارد. از جمله اقداماتی که در طراحی زره، به منظور کاهش وزن زره صورت گرفته است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

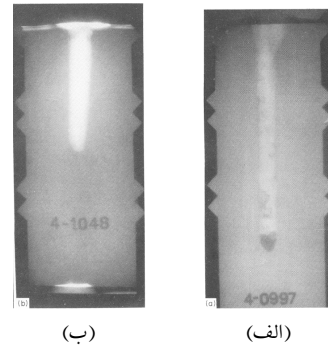
- استفاده از زره‌های فاصله دار یا بهم چسبیده شده که از دو یا چند صفحه‌ی آلومینیومی و یا فولادی ساخته شده است.
  - استفاده از زره‌های مرکب که از سرامیک به عنوان صفحه‌ی جلویی (صفحه‌ای که مستقیم در معرض ضربه پرتابه قرار دارد) و یک ورق آلایژی یا فلزی به عنوان صفحه‌ی پشتی، به کار برده شده و این دو صفحه با ضخامت ناچیزی از چسب بهم چسبیده شده‌اند.
- نفوذ پرتابه در هدف یک پدیده پیچیده، غیرخطی و گذرا بوده و محققان زیادی در زمینه مدل‌سازی عددی و تجربی زره‌پوش‌های کامپوزیتی و اثرات بالستیک بر نفوذ و ضربه مواد سرامیکی تحقیق و پژوهش کردند [۱]. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در امر نفوذ، سرعت برخورد پرتابه است. مکانیزم نفوذ در محدوده‌های مختلف سرعت، متفاوت است. در سرعت‌های پایین تئوری‌های مختلفی برای تحلیل فرآیند ضربه و شکست ارائه گردیده است. یکی از پارامترهای مهم دیگر که در فرآیند نفوذ تأثیر بسیاری دارد، زاویه برخورد پرتابه و هدف است. بالستیک نهایی: پدیده‌ها و اتفاقات بعد از برخورد پرتابه به هدف تا پایان فرآیند نفوذ و یا توقف کامل پرتابه را تجزیه و تحلیل می‌نماید. پرتابه میله بلند: پرتابه‌ای است که دارای نسبت طول به قطر با  $\frac{L}{D} > 3$  است. انرژی جنبشی ضدزره با نام اختصاری APDSFS<sup>۱</sup> از اثر بخشی بالایی برخوردار می‌باشد. تأثیر قطر (سطح مقطع) پرتابه: قطر پرتابه از جمله پارامترهای مهم و مؤثر در نفوذ است. افزایش قطر پرتابه افزایش سطح مقطع برخورد را در پی دارد و این عامل در سرامیک‌ها که ترد هستند و رفتار شکننده از خود نشان می‌دهند باعث کاهش سرعت حد بالستیک می‌شود. به بیان دیگر به خاطر تردی سرامیک هرچه سطح مقطع برخورد بیشتر باشد، سطح بیشتری از سرامیک در لحظه اولیه برخورد شکسته می‌شود و در نتیجه نفوذ پرتابه را آسان‌تر می‌سازد. عمق نفوذ: طول حفره ناشی از نفوذ پرتابه در راستای حرکت آن در درون هدف عمق نفوذ نامیده می‌شود. آهنگ فرسایش میله: به آهنگ کاهش طول میله در واحد زمان اطلاق می‌گردد. قارچی شکل شدن پرتابه: به جریان یافتن مواد سر پرتابه، پس از برخورد آن به هدف، در جهت شعاعی و ازدیاد سطح مقطع پرتابه گفته می‌شود [۱].

با استفاده از بررسی‌های جامع اندرسون و بادنر بر روی بالستیک نهایی، در رابطه با پرتابه‌های صلب و تغییر شکل‌پذیر، فعالیت‌هایی بصورت ایجاد

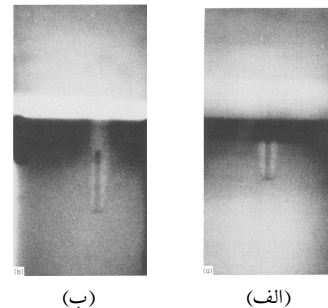
<sup>1</sup>armour piercing, discarding sabot, fin stabilized <sup>2</sup>Alekseevskii  
<sup>8</sup>Eichelberger and Gehring

<sup>3</sup>Tate <sup>4</sup>Hohler and Stilp <sup>5</sup>Forrestal <sup>6</sup>Taylor <sup>7</sup>Hawkyard

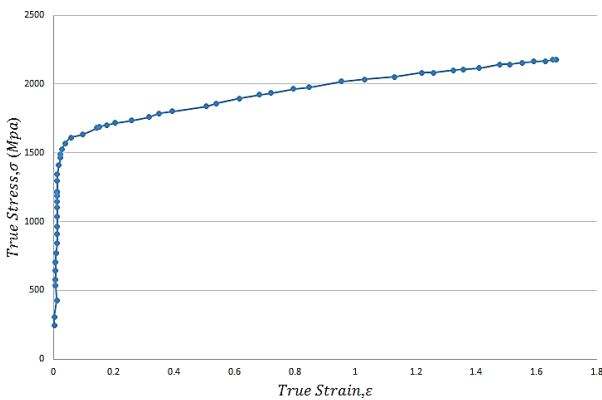
بازگشت، توصیف نمودند. شکل ۳ برای این مدل نیز از طرحی مشابه استفاده شده است و فرآیند نفوذ پرتابه فرسایشی به سه مرحله: گذرا، اولیه و ثانویه، تقسیم شده است. فاز بازگشت در این مدل مد نظر قرار نگرفته است. در مرحله گذرا، یک قارچ پایدار در جلوی پرتابه تشکیل می‌گردد. در خلال مرحله اولیه، نفوذ شبه پایدار توسط سر قارچی شکل پایدار اتفاق می‌افتد. مرحله ثانویه وقتی آغاز می‌شود که پروسه فرسایش میله پایان می‌پذیرد و پرتابه باقی مانده، بصورت میله صلب نفوذ می‌نماید. طرح مدل‌سازی کلی و فرضیات ساده‌سازی در بخش بعدی مورد بحث قرار گرفته‌اند.



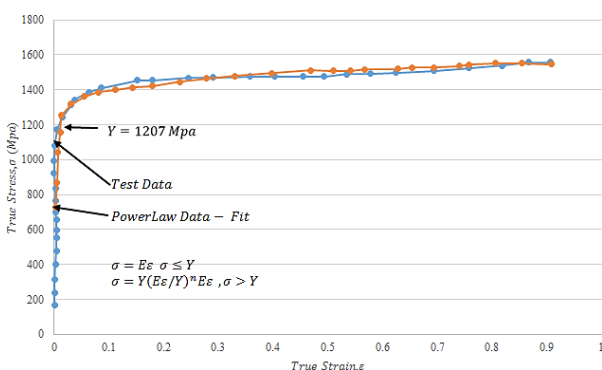
شکل ۱: تصاویر اشعه ایکس پس از آزمایش. الف) هدف آلومینیومی (ب) هدف فولادی [۱۷].



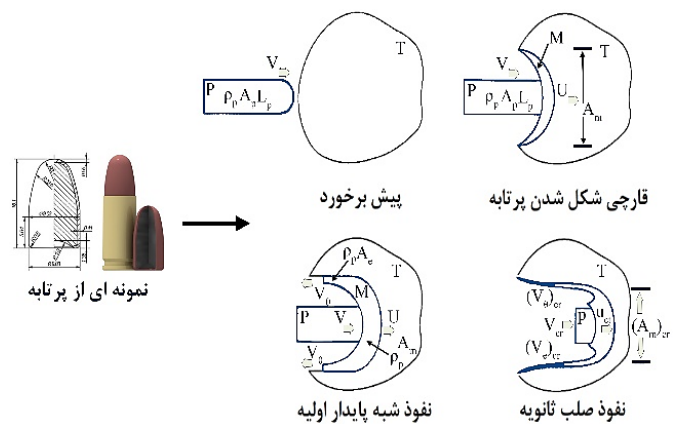
شکل ۲: تصاویر اشعه ایکس، نفوذ پرتابه در هدف آلومینیومی با سرعت برخورد ۳/۰۹ km/s (الف) در زمان ۱۶/۲ μs (ب) در زمان ۰/۳۱ μs [۱۷].



شکل ۴: نسبت تنش- کرنش در آهنگ کرنش  $10^{-1} s^{-1}$  برای تنگستن X21-C.



