Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.2/ 1-15

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.1.5

Investigating the Penetration and Fragmentation of the PELE Projectile Using the Methods of Dynamic Expansion of the Spherical Cavity and the Shock Wave

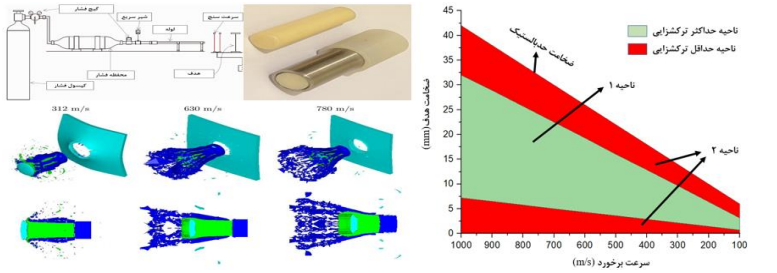
Amir Bakhtiari[1], Mohammad Morad Sheikhi [2*], Nasrollah Bani Mostafa Arab[3], Hossein Khodarahmi [4]

[1] M.Sc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaee Teacher Training, Tehran, Iran
[2] Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaee Teacher Training, Tehran, Iran
[3] Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaee Teacher Training, Tehran, Iran
[4] Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Investigation of shock wave theory and analysis of residual velocity and thickness of ballistic limit and Fragmentation.
- Investigating the method of dynamic expansion of the spherical cavity and analysis of residual velocity and thickness of the ballistic limit and Fragmentation.
- Extracting the performance range of the PELE projectile

GRAPHICALABSTRACT



ARTICLEINFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 10 September 2023
Received in revised form: 19 September 2023
Accepted: 2 December 2023
Available online: 2 December 2023
*Correspondence: m.sheikhi@sru.ac.ir

How to cite this article:
A. Bakhtiari, M.M Sheikhi, N.B.M. Arab, H. Khodarahmi. Investigating the penetration and fragmentation of the pele projectile using the methods of dynamic expansion of the spherical cavity and the shock wave. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(2):1-15.

Keywords:
Ballistic limit thickness
PELE
Shock model
Dynamic spherical cavity expansion

ABSTRACT

In this paper, using analytical, numerical and experimental methods, the range of ballistic limit thickness and fragmentation behind the metal target for the PELE projectile has been investigated. PELE projectile consists of two parts: hard shell with high density and soft core with low density. The soft core is compressed inside the hard shell and upon impact, the hard shell penetrates the target. There are limited models to analyze the penetration and fragmentation of this projectile, and few researchers have addressed this issue. Considering the effect of target characteristics (thickness and material) on the rate of fragmentation and the failure to consider these parameters in the models presented so far, establishing a relationship between the main parameters (target, impact velocity and projectile), using two shock theories and the dynamic expansion of the spherical cavity and their combination with the cracking model have been investigated in this article. In parallel, the experimental tests of the impact of the PELE projectile on the metal target (gas gun - extraction of ballistic limit thickness) and also 3D simulation of finite elements (Auto Dyna software - extraction of shrapnel number) have been carried out in the impact velocity range of 312-780 m/s. According to the appropriate results of the shock wave method compared to the results of the dynamic expansion of the spherical cavity (smaller difference compared to the experimental and simulation results), the final ballistic performance range (the number of shrapnel according to the target thickness and impact velocity) of this method for the velocity range impact rates of 100 to 1000 meters per second were extracted.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University © Authors

مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۲/ صفحه ۱-۱۵

نشریه علمی مکانیک هوافضا

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.1.5

بررسی نفوذ و ترکش‌زایی پرتابه پله با استفاده از روش‌های انبساط دینامیکی حفره کروی و موج شوک

امیر بختیاری[۱]، محمدمراد شیخی[۲*]، نصرالله بنی مصطفی عرب[۳]، حسین خدارحمی[۴]

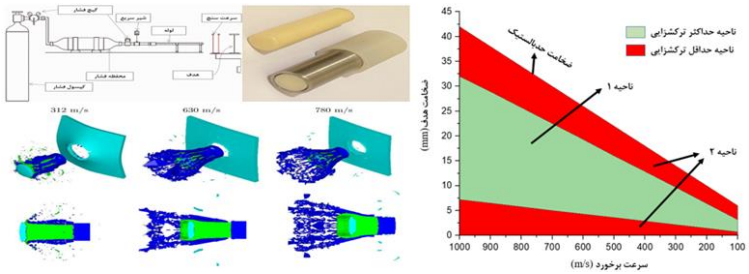
[۱] کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