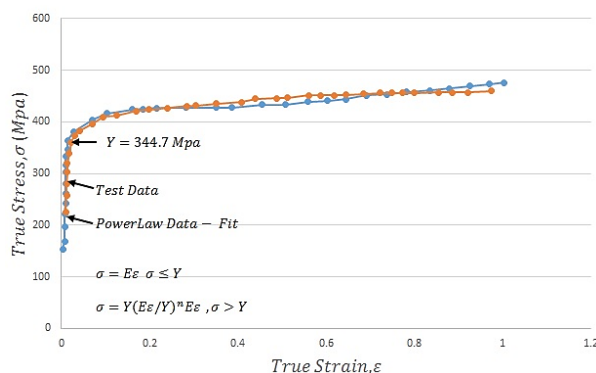
شکل ۵: نسبت تنش- کرنش در آهنگ کرنش  $10^{-1} s^{-1}$  برای فولاد ۴۳۴۰.



شکل ۳: مراحل نفوذ پرتابه در هدف.

برای تأیید مدل، آزمایش‌های تعیین خواص مواد و آزمایش‌های بالستیک نهایی، که در ادامه ارائه شده‌اند، انجام پذیرفته‌اند. کاواهارا<sup>۹</sup> [۱۸] از

<sup>9</sup>Kawahara



شکل ۶: نسبت تنش- کرنش آلومینوم در آهنگ کرنش  $10^{-1} s^{-1}$ .

۱. برای رسیدن به مرحله نفوذ شبه پایدار اولیه، به اندازه کافی بلند است.
۲. برای حذف پیچیدگی رفتار مرزهای فیزیکی فرض می‌گردد که هدف بطور نامحدودی وسیع و ضخیم است.
۳. اثرات حرارتی در مدل مد نظر قرار نگرفته‌اند. لذا اافت انرژی حرارتی و تأثیرات آن بر روی خواص مواد، به دلیل افزایش درجه حرارت در پروسه نفوذ، صرف نظر شده است.
۴. هنگامی که سر قارچی شکل برای رسیدن به مساحت سطح مقطع حداکثر  $A_m$  رشد می‌کند، به‌طور کامل در تماس با هدف بوده و دارای شکل نیم‌کروی است.
۵. چگالی پرتابه در هر سه قسمت قارچی شکل، صلب و قسمت دفع شده، یکسان در نظر گرفته می‌شود.

۶. در مرحله گذرای تشکیل قارچ، حد الاستیک هوگونیوت برای شبیه‌سازی تقریبی متوسط اثرات شوک در پرتابه از لحظه برخورد تا لحظه‌ای که قارچ کاملاً توسعه می‌یابد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که با این روش، حل‌های تقریبی فراهم می‌آیند؛ زیرا این روش حد الاستیک هوگونیوت را در قارچ نیم‌کروی که در آن جریان یک جهتی نیست بکار می‌گیرد و از کاهش بعدی اثرات شوک که به دلیل امواج رقیق شده به وجود می‌آیند، صرف نظر می‌نماید.

### ۳ روابط تحلیلی

یک میله بلند با طول اولیه  $L_p$  و مساحت سطح مقطع  $A_p$  و چگالی  $\rho_p$  و تنش سیلان  $Y_p$  به یک هدف نیمه بی‌نهایت با چگالی  $\rho_t$  و تنش سیلان  $Y_t$  بطور عمودی برخورد می‌نماید. جهت تغییر شکل پرتابه در هنگام برخورد فرض بر این است که سرعت تصادم  $v_i$  به اندازه کافی بالا باشد. قبل از آنکه پرتابه در انتهای حفره به وجود آمده در هدف متوقف گردد، مراحل نفوذ گذرا اولیه و ثانویه را متحمل می‌گردد. شکل ۳ مراحل نفوذ را نمایش می‌دهد. مراحل نفوذ در زیر بخش‌های ذیل مورد بحث قرار گرفته‌اند.

#### ۱.۳ مرحله گذرا

شکل ۳ پروسه نفوذ را در انتهای مرحله گذرا، یعنی وقتی که سر قارچی شکل نیم‌کروی به حداکثر مساحت سطح مقطع  $A_m$  با قطر  $D_m$  نایل شده است، نشان می‌دهد. سر قارچی شکل با سرعت  $u$ ، در حالیکه میله سرعت  $v_i$  را داراست، حرکت می‌نماید. برای ایجاد یک معادله جریان، برای گزارش حالت دینامیک سر قارچی شکل، از معادله موازنه انرژی برای تساوی افت انرژی سنتیک در تشکیل سر قارچی شکل و کار پلاستیک انجام شده در قارچی شدن پرتابه و بر ضد مقاومت هدف استفاده می‌گردد. جهت روشنی، فرمول‌های جداگانه‌ای برای مناطق هدف و قارچ مطرح می‌گردند.

#### ۲.۳ هدف T

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، برای محاسبه نیروی محوری در فصل مشترک مابین قسمت قارچی شکل پرتابه و هدف ( $M - T$ ) می‌توان از مدل‌های

## ۲ نفوذ و مدل‌سازی پرتابه میله بلند فرسایشی

بالمستیک نهایی با میله‌های فرسایشی یک پروسه بسیار پیچیده است. هنگامیکه یک پرتابه با سرعت بسیار بالا به هدفی برخورد می‌نماید، هردو تحت تغییر شکل‌های بسیار وسیع پلاستیک، در آهنگ‌های کرنش بسیار بالا، قرار می‌گیرند. در همان زمان، حرکات موجی شدیدی در حد فاصل مابین پرتابه و هدف و همچنین در مرزهای هدف اتفاق می‌افتد.

در این مقاله سعی بر این است که این پدیده پیچیده، توسط یک مدل تحلیلی، شامل مشخصه‌های ضروری پروسه، درک گردد. همان‌طور که قبلاً بیان گردید، پروسه‌های نفوذ شامل سه مرحله پی‌درپی: تشکیل سر قارچی شکل در مرحله گذرا، نفوذ شبه پایدار اولیه و نفوذ میله صلب ثانویه می‌باشد. با توجه به شکل ۳، هنگامی که یک میله بلند با سرعت بسیار زیاد  $v_i$ ، بطور عمود بر یک هدف برخورد می‌نماید، مواد هدف و پرتابه یک فاز شوک اولیه را در خلال قارچی شدن نوک پرتابه تحمل می‌نمایند. در مرحله گذرا، منطقه قارچی شکل شده، به سرعت نفوذ  $u$  و مساحت سطح مقطع بیشینه  $A_m$  دست می‌یابد؛ ولی هنوز هیچ‌گونه ماده دفع شده‌ای در انتهایش تشکیل نشده است. در مرحله بعدی، یعنی نفوذ اولیه، فرض بر این است که پرتابه سرعت  $v_i$  را و سر قارچی شکل شده سرعت نفوذ  $u$ ، قطر و شکل تقریباً نیم کروی را حفظ می‌نماید. در همین زمان یک ماده دفع شده از پیرامون سر قارچی شکل شده بیرون می‌آید و با سرعت  $v_e$  حرکت می‌نماید. مرحله اولیه تا زمانیکه میله به سرعت بحرانی  $v_{cr}$  کاهش سرعت دهد، ادامه می‌یابد و پس از آن سر قارچی شکل ناپایدار شده و فرسایش میله متوقف می‌گردد.

مرحله بعدی، یعنی نفوذ ثانویه، بوسیله نفوذ بصورت صلب قسمت باقی مانده پرتابه با سرعت  $u_{cr}$  و ماده خروج آنها پرتابه با سرعت  $(v_e)_{cr}$  شناسایی می‌گردد. در صورتی که در سرعت‌های بالاتر از  $v_{cr}$ ، طول پرتابه تا اندازه طول شعاعش مصرف شود، در این صورت مومتم اعمال شده از پرتابه به هدف، جهت ایجاد نفوذ اضافی برای رشد حفره کفایت می‌نماید [۱۹]. برای ساده‌سازی پروسه‌های نفوذ، چندین فرض در مدل مورد استفاده قرار گرفته است که اکثر آنها در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرند و بقیه در فرمول‌سازی مدل در بخش بعدی تکمیل می‌گردند.

۱. فرض می‌گردد که پرتابه برای ایجاد سر قارچی شکل پایدار و همچنین

قرار می‌گیرد:

$$(\sigma_{\text{HEL}})_p = \frac{1 - v_p}{1 - 2v_p} Y_p \quad (5)$$

که در آن  $v_p$  نسبت پواسون پرتابه است که فرض می‌شود از ماده الاستیک-پلاستیک کامل با تنش سیلان  $Y_p$  تهیه شده است. از داده‌های تنش- کرنش فولاد ۴۳۴۰ و آلومینیوم T651-6061 در آهنگ  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  کرنش ۱-۱۰ شکل ۵ و ۶، بدلیل استقلال از آهنگ کرنش، برای ارائه رفتار تنش- کرنش این مواد در شرایط بالستیک استفاده شده است. ولی در مورد تنگستن Teledyne X21-C، بدلیل داشتن حساسیت زیاد به آهنگ کرنش، روش برون‌یابی قابل استفاده نمی‌باشد. اکبام<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۲۱] تست کشش را در آهنگ‌های کرنش ۴۰۰ و  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  بر روی نمونه‌های تنگستن کار سرد شده انجام دادند و در این دو آهنگ ۳۰٪ افزایش در مقاومت تسلیم بدست آوردند. در این مدل با تغییر شرط آزمایش‌ها از کشش به فشار، نتایج آنها را بسط داده و ۶۰٪ در مقاومت تسلیم فشاری تنگستن Teledyne X21-C شکل ۴، برای تشریح اثر دینامیک آهنگ کرنش بسیار بالا تحت شرایط بالستیک، افزایش ایجاد نمود. البته این فرض، نظری محض است که باید بوسیله داده‌های آزمایش دینامیک مواد مورد تأیید قرارگیرد.

برای ایجاد سادگی، تعدادی متغیر بی بعد معرفی می‌گردند:

$$\gamma = \frac{A_m}{A_p}, \quad V_i = \frac{v_i}{C_0}, \quad U = \frac{u}{C_0}, \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{(\sigma_{\text{HEL}})_p}{E_p}, \quad \bar{Y}_t = \frac{Y_t}{E_p}$$

که در آن  $E_p$  مدول یانگ پرتابه و  $C_0 = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}}$  سرعت موج طولی در پرتابه برای شرایط بدون کرنش است. با استفاده از معادلات (۱) و (۴) و (۶) معادله (۳) تبدیل می‌شود به:

$$V_i^2 - U^2 - \frac{U}{\bar{V}_i} (1 + \lambda) [\bar{\sigma}_p \ln(1 + \lambda) + \bar{Y}_t (\alpha + \beta C_0^2 U^2)] = 0 \quad (7)$$

معادله (۷) شامل دو پارامتر مجهول  $U$  و  $\lambda$  است که در ارتباط با معادلات بقا که در مرحله اولیه نفوذ توسعه می‌یابند، تعیین می‌گردند.

### ۴.۳ مرحله نفوذ اولیه

در مرحله اولیه نفوذ، میله با سرعت  $v$  و سر قارچی شکل، که به مساحت مقطع  $A_m$  رشد نموده است، با سرعت  $u$  در حالت شبه‌پایدار نفوذ می‌نماید. در همین زمان، قسمت دفع شده تشکیل پوسته نازکی در لبه سر قارچی شکل می‌دهد. قسمت دفع شده با سرعت  $v_e$  حرکت نموده و دارای سطح مقطع دایره‌ای با مساحت  $A_e$  می‌باشد. شکل ۳ مشخصه‌های این مرحله را نمایش می‌دهد.

### ۵.۳ هدف T

بر اساس نتایج اقتباس شده از مدل نفوذ میله صلب که بر اساس تقریبات انبساط کروی حفره [۱۵] فراهم آمده است، نیروی محوری  $F_t$  در فصل

نفوذ میله‌های بلند صلب، که بر اساس تقریباً انبساط کروی حفره بنا شده است، استفاده نمود. این تلاش بر روی اهداف فلزی که در آنها رفتار مواد بصورت الاستیک-پلاستیک مدل می‌شوند متمرکز می‌گردد. سپس طبق نتایج به‌دست‌آمده توسط فورستال و همکارانش [۱۵]، نیروی محوری  $F_{tt}$  (معدل‌گیری شده بر روی دوره زمانی از لحظه‌ای که قارچ کاملاً توسعه می‌یابد) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_{tt} = \bar{A} Y_t (\alpha + \beta u^2) \quad (1)$$

که در آن  $\bar{A}$  متوسط مساحت سطح مقطع سر قارچی شکل در این دوره زمانی است و فرض می‌گردد که برابر باشد با:

$$\bar{A} = \frac{1}{4} (A_p + A_m) \quad (الف)$$

$$\alpha = A \left( 1 + \frac{\mu \pi}{4} \right) \quad (ب)$$

$$\beta = \frac{1}{4} B \left( \frac{\rho_t}{Y_t} \right) \left( 1 + \frac{\mu \pi}{4} \right) \quad (ج)$$

در اینجا  $\mu$  ضریب اصطکاک لغزشی در فصل مشترک است و  $A$  و  $B$  پارامترهایی هستند که از مدل انبساط کروی حفره برای تعریف تنش شعاعی روی دماغه پرتابه اقتباس شده‌اند [۲۰]. برای مدل‌کردن هدف بصورت یک ماده قابل تراکم سخت شونده کرنشی الاستیک، نتایج انبساط کروی حفره می‌تواند با  $A = 4/2448$  و  $B = 1/0.336$  برای هدف آلومینیومی T651-6061 و  $A = 4/0.720$  و  $B = 1/0.124$  برای هدف فولادی ۴۳۴۰ با دقت بیان شود.

### ۳.۳ سر قارچی شکل M

در شکل ۳ یک معادله جریان برای توصیف حالت دینامیک سر قارچی شکل، بوسیله موازنه افت انرژی سنتیک در تشکیل سر قارچی شکل و انجام کار پلاستیک در تغییر شکل پرتابه و بر ضد استقامت هدف ایجاد می‌گردد. موازنه انرژی بفرم زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{4} \dot{m}_t (v_i^2 - u^2) = \dot{W}_t + F_{tt} u \quad (3)$$

که در آن  $\dot{m}_t$  شار جرم پرتابه بوده و بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\dot{m}_t = \rho_p A_p v_i \quad (الف)$$

و  $\dot{W}_t$  آهنگ انجام کار پلاستیک در تغییر شکل مقطع استوانه‌ای  $p$  با مساحت سطح مقطع  $A_p$  به یک پوسته نیم‌کروی  $M$  با مساحت سطح مقطع  $A_m$  است. برای تشریح رشد پوسته منطقه قارچی شکل در خلال این مرحله فرض می‌گردد که، پوسته نیم‌کروی در پروسه تغییر شکل متحمل انبساط شعاعی می‌شود و یک عبارت تقریبی برای  $\dot{W}_t$  حاصل می‌گردد:

$$\dot{W}_t = (\sigma_{\text{HEL}})_p \bar{A} u \ln \left( \frac{2\bar{A}}{A_p} \right) \quad (ب)$$

در اینجا حد الاستیک هوگونیوت پرتابه  $(\sigma_{\text{HEL}})_p$ ، که طبق مرجع [۲۰] به  $Y_p$  مربوط می‌شود، برای شبیه‌سازی تقریبی متوسط اثرات شوک مورد استفاده

<sup>10</sup>Ekbom

مشترک  $M - T$  بصورت زیر بیان می‌شود:

$$F_t = A_m Y_t (\alpha + \beta u^2) \quad (۸)$$

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  طبق معادله (۲) تعریف می‌گردند.

### ۶.۳ سرقارچی شکل $M$

میدان جریان نشان داده شده در شکل ۳ بسیار شبیه آن چیزی است که توسط رایت و فرانک<sup>۱۱</sup> [۲۲] مورد بحث قرار گرفته است. در صورتی که فصل مشترک  $M - T$  به عنوان مختصات مرجع اختیار گردد، قسمت صلب پرتابه در هنگامی که قسمت دفع شده با سرعت  $v_e + u$  حرکت می‌نماید، با سرعت  $v - u$  حرکت می‌نماید. با بکاربردن قوانین بقای جرم و مومنتم و انرژی بر حسب مختصات مرجع انتخاب شده، معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$A_p(v - u) - A_e(v_e + u) = 0, \quad (۹)$$

$$\rho_p A_p(v - u)^2 + \rho_p A_e(v_e + u)^2 + F_p + F_e - F_t = 0, \quad (۱۰)$$

$$\frac{1}{\gamma} \dot{m}(v - u)^2 - \frac{1}{\gamma} \dot{m}(v_e + u)^2 + F_p(v - u) - F_e(v_e + u) - \dot{W}_{pl} = 0, \quad (۱۱)$$