[۳] استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

[۴] استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



چکیده

در این مقاله، با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی محدوده ضخامت حد بالستیک و ترکش‌زایی در پشت هدف فلزی برای پرتابه پله (نفوذ ارتقاءیافته با اثر جانبی) موردبررسی قرارگرفته است. پرتابه پله متشکل از دو قسمت پوسته سخت با چگالی بالا و مغزه نرم با چگالی کم می‌باشد. مغزه نرم داخل پوسته سخت فشرده‌شده و هنگام برخورد، پوسته سخت در هدف نفوذ می‌کند. برای تحلیل نفوذ و ترکش‌زایی این پرتابه مدل‌های محدودی وجود دارد و محققین کمی به این موضوع پرداخته‌اند. با توجه به تأثیر مشخصات هدف (ضخامت و جنس) در میزان ترکش‌زایی و عدم در نظر گرفتن این پارامترها در مدل‌های ارائه‌شده تاکنون، ایجاد ارتباط مابین پارامترهای اصلی (هدف، سرعت برخورد و پرتابه)، با استفاده از دو نظریه شوک و انبساط دینامیکی حفره کروی و ترکیب آن‌ها با مدل ترکش‌زایی در این مقاله بررسی‌شده است. به‌طور موازی آزمایش‌های تجربی برخورد پرتابه پله به هدف فلزی (جهت استخراج ضخامت حد بالستیک) و همچنین شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزاء محدود (جهت استخراج تعداد ترکش) در محدوده سرعت برخورد ۳۱۲-۷۸۰ متر بر ثانیه انجام‌شده است. با توجه به نتایج مناسب روش موج شوک در مقایسه با نتایج انبساط دینامیکی حفره کروی (اختلاف کمتر در مقایسه با نتایج تجربی و شبیه‌سازی) محدوده عملکرد بالستیک نهایی (تعداد ترکش برحسب ضخامت هدف و سرعت برخورد) از این روش برای دامنه سرعت‌های برخورد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه استخراج گردید.

برجسته‌ها

- بررسی تئوری موج شوک و تحلیل سرعت باقیمانده و ضخامت حد بالستیک و ترکش‌زایی
- بررسی روش انبساط دینامیکی حفره کروی و تحلیل سرعت باقیمانده و ضخامت حد بالستیک و ترکش‌زایی
- استخراج دامنه عملکرد پرتابه پله

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

*نویسنده مسئول:

m.sheikhi@sru.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ضخامت حد بالستیک

پرتابه پله

موج شوک

انبساط دینامیکی حفره کروی

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) توزیع‌شده است.

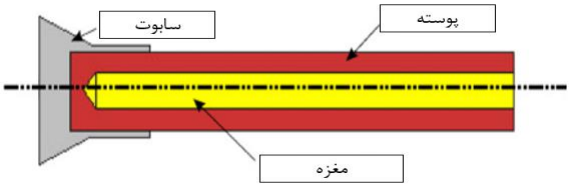
© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۱- مقدمه

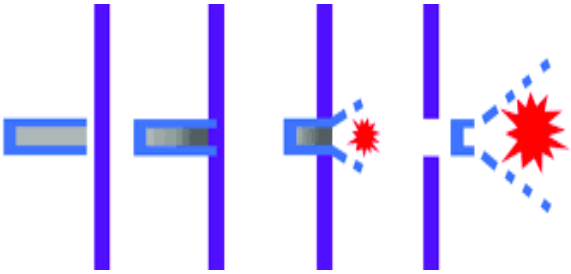
از دیدگاه بالستیک نهایی پرتابه‌های انرژی جنبشی به دو دسته نفوذی و ترکش‌زا تقسیم می‌شوند. نوع نفوذی از یک هسته با استحکام بالا جهت نفوذ در زره‌های بالستیکی استفاده می‌کند اما در نوع ترکش‌زا از مواد انفجاری و فیوزهای آنی (داخل بدنه پرتابه) استفاده‌شده است که در صورت برخورد به هدف (سبک یا سنگین) منفجرشده و ترکش‌های آن قابلیت نفوذ و عبور از هدف را ندارد.

به‌تازگی دسته سومی از پرتابه‌های انرژی جنبشی معرفی‌شده‌اند که درصدی از مجموع کارایی دسته اول (نفوذ) و دوم (ترکش‌زایی) بعلاوه قابلیت انتقال ترکش‌ها به پشت هدف را دارند. این دسته از پرتابه‌ها بدون استفاده از ماده منفجره و به کمک انرژی ذخیره‌شده ناشی از برخورد به هدف پس از عبور کامل تبدیل به ترکش خواهند شد. از مهم‌ترین پرتابه‌های حاضر در این دسته، پرتابه با نفوذ ارتقاءیافته و اثر شعاعی (PELE-پله)[1] است. پرتابه پله توسط پولوز معرفی و اولین آزمایش‌های مربوط به این نافذ در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ در آزمایشگاه انجام شد. توضیحاتی کوتاه از برخی از ویژگی‌های این نوع نافذ برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ منتشر شد [۱]. با توجه به اثری که این پرتابه در هدف و پشت آن ایجاد می‌نماید، می‌توان آن را به‌عنوان نوع جدیدی از نافذهای انرژی جنبشی طبقه‌بندی نمود. شکل **۱** ساختار این پرتابه را که اغلب در آزمایشگاه‌ها بکار رفته نشان می‌دهد [۲]. همان‌طور که در این شکل مشخص است، این نافذ برای ایجاد ترکش پشت هدف از دو جزء شامل مغزه نرم داخلی (با چگالی پایین) و پوسته سخت (با چگالی بالا) تشکیل‌شده است [۳].



شکل (۱): شماتیک پرتابه پله [۱].

در صورت برخورد پرتابه پله به هدف، پوسته سخت به‌خوبی در هدف نفوذ کرده و می‌تواند ایجاد پلاگ نماید، ولی مغزه به دلیل نرمی و استحکام پایین از پوسته عقب‌مانده در پشت پلاگ متراکم می‌شود. در این حالت، فشار بسیار بالایی در مغزه ایجادشده که پس از کنده شدن پلاگ و خروج پرتابه از هدف، عامل متلاشی شدن پوسته پرتابه و پخش ترکش‌هایی از پوسته به سمت جلو و در جهت شعاعی در پشت هدف می‌شود. شماتیک این پدیده در شکل **۲** نمایش داده‌شده است [۴].



شکل (۲): شماتیک مراحل عبور و ترکش‌زایی پرتابه پله.

شناخت صحیح از مکانیسم نفوذ و ترکش‌زایی پرتابه پله منجر به ارائه مدل‌هایی جهت تحلیل عملکرد این پرتابه خواهد شد. پیرو این موضوع ژانگ و همکارانش، مکانیسم عملکرد را به دو مرحله تقسیم کرده‌اند. در مرحله اول مغزه با سرعت کمتری نسبت به پوسته به سمت جلو حرکت کرده و در طول فرآیند نفوذ توسط هدف و پوسته فشرده می‌شود. تنش شعاعی ایجادشده باعث منبسط شدن سریع پوسته در جهت شعاعی می‌گردد. در مرحله دوم هرچه عمق نفوذ بیشتر شده برهم‌کنش پوسته و مغزه نیز افزایش می‌یابد. پس از عبور از هدف، تنش موجود در مغزه آزادشده و باعث شکست پوسته و ایجاد ترکش در پشت هدف خواهد شد [۴].

ژاو بر اساس آزمایش‌ها، اقدام به جمع‌آوری اطلاعات پدیده فیزیکی برخورد پرتابه پله به هدف نازک فلزی کرده است [۵]. طبق این تحقیقات، رفتار بالستیک نهایی این پرتابه می‌تواند به سه مرحله تقسیم شود. اولین مرحله فاز بسیار کوتاهی است که اساساً به‌وسیله انرژی جنبشی متفاوت پوسته و مغزه کنترل می‌شود. پوسته عمیق‌تر از مغزه در هدف نفوذ خواهد کرد و درنتیجه فشار بالایی در ماده مغزه ایجاد می‌گردد. این فشار به شکل شعاعی در پوسته پخش‌شده و وقتی کرنش در پوسته به حد شکست خودش برسد، تبدیل به ترکش می‌شود. این فرآیند نشان می‌دهد که