که در آن  $\dot{m}$  شار جرم و  $\dot{W}_{pl}$  آهنگ انجام کار پلاستیک در انتقال جرم  $p$  با مساحت سطح مقطع  $A_p$  به جرم معادل مواد دفع شده با مساحت سطح مقطع  $A_e$  بوده و  $F_p$  و  $F_e$  و  $F_t$  به ترتیب نیروهای فشاری محوری در فصل مشترک  $M - P$  و مواد دفع شده و فصل مشترک  $M - T$  می‌باشند. این مقادیر بصورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\dot{m} = \rho_p A_p(v - u) = \rho_p A_e(v_e + u), \quad (الف ۱۲)$$

$$\dot{W}_{pl} = \frac{Y_p \dot{m}}{\rho_p} \left| \ln \left( \frac{2A_m}{A_e} \right) \right|, \quad (ب ۱۲)$$

$$F_p = Y_p A_p, \quad (ج ۱۲)$$

$$F_e = Y_{pu} A_e, \quad (د ۱۲)$$

و  $F_t$  در معادله (۸) تعریف شده است. در سرتاسر پروسه تغییر شکل فرض بر این است که حجم منطقه  $M$  تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند و ماده پرتابه منطقه  $p$  بطور پیوسته به منطقه  $M$  جریان می‌یابد و سپس بصورت مواد دفع شده ظاهر می‌گردد. بنابراین دو مرحله تغییر شکل در محاسبات  $\dot{W}_{pl}$  مد نظر قرار می‌گیرد: اولین مرحله برای تغییر شکل جرم معینی از پرتابه با سطح مقطع  $A_p$  به جرم معادل قارچ با سطح مقطع  $A_m$  و دومین مرحله برای تغییر این جرم به جرم ماده دفع شده با سطح مقطع  $A_e$  چون مقدار ماده موجود در  $M$  نسبت به مختصات مرجع انتخاب شده ثابت و بدون حرکت است، در مرحله اول، کار پلاستیک انجام نخواهد شد. پس فقط مرحله دوم در معادله (ب ۱۲) برای محاسبه تقریبی  $\dot{W}_{pl}$  مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در معادله (د ۱۲) فرض بر این است که ماده موجود در مواد دفع شده، از سر قارچی شکل  $M$  دور می‌گردند و بنابراین متحمل تنش کششی حد نهایی  $Y_{pu}$

می‌گردند. اکنون متغیرهای بدون بعد دیگری معرفی می‌گردند:

$$V = \frac{v}{C_o}, \quad V_e = \frac{v_e}{C_o}, \quad \eta = \frac{A_e}{A_p}, \quad \bar{Y}_p = \frac{Y_p}{E_p}, \quad (۱۳ الف)$$

$$\bar{Y}_{pu} = \frac{Y_{pu}}{E_p},$$

$$\omega_p = V - U, \quad \omega_e = V_e + U. \quad (۱۳ ب)$$

معادلات (۹) تا (۱۱) با استفاده از معادلات (۶) و (۱۳) بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\omega_e = \frac{\omega_p}{\eta}, \quad (۱۴)$$

$$\left(1 + \frac{1}{\eta}\right) \omega_p^2 + \bar{Y}_p + \eta \bar{Y}_{pu} - \lambda \bar{Y}_t [\alpha + \beta C_o^2 (V_i - \omega_p)^2] = 0, \quad (۱۵)$$

$$\left(1 - \frac{1}{\eta}\right) \omega_p^2 - 2\bar{Y}_{pu} + 2\bar{Y}_p \left[1 - \left| \ln \left( \frac{2\lambda}{\eta} \right) \right| \right] = 0. \quad (۱۶)$$

برای  $V_i$  معلوم  $\lambda$  فرض شده،  $\omega_p$  می‌تواند از معادله (۱۶) به فرم زیر بدست آید:

$$\omega_p = \sqrt{2} \left\{ \bar{Y}_{pu} + \bar{Y}_p \left[ \left| \ln \left( \frac{2\lambda}{\eta} \right) \right| - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (۱۷)$$

چون  $\omega_p$  همیشه مثبت است، بنابراین قسمت منفی جذر  $\omega_p$  در نظر گرفته نشده است. جای‌گذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۵) معادله‌ای را که فقط شامل یک مجهول  $\eta$  است و می‌تواند با روش تکراری بدست آید، تسلیم می‌نماید. سپس می‌توان  $\omega_p$  را از معادله (۱۷) و  $\omega_e$  را از معادله (۱۴) محاسبه کرد. معادله جریان (۷) برای بررسی مقدار فرض شده  $\lambda$  مورد استفاده قرار می‌گیرد و به این ترتیب یک روش تکراری برای پیدا کردن مقدار  $\lambda$  که بتواند معادله جریان را ارضا نماید دنبال می‌گردد.

### ۷.۳ پرتابه $P$

در سرتاسر مرحله اولیه نفوذ، درحالی‌که طول میله  $L_p$  بطور پیوسته و یکنواخت در پروسه فرسایش میله مصرف می‌شود، سرعت میله  $v$  و سرعت نفوذ  $u$  به آرامی کاهش می‌یابند. بنابراین می‌توان زمان وابسته به این مقادیر را با اعمال معادلات بقای جرم و مومنتم بدست آورد:

$$\frac{d}{dt}(\rho_p A_p L) = -\rho_p A_p (v - u) \quad (۱۸)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_p A_p L v) = -\rho_p A_p v (v - u) - Y_p A_p \quad (۱۹)$$

که در آن  $L$  طول جاری میله در زمان  $t$  است. برای سیستم میله صلب، اصل‌های بقای مومنتم و انرژی معادله یکسانی را از طریق معادله (۱۹) ایجاد می‌نمایند. دو متغیر بی بعد دیگر بصورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\gamma = \frac{L}{L_p}, \quad \tau = \frac{C_o t}{L_p} \quad (۲۰)$$

با استفاده از معادلات (الف ۱۳) و (۲۰) معادلات بقای (۱۸) و (۱۹) به صورت بی بعد زیر خلاصه می‌شوند:

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = -(V - U) \quad (۲۱)$$

$$\gamma \frac{dV}{d\tau} = -\bar{Y}_p \quad (۲۲)$$

<sup>11</sup>Wright and Frank

در بخش بعدی حل‌های عددی نشان خواهند داد که در محدوده سرعت تحت ملاحظه  $V_i$  ( $4 \text{ km/s} \leq V_i \leq 7 \text{ km/s}$ ) حل‌های  $U$  توابع ضعیف  $V_i$  می‌باشند. پس معادله (۲۸) پیشگویی می‌نماید که قطر حفره بطور تقریبی تابع خطی از سرعت برخورد است. این ارتباط فانکشنال طی آزمایش‌های بالستیک نهایی که توسط دانشمندانی مانند هوهرلر و استیلپ [۲۴] و سیلسبای<sup>۱۵</sup> [۲۵] و ناز [۲۶] انجام شده، مشاهده گردیده است. معادله (۲۸) وابستگی تابعی  $U$  به  $V_i$  را برای بیان بصورت ضمنی در معادله جریان یعنی معادله (۷) امکان‌پذیر می‌سازد.

$$(1 - \psi)(1 - \psi + 2\psi^2) - \frac{4\psi(1 - \psi)^2 \bar{\sigma}_p}{2AY_t + B\psi^2 V_i^2 \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)} \times \ln \left[ \frac{4(1 - \psi)^2 V_i^2}{2AY_t + B\psi^2 V_i^2 \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)} \right] = 0, \quad (29 \text{ الف})$$

$$\psi = \frac{U}{V_i}. \quad (29 \text{ ب})$$

این معادله بیان می‌کند که در رژیم مافوق سرعت، سرعت نفوذ، تابع سرعت برخورد و نسبت چگالی‌ها و مقاومت‌های مواد پرتابه و هدف است. این نتیجه با نتیجه اقتباس شده از تئوری هیدرودینامیک اصلاح شده که پیشگویی می‌کند: سرعت نفوذ بستگی به سرعت برخورد و نسبت چگالی‌های پرتابه و هدف دارد [۴]، دارای تفاوت است. عمق نفوذ برای یک میله با طول  $L_p$  خواهد بود:

$$\frac{d_1}{L_p} = \frac{\psi}{1 - \psi}. \quad (29 \text{ ج})$$

### ۹.۳ مرحله نفوذ ثانویه

پرتابه در مرحله نفوذ شبه‌پایدار، به فرسایش ادامه می‌دهد تا اینکه، یا طولش به اندازه شعاعش برسد و یا اینکه تا سرعت بحرانی کاهش سرعت دهد. سپس سرقارچی شکل ناپایدار می‌شود و قسمت‌های باقی مانده میله و ماده دفع شده بصورت صلب به ترتیب با سرعت‌های  $u_{cr}$  و  $(v_e)_{cr}$  نفوذ می‌نمایند. این مرحله در شکل ۳ نشان داده شده است. نفوذ صلب در پایان پروسه فرسایش میله توسط پرز در مرجع [۱۷] مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله برای محاسبه عمق نفوذ، با طول باقی مانده میله و پوسته‌ای که از مواد دفع شده ایجاد می‌شود، بصورت قسمت‌های مجزا برخورد شده است. فرض می‌شود که جمع جرم‌های میله  $M_p$  و مواد دفع شده  $M_e$ ، معادل جرم اولیه پرتابه می‌باشد. جرم پرتابه  $M_p$  از دو قسمت:

۱. سرقارچی شکل با شکل فرض شده نیم‌کروی و مساحت  $(A_m)_{cr}$ ،

۲. میله تغییر فرم نیافته با طول  $L_r$  متصل به انتهای قارچ،

تخمین زده می‌شود. با پیروی از نتایج اخذ شده توسط فورستال و همکارانش [۱۵] برای نفوذ میله صلب، عبارات زیر برای عمق نفوذ میله  $d_2$  و عمق نفوذ ماده دفع شده  $d_3$  بدست می‌آیند:

$$d_2 = \frac{M_p}{2\beta(A_m)_{cr} Y_t} \ln \left[ 1 + \frac{\beta}{\alpha} u_{cr}^2 \right] \quad (30 \text{ الف})$$

$$d_3 = \frac{M_e}{2\beta(A_m)_{cr} Y_t} \ln \left[ 1 + \frac{\beta}{\alpha} (v_e)_{cr}^2 \right] \quad (30 \text{ ب})$$

از زیربخش قبلی می‌توان برای هر  $V$  ممکن،  $U$  را بدست آورد. بنابراین  $U$  می‌تواند بصورت تابعی از  $V$  بیان گردد:

$$U = f(V) \quad (23)$$

جای‌گذاری معادله (۲۳) در معادله (۲۱) می‌دهد:

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = -[V - f(V)] \quad (24)$$

باید توجه شود که مساحت قارچ  $A_m$  که به  $V$  وابسته است، در ضمن در محاسبه فانکشنال<sup>۱۲</sup> وابسته  $U$  به  $V$  نیز درگیر است. بنابراین، مدل بطور غیرمستقیم برای اثر انقباض اندازه حفره در پروسه نفوذ تشریح می‌گردد. اکنون یک سیستم دو معادله دیفرانسیل معمولی طی معادلات (۲۲) و (۲۴) وجود دارد. شرایط اولیه در زمان  $\tau = 0$  عبارتند از:  $\gamma(0) = 1$  و  $V(0) = V_i$ . حل عددی برای  $\gamma(\tau)$  و  $V(\tau)$  می‌تواند با یکی از روش‌های حل استاندارد معادلات دیفرانسیل معمولی انجام پذیرد. در این مدل برای حل از برنامه DERKF نوشته شده توسط شامپین و وات<sup>۱۳</sup> [۲۳] استفاده شده است. عمق نفوذ  $d_1$  در مرحله اولیه نفوذ، بوسیله انتگرال‌گیری  $u \cdot dt$  از صفر تا  $t_1$  بدست می‌آید که در آن  $t_1$  یا زمان مصرف طول میله تا اندازه شعاعش است و یا زمان کاهش سرعت پرتابه به زیر سرعت  $v_{cr}$  است که در آن، فرسایش میله متوقف می‌گردد. با استفاده از عبارات بی بعد، این عمق نفوذ عبارت است از:

$$d_1 = L_p \int_0^{\tau_1} U d\tau \quad (25)$$

که در آن  $\tau_1 = \frac{C_i t_1}{L_p}$  است. هر دو مقدار  $t_1$  و  $v_{cr}$  از حل‌های عددی مدل بدست می‌آیند.

### ۸.۳ نفوذ مافوق سرعت<sup>۱۴</sup>

وقتی که سرعت برخورد،  $v_i$ ، پرتابه خیلی زیاد است (مثلاً  $4 \text{ km/s}$ ) سیستم پرتابه-هدف به حالت جریان جت سیال می‌رسند. تحت این شرایط، عبارات سرعت از دیگر عبارات مهم‌تر می‌گردند و حل‌ها می‌توانند ساده‌تر گردند. در شرایط مافوق سرعت که در آن عبارات سرعت اهمیت زیادی دارند، معادله بقای انرژی (۱۶) برای ارائه رابطه زیر خلاصه می‌گردد:

$$\eta = 1 \quad (26)$$

سپس با استفاده از معادلات (۱۳ الف) و (۱۴) رابطه ساده زیر برای سرعت‌های مختلف بدست می‌آید:

$$V_e = V_i = 2U \quad (27)$$

یک عبارت ساده‌شده برای مساحت حفره، از معادله بقای مومنتوم در معادله (۱۵) بدست می‌آید.

$$\lambda = \frac{2(V_i - U)^2}{Y_t(\alpha + \beta C_i^2 U^2)} \quad (28)$$

<sup>12</sup>Functional <sup>13</sup>Shampine and Watts <sup>14</sup>hyper velocity penetration <sup>15</sup>Silsby

ترتیب برای فولاد و آلومینیوم در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. خواص این دو ماده هدف در جدول ۲ لیست شده است. هدف آلومینیومی دارای سطح مقطع مربعی ۱۰/۲ cm و طول ۲۲/۹ cm و هدف فولادی بصورت استوانه‌ای با قطر ۲۰/۳ cm و طول ۱۵/۲ cm بوده است.

جدول ۲: خواص مواد هدف [۹].

خواص	آلومینیوم	فولاد ۴۳۴۰
استحکام تسلیم $Y_t$ (GPa)	۰/۳۴۵	۱/۲۰۷
مواد پلاستیک $\dot{Y}_t$ (GPa)	۰/۴۶۰	۱/۵۶۰
مدول یانگ $E_t$ (GPa)	۶۸/۹۵	۲۰۶/۸
چگالی $\rho_t$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۲۷۱۰	۷۸۱۰
کرنش سختی $n$	۰/۰۵۴	۰/۰۵۱

در صورتی که طول میله قبل از کاهش سرعت میله به  $v_{cr}$  تا رسیدن به اندازه طول شعاعش مصرف می‌شود، بدلیل اعمال مومنتوم از طرف پرتابه به هدف، عمق حفره به اندازه  $d_f$  نفوذ اضافی خواهد داشت. برای این عمق نفوذ اضافی، با فرض اینکه سر قارچی شکل دارای قطر  $D_m$  و سرعت نفوذ  $u$  می‌باشد، طبق مدل ماتوسکا و اسبورن<sup>۱۶</sup> [۱۹] خواهیم داشت:

$$d_f = \frac{1}{\gamma} D_m u \left( \frac{\rho_t}{2\dot{Y}_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

که در آن  $\dot{Y}_t$  مقاومت تسلیم ماده هدف است که فرض می‌گردد دارای رفتار الاستیک-پلاستیک کامل است. اکنون عمق نفوذ کلی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \quad (31)$$

### ۳.۴ اندازه‌گیری‌ها

سرعت برخورد پرتابه با دقت ۱٪ بوسیله تجهیزات اشعه لیزر تعیین شده است. زاویه پیمایش  $\phi_1$  و زاویه چرخش  $\phi_2$  از تصاویر اشعه ایکس پرتابه، دقیقاً قبل از برخورد بدست آمده‌اند. شکل ۲ دو تصویر از میله فولادی برخوردکننده به یک هدف آلومینیومی را در سرعت برخورد ۳/۰۹ m/s که برای اندازه‌گیری عمق نفوذ لحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند، را نشان می‌دهد. با استفاده از نماهای اشعه ایکس تهیه شده از برش‌های باریک اهداف، نفوذ نهایی اندازه‌گیری شده است. جداول ۳ و ۴ خلاصه شرایط پرتاب و داده‌های آزمایش را برای دو سری از آزمایش‌های بالستیک نهایی ارائه می‌نمایند.

جدول ۳: پرتاب میله فولادی ۴۳۴۰ در اهداف آلومینیوم T651-6061 [۹].

شماره پرتاب	۴ - ۰۹۹۵	۴ - ۰۹۹۲	۴ - ۰۹۹۷
$v_i$ (km/s)	۲/۱۲	۲/۶۶	۳/۰۹
$\phi_1, \phi_2$ (°)	۰/۰, ۱/۰	۳/۵, ۰/۰	۰/۰, ۰/۵
پیش‌بینی قطر حفره (mm)	۷/۴۳	۱۰/۳۶	۱۲/۲۹
داده‌های قطر حفره (mm)	۷/۶۰	۱۰/۷۵	۱۱/۴۸
پیش‌بینی عمق نفوذ (mm)	۹۹/۲	۱۰۸/۷	۱۱۲/۷
داده‌های عمق نفوذ (mm)	۹۳/۷	۱۲۲/۱	۱۳۴/۹

جدول ۴: پرتاب میله‌های تنگستن X21-C در اهداف فولادی ۴۳۴۰ [۹].

شماره پرتاب	۴ - ۱۰۴۶	۴ - ۱۰۴۴	۴ - ۱۰۴۸
$v_i$ (km/s)	۲/۰۷	۲/۴۶	۳/۰۱
$\phi_1, \phi_2$ (°)	۲/۵, ۳/۰	۶/۵, ۸/۰	۱/۵, ۳/۵
پیش‌بینی قطر حفره (mm)	۱۰/۷۲	۱۳/۱۷	۱۶/۴۸
داده‌های قطر حفره (mm)	۹/۷۱	-	۱۳/۸۹
پیش‌بینی عمق نفوذ (mm)	۴۱/۲	۴۷/۳	۵۴/۳
داده‌های عمق نفوذ (mm)	۵۶/۲	۶۵/۵	۷۰/۵

### ۴.۴ مقایسه پیشگویی‌های مدل و اندازه‌گیری‌ها

مدل میله فرسایشی، قطر حفره  $D_m$  را بصورت تابعی از سرعت برخورد  $v_i$  پیشگویی می‌نماید. این پیشگویی‌ها به ترتیب در شکل ۷ برای اهداف آلومینیومی T651-6061 و فولاد ۴۳۴۰ ترسیم شده‌اند.