[1] Penetration with Enhanced Lateral Efficiency

رفتار این پرتابه در مقایسه با رفتار سایر پرتابه‌ها بسیار پیچیده‌تر است. مشخصات ساده‌ای چون نسبت طول به قطر زمانی که در مورد پرتابه پله به کار می‌روند، معنای خود را از دست می‌دهد؛ به‌عبارت‌دیگر تنوع هندسه، مواد مورداستفاده برای پرتابه یا هدف و سرعت‌های برخورد گوناگون، رفتار حین برخورد پرتابه پله را بیشتر از رفتار ضربه‌ای پرتابه ساده، تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مرحله اول، اختلاف انرژی جنبشی پوسته و مغزه سبب محصور شدن ماده مغزه می‌شود. این امر افزایش و تجمع فشار را در مغزه القاء کرده که پوسته احاطه‌کننده خود را در مرحله دوم منبسط می‌نماید [۶]. در حین مرحله نهایی، پوسته با چگالی بالا تبدیل به ترکش می‌شود. زمانی که یک هدف نازک تحت نفوذ قرار گیرد، بایستی مرحله چهارمی به این سه مرحله اضافه شود. این مرحله جدید واکنش بین ماده مغزه و پلاگ کنده‌شده از هدف را توصیف می‌کند. برای ایجاد اثرات جانبی پرتابه پله مرحله دوم مرحله مهمی است. رفتار در این مرحله (تجمع فشار و انبساط شعاعی پوسته) تنها به‌وسیله چند پارامتر فیزیکی محقق می‌شود [۷]. ترکیب پرتابه پله با EFP نیز کارایی آن را به‌شدت افزایش می‌دهد [۸]. همچنین برای افزایش کارایی از مواد واکنش‌پذیر در این پرتابه استفاده‌شده که این مواد منجر به افزایش سرعت ترکش‌ها و افزایش پراکندگی آن خواهد شد [۹].

با توجه به ساختار پرتابه پله و هم‌زمانی نفوذ و ترکش‌زایی آن در هیچ یک از مقالات ارائه‌شده تاکنون کارایی (نفوذ و ترکش‌زایی) این پرتابه به‌صورت کامل موردبررسی قرار نگرفته است. در اکثر مقالات بیشتر به جنبه ترکش‌زایی این پرتابه پرداخته‌شده، حال‌آنکه نکته مهم در ترکش‌زایی پرتابه پله ضخامت هدف است. اگر پرتابه پله از هدف باضخامت نازک عبور کند به دلیل کاهش نیروی وارد بر مغزه (ضخامت نازک پلاگ) و به طبع آن کاهش فشار داخلی پوسته، تعداد ترکش‌ها کاهش می‌یابد. برعکس اگر از هدف ضخیم (تا ضخامت حد بالستیک) عبور کند به دلیل افزایش نیروی وارد بر مغزه (ضخامت ضخیم پلاگ) فشار وارد بر پوسته افزایش یافته و تعداد ترکش‌ها پس از عبور از هدف به حداکثر خود می‌رسد. برای ضخامت‌های بیشتر از ضخامت حد بالستیک، پرتابه پله بر روی هدف متلاشی‌شده و قابلیت ترکش‌زایی در پشت هدف را نخواهد داشت.

در مقاله حاضر، عملکرد پرتابه پله در ۳ بخش موردبررسی قرارگرفته است:

۱) در بخش مدل تحلیلی با استفاده از دو روش تحلیلی نفوذ (انبساط دینامیکی حفره کروی و انرژی شوک) و ترکیب آن با روش تحلیل ترکش‌زایی، عملکرد پرتابه پله در دامنه سرعت‌های برخورد ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ متر بر ثانیه شامل موارد زیر ارائه‌شده است:
   - پیش‌بینی ضخامت حد بالستیک هدف فلزی.
   - پیش‌بینی سرعت حد بالستیک هدف فلزی.
   - پیش‌بینی محدوده عملکرد پرتابه پله (ضخامت حد بالستیک و تعداد ترکش‌ها).
۲) در بخش تجربی با استفاده از تفنگ گازی، ضخامت حد بالستیک هدف فلزی برای سرعت‌های برخورد ۳۰۰ الی ۸۰۰ متر بر ثانیه استخراج گردیده است.
۳) در بخش شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Auto-Dyn به‌صورت سه‌بعدی، تحلیل ترکش‌زایی بر روی هدف St37 انجام‌شده است.

۲- مدل تحلیلی

برای ارائه مدل تحلیلی مناسبی که بتواند ضخامت حد بالستیک، سرعت محوری و شعاعی ترکش‌های پوسته را پیش‌بینی نماید، مسئله نفوذ پرتابه با استفاده از روش‌های انبساط دینامیکی حفره کروی و روش موج شوک به شرح زیر موردبررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- روش انبساط حفره کروی دینامیکی

تحلیل تنش الاستیک-پلاستیک اطراف یک حفره که با سرعتی درون صفحه هدف حرکت می‌کند، به‌عنوان تئوری انبساط حفره دینامیکی شناخته‌شده و مبنای مدل‌های تحلیلی مختلفی قرارگرفته است [۱۰].

فورستال [۱۱]، با کمک روش مذکور، تنش ناشی از برخورد پرتابه به هدف (تنش فورستال σ_s) را ارائه نمود. در این

قسمت با استفاده از تنش فورستال و معادله حرکت، سرعت باقیمانده