### ۴ نتایج و بحث

برای انجام آزمایش‌های بالستیک نهایی از یک دستگاه تفنگ‌گازی سبک دومرحله‌ای ۵۰ - ۲۰ mm جهت پرتاب میله‌های فولادی ۴۳۴۰ به اهداف آلومینیومی T651-6061 و میله‌های تنگستنی Teledyne X21-C به اهداف فولادی ۴۳۴۰ بصورت نرمال و عمود و با سرعت‌های برخورد بین ۲ km/s تا ۳/۱ km/s استفاده شده است. در حین انجام هر آزمایش با اهداف آلومینیومی با استفاده از تجهیزات ۶۰۰ keV اشعه ایکس دو تصویر تهیه شده است. نمونه‌ای از این تصاویر اشعه ایکس در شکل ۲ نشان داده شده است. این تصاویر لحظه‌ای اشعه ایکس برای تعیین قطر حفره و طول میله و عمق نفوذ در خلال مرحله اولیه نفوذ، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

### ۱.۴ پرتابه‌ها

همه پرتابه‌ها دارای دماغه نیم‌کروی بوده‌اند. میله‌های فولادی ۴۳۴۰ دارای وزن ۶/۲ g و قطر ۳/۸۱ mm و نسبت طول به قطر ۱۸ و میله‌های تنگستن Teledyne X21-C دارای جرم ۱۳/۶۹ g و قطر ۴/۵۷ mm و نسبت طول به قطر ۱۰ بوده‌اند. داده‌های تنش‌کرنش برای این دو ماده در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند؛ ولی وقتی که به‌عنوان میله مورد استفاده قرار گرفته‌اند فرض شده است که الاستیک-پلاستیک کامل هستند. خواص مواد پرتابه‌ها و اهداف در جدول ۱ لیست شده است.

جدول ۱: خواص مواد پرتابه [۹].

خواص	تنگستن X21c	فولاد ۴۳۴۰
استحکام تسلیم $Y_p$ (GPa)	۳/۵۳۰	۱/۶۰۰
استحکام کششی $Y_{pu}$ (GPa)	۱/۳۸۷	۱/۳۴۵
مدول یانگ $E_p$ (GPa)	۲۹۶/۵	۲۰۶/۸
چگالی $(\rho_p)$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۱۷۶۵۰	۷۸۱۰
نسبت پواسون $\nu_p$	۰/۳۲	۰/۳۲

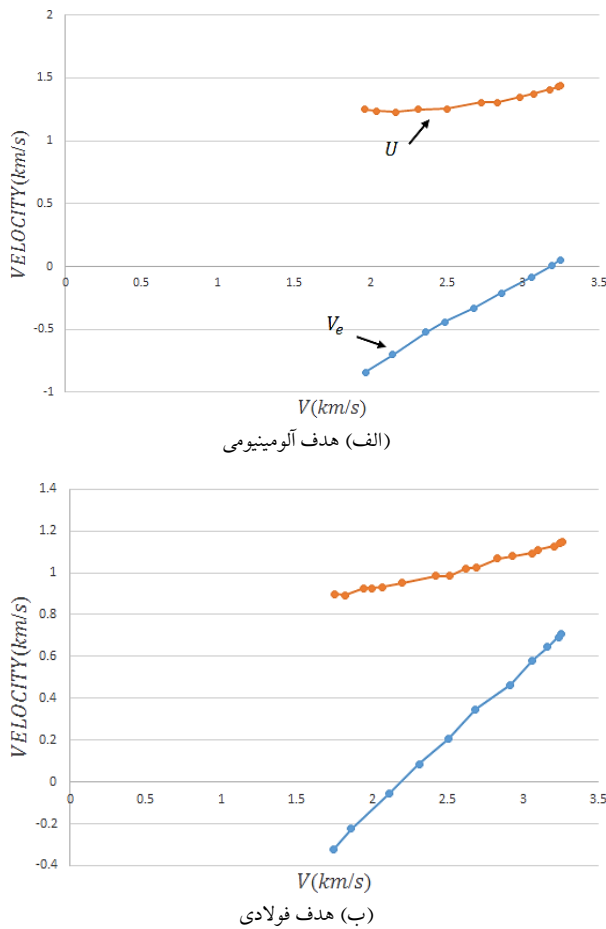
### ۲.۴ اهداف

با هر دو ماده هدف آلومینیومی T651-6061 و فولادی ۴۳۴۰ به‌عنوان مواد سخت شونده کرنشی الاستیک رفتار شده است. داده‌های تنش-کرنش به

<sup>16</sup>Matsuka and Osborn

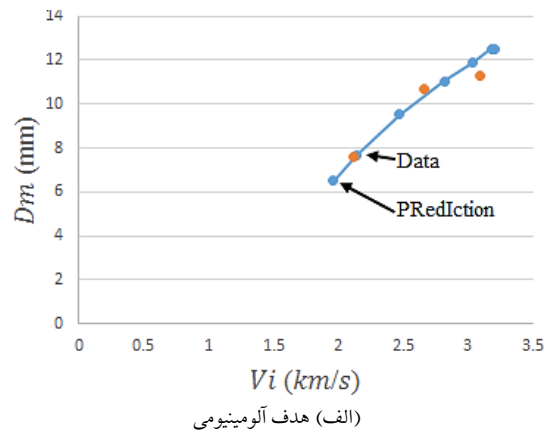


اگرچه پرتابه تغییر شکل می‌دهد اما قادر به تشکیل سر قارچی شکل نمی‌باشد و بنابراین حل نامعتبر می‌گردد. سرعت‌های بحرانی به ترتیب برای اهداف آلومینیومی و فولادی  $1/96 \text{ km/s}$  و  $1/75 \text{ km/s}$  به دست آمده‌اند.

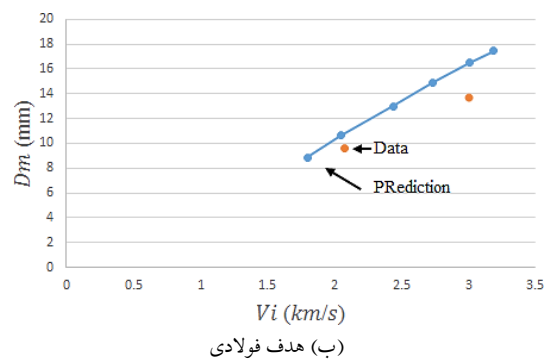


شکل ۸: سرعت‌های نفوذ  $u$  و مواد دفع شده  $v_e$  بر حسب سرعت پرتابه  $v$ .

در (شکل ۹) رژیم مافوق سرعت، سرعت نفوذ پرتابه فولادی در هدف در آلومینیومی با سرعت برخورد افزایش می‌یابد ولی تقریباً در سرعت  $6/5 \text{ km/s}$  این افزایش متوقف می‌شود و در سرعت‌های بالاتر از آن، سرعت نفوذ کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات مشابهی در سرعت نفوذ برای پرتابه تنگستی در هدف فولادی در این شکل به چشم می‌خورد و همان‌طور که دیده می‌شود نقطه تغییر جهت، به طور تقریبی در سرعت برخورد  $5 \text{ km/s}$  اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در معادله (۲۹ب) مشاهده می‌گردد، مدل شامل مقاومت‌های مواد پرتابه و هدف، در پیشگویی سرعت نفوذ در رژیم مافوق سرعت می‌باشد [۲۷]. نتایج موجود در شکل ۹ انحراف مهمی را از پیشگویی‌های تئوری هیدرودینامیک اصلاح‌شده که بیان می‌دارد: سرعت نفوذ به‌طور خطی با سرعت برخورد افزایش می‌یابد، نشان می‌دهند. پایین آمدن سرعت نفوذ در سرعت برخورد بسیار زیاد، تا اندازه‌ای بدلیل پیشگویی غیر دقیق قطر حفره توسط مدل می‌باشد. برای بهبود دقت پیشگویی روی قطر حفره، از یک مدل پیشرفته‌تر ایجاد حفره، همانند کار انجام‌شده بوسیله راوید و همکارانش [۲۹، ۲۸] کمک گرفت. شکل ۱۰ سابقه زمانی سرعت‌های پرتابه و نفوذ را در مرحله نفوذ اولیه برای یک میله فولادی برخوردکننده به هدف آلومینیومی در سرعت  $2/66 \text{ km/s}$  نشان می‌دهد. این مرحله ۵۶



(الف) هدف آلومینیومی

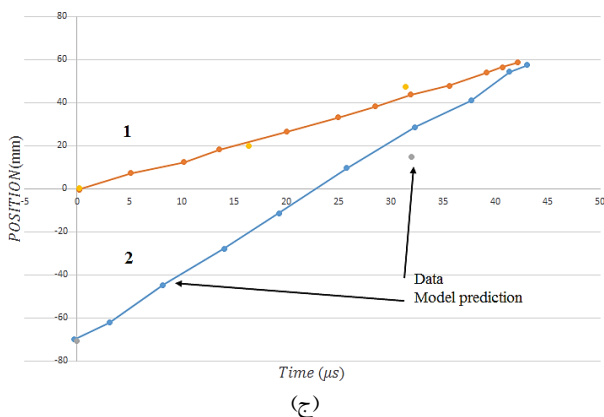
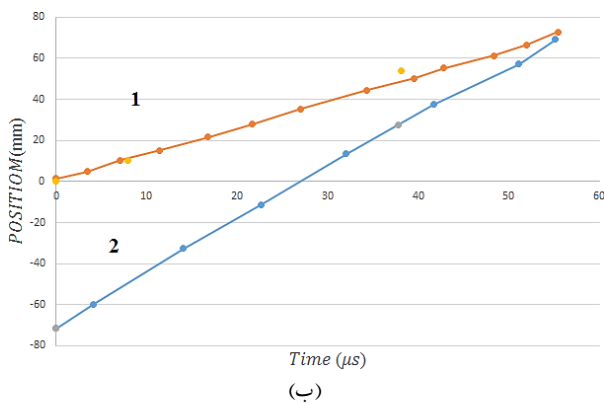
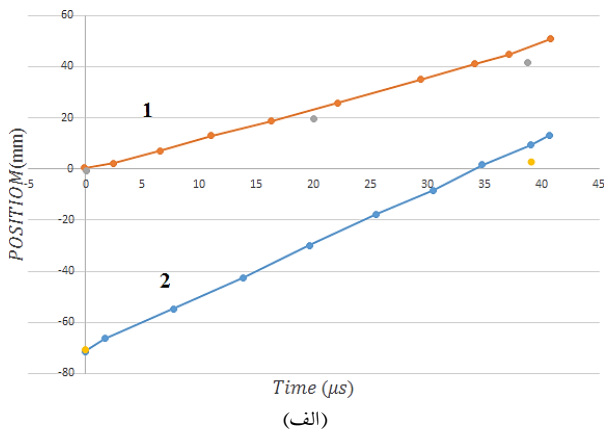


(ب) هدف فولادی

شکل ۷: نسبت قطر حفره به سرعت برخورد.

این شکل‌ها افزایش خطی قطر حفره را با افزایش سرعت برخورد به همان صورت که توسط هوهرل و استیلپ [۲۴] و ناز [۲۶] و پرز [۱۸] [۱۷] مشاهده شده است، نشان می‌دهند. چون فصل مشترک پرتابه-هدف احتمالاً توسط یک لایه از ماده ذوب شده پرتابه و هدف روانکاری می‌شود، اثر اصطکاک لغزشی در فصل مشترک پرتابه-هدف قابل صرف نظر کردن فرض می‌شود و لذا برای همه محاسبات در این مقاله  $\mu = 0$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، پیشگویی مدل از قطر حفره برای هدف آلومینیومی دارای سازگاری معقولی با داده‌های حاصل از آزمایش می‌باشد. اما این مدل، قطر حفره را برای اهداف فولادی بیشتر از اندازه پیشگویی می‌نماید و با افزایش سرعت برخورد این اختلاف نیز بیشتر می‌شود. در جداول ۳ و ۴ حداکثر قطر حفره برای هر سرعت برخورد ثبت شده است. قطر حفره برای پرتاب شماره ۱۰۴۴-۴ به دلیل آنکه تونل حفره به جهت زیاد بودن زوایای اوج و انحراف در لحظه برخورد، مستقیم نبوده است، گزارش نگردیده است. البته این مسأله بنظر نمی‌رسد که تأثیری در عمق نفوذ داشته باشد. وقتی که یک پرتابه در حین نفوذ در هدف تغییر شکل می‌دهد، عملکرد آن بطور قابل توجهی توسط سرعت نفوذ، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شکل ۸ تغییرات خطی سرعت نفوذ و سرعت مواد دفع شده با سرعت پرتابه را به ترتیب برای اهداف آلومینیومی و فولادی نشان می‌دهند. برای سرعت پرتابه زیر  $3/2 \text{ km/s}$  در هدف آلومینیومی، مواد دفع شده در همان جهت نفوذ (یعنی  $v_i$ ) جریان می‌یابند ولی در هدف فولادی این تغییر جهت، در سرعت  $2/2 \text{ km/s}$  انجام می‌پذیرد. بایستی توجه گردد که این مدل دارای یک حد پایین سرعت می‌باشد (سرعت بحرانی  $v_{cr}$ ) که در زیر آن، حل قابل قبول نیست. زیرا در سرعت‌های زیر  $v_{cr}$  بطور فیزیکی مدل پیشگویی می‌کند که

<sup>17</sup>Naz <sup>18</sup>Perez <sup>19</sup>Ravid

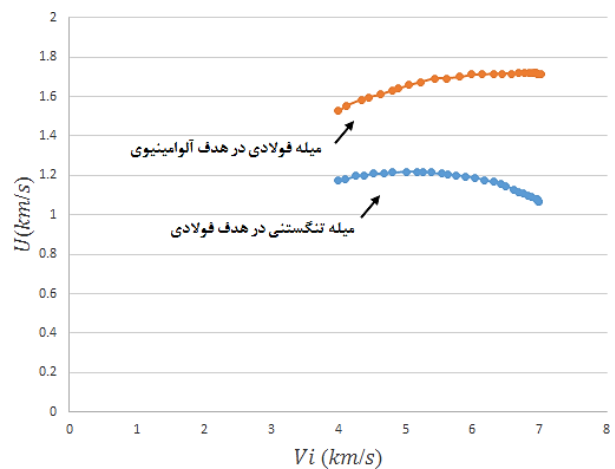


شکل ۱۱: سابقه زمانی موقعیت میله فولادی ۴۳۴۰ نفوذکننده در هدف آلومینیومی T651-6061.

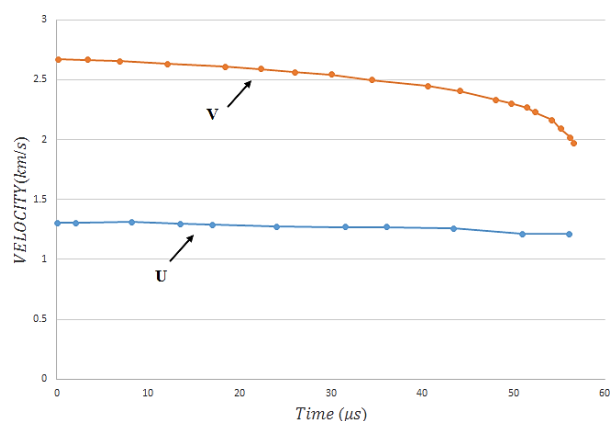
## ۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله برای انجام آزمایش‌های بالستیک نهایی از یک دستگاه تفنگ‌گازی سبک دو مرحله‌ای ۲۵ - ۲۰ mm و از مدل تحلیلی برای پیش‌بینی عملکرد پرتابه میله بلند فرسایشی استفاده شده که با سرعت ۲ km/s بصورت نرمال در اهداف فلزی نفوذ کرده و این مدل قطر حفره، عمق نفوذ و سرعت نفوذ را به عنوان توابع سرعت پرتابه پیش‌بینی می‌کند. آزمون عکس‌های اشعه ایکس نشان می‌دهد که نوک پرتابه پس از نفوذ در هدف به شکل قارچی درآمده و تقریباً شکل سر نیم‌کروی خود را در تمام مراحل اولیه شبه‌ثابت نفوذ حفظ کرده است. در ضمن آزمایش‌های بالستیک نهایی، با استفاده از میله‌های فولادی ۴۳۴۰ نفوذکننده در اهداف آلومینیومی T651-6061 و میله‌های تنگستنی Teledyne X21-C نفوذکننده در اهداف فولادی ۴۳۴۰

میکروثانه دوام داشته و در خلال آن، سرعت پرتابه  $v$  بطور ثابت کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ  $u$  نسبتاً ثابت باقی می‌ماند. ولی یک کاهش سرعت ناگهانی در سرعت پرتابه در چند میکروثانه آخر این مرحله اتفاق می‌افتد. این نسخه از مدل، پیشگویی بطور معقول صحیحی را در مرحله شبه‌پایدار پروسه نفوذ فراهم می‌آورد؛ ولی نمی‌تواند بطور کافی روی کاهش سرعت سریع بعد از آن بحث نماید. عمق‌های نفوذ پیشگویی شده و اندازه‌گیری شده بترتیب برای اهداف آلومینیومی و فولادی با هم مقایسه شده‌اند. سازگاری برای آزمایش‌های با اهداف آلومینیومی از اهداف فولادی بهتر است. توضیح علت می‌تواند این باشد که، مقاومت پرتابه‌های تنگستنی در شرایط برخورد با آهنگ کرنش بالا و تغییر شکل‌های بزرگ، کم تخمین زده شده است و در نتیجه قطر حفره‌ها بیشتر از اندازه پیشگویی شده‌اند و لذا عمق‌های نفوذ کمتر از اندازه پیشگویی گردیده‌اند. سابقه زمانی نفوذ میله‌های فولادی در اهداف آلومینیومی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سازگاری معقولی مابین داده‌ها و پیشگویی‌های مدل برای سه آزمایش حاصل شده است. طول لحظه‌ای پرتابه تغییر شکل نیافته، در خلال مرحله اولیه نفوذ نیز در این شکل‌ها نشان داده شده است. مقدار فرسایش میله با سرعت برخورد افزایش می‌یابد. جنس ماده پرتابه و هدف، شکل دماغه پرتابه و ضخامت هدف از دیگر پارامترهای مؤثر در فرآیند نفوذ هستند در واقع زمانی وزن زره کاهش می‌یابد، مقاومت به نفوذ آن هم‌چنان بالا باقی بماند. در نتیجه لازم هستند از موادی برای ساخت زره استفاده شود که وزن پایین و مقاومت به نفوذ بالایی داشته باشند [۳۰-۳۲].



شکل ۹: سرعت نفوذ  $u$  به سرعت برخورد  $v$  در رژیم مافوق سرعت.



شکل ۱۰: سرعت پرتابه  $v$  و سرعت نفوذ  $u$  بر حسب زمان.

- در سرعت‌های برخورد بالای ۲ km/s انجام پذیرفته است. آزمون عکس‌های اشعه ایکس نشان می‌دهد که نوک پرتابه پس از نفوذ در هدف به شکل قارچی درآمده و تقریباً شکل سر نیم‌کروی خود را در تمام مراحل اولیه شبه‌ثابت نفوذ حفظ کرده است. از نتایج تحلیل انبساط حفره کروی بر روی پرتابه‌های غیرتغییرشکل‌پذیر استفاده شده تا مقاومت هدف را در برابر نفوذ پرتابه‌های فرسایشی بتوان محاسبه کرد. در مرحله گذرا، یک قارچ پایدار در جلوی پرتابه تشکیل می‌گردد. در خلال مرحله اولیه، نفوذ شبه‌پایدار توسط سر قارچی شکل پایدار اتفاق می‌افتد. مرحله ثانویه وقتی آغاز می‌شود که پروسه فرسایش میله پایان می‌پذیرد و پرتابه باقی مانده، بصورت میله صلب نفوذ می‌نماید. در حالت دینامیک سر قارچی شکل، بوسیله موازنه افت انرژی سنتیک در تشکیل سر قارچی شکل و انجام کار پلاستیک در تغییر شکل پرتابه و بر ضد استقامت هدف ایجاد می‌گردد. پیش‌بینی‌های مدل سازگاری خوبی را با داده‌های حاصل از این دو سیستم پرتابه-هدف نشان می‌دهند.
- مراجع**
- [1] Moslemi Petrudi, A, Vahedi, Kh, Kamyab, MH, and Petrudi, Moslemi. Numerical and experimental study of oblique penetration of a blunt projectile into ceramic-aluminum target. *Modares Mechanical Engineering*, 19(5):1253-1263, 2019.
- [2] Anderson Jr, Charles E and Bodner, Sol R. Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 7(1):9-35, 1988.
- [3] Alekseevskii, VP. Penetration of a rod into a target at high velocity. *Combustion, explosion and shock waves*, 2(2):63-66, 1966.
- [4] Tate, A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 15(6):387-399, 1967.
- [5] Tate, A. Further results in the theory of long rod penetrations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(3):141-150, 1969.
- [6] Pack, DC and Evans, WM. Penetration by high-velocity (munroe) jets: I. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(4):298, 1951.
- [7] Hohler, V and Stilp, AJ. Study of the penetration behavior of rods for a wide range of target densities. in *Proceedings of the 5th International Symposium on Ballistics. Toulouse, France*, pp. 16-18, 1980.
- [8] Hohler, V and Stilp, AJ. Hypervelocity impact of rod projectiles with l/d from 1 to 32. *International Journal of Impact Engineering*, 5(1-4):323-331, 1987.
- [9] Forrestal, MJ, Piekutowski, AJ, and Luk, VK. Long-rod penetration into simulated geological targets at an impact velocity of 3.0 km/s. tech. rep., Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1988.
- [10] Tate, A. Long rod penetration models—part i. a flow field model for high speed long rod penetration. *International Journal of mechanical sciences*, 28(8):535-548, 1986.
- [11] Tate, A. Long rod penetration models—part ii. extensions to the hydrodynamic theory of penetration. *International Journal of mechanical sciences*, 28(9):599-612, 1986.
- [12] Taylor, Geoffrey Ingram. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress i. theoretical considerations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 194(1038):289-299, 1948.
- [13] Hawkyard, JB. A theory for the mushrooming of flat-ended projectiles impinging on a flat rigid anvil, using energy considerations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 11(3):313-333, 1969.
- [14] Luk, VK, Forrestal, MJ, and Amos, DE. Dynamic spherical cavity expansion of strain-hardening materials. 1991.
- [15] Forrestal, MJ, Brar, NS, and Luk, VK. Penetration of strain-hardening targets with rigid spherical-nose rods. 1991.
- [16] Eichelberger, RJ and Gehring, JW. Effects of meteoroid impacts on space vehicles. *ARS Journal*, 32(10):1583-1591, 1962.
- [17] Perez, E. Experimental and theoretical study on the penetration of semi-infinite metal targets by very long metal projectiles of velocity greater than 2000 m/s. *Sci. Tech. Armement*, 56(219):11-155, 1982.
- [18] Kawahara, Wendall A. Compression materials testing at low to medium strain rates. tech. rep., American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1987.
- [19] Matuska, Daniel A and Osborn, John J. *Dynamics of high velocity penetration*. Air Force Armament Laboratory, Air Force Systems Command, 1981.
- [20] Duvall, George Evered. *Some properties and applications of shock waves*. Stanford Research Institute, 1960.
- [21] Ekbohm, L, Bogegard, S, Holmberg, L, and Westerling, L. Comparison of the mechanical properties of ke penetrator tungsten alloys and their ballistic performance. jaemfoerelse mellan ke-projektilmaterialets mekaniska egenskaper och projektilens ballistiska verkan. 1987.
- [22] Wright, Thomas W and Frank, Konrad. Approaches to penetration problems. tech. rep., ARMY BALLISTIC RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD, 1988.
- [23] Shampine, Lawrence F and Watts, HA. Depac-design of a user oriented package of ode solvers. tech. rep., Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1980.
- [24] Hohler, V and Stilp, AJ. Penetration of steel and high density rods in semi-infinite steel targets. in *Proc. 3rd Int. Symp. Ballistics*, 1977.
- [25] Silsby, Graham F. Penetration of semi-infinite steel targets by tungsten long rods at 1.3 to 4.5 km/s. in *Proc. 8th Int. Symp. on Ballistics*, pp. TB-31, 1984.
- [26] Naz, P. Penetration and perforation of a steel target by copper rods—measurement of crater diameter. in *Proceedings of the 11th international symposium on ballistics, Brussels, Belgium*, pp. 233-242, 1989.

- Amin Moslemi. Experimental and numerical study of the blast wave decrease using sandwich panel by granular materials core. *Defence Technology*, 2020.
- [31] Rahmani, Masoud and Petrudi, Amin Moslemi. Optimization and experimental investigation of the ability of new material from aluminum casting on pumice particles to reduce shock wave. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(3):224-232, 2020.
- [32] Fathi, Pourya, Oskouei, Alireza Naddaf, Vahedi, Khodadad, and Petrudi, Amin Moslemi. Numerical and experimental analysis of stacking sequences effects in composite mechanical joints under impact loadings. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(53):457-473, 2020.
- [27] Piekutowski, A.J. The university of dayton research institute 50/20 mm, two stage, light-gas gun. in *Proceedings of the Aeroballistic Range Association*. Southwest Research Institute San Antonio, Texas, 1985.
- [28] Ravid, M, Bodner, SR, and Holcman, I. Analysis of very high speed impact. *International journal of engineering science*, 25(4):473-482, 1987.
- [29] Petrudi, Amin Moslemi, Vahedi, Khodadad, Rahmani, Masoud, and Petrudi, MohammadAli Moslemi. Numerical and analytical simulation of ballistic projectile penetration due to high velocity impact on ceramic target. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(54):226-248, 2020.
- [30] Rahmani, Masoud, Oskouei, Alireza Naddaf, and Petrudi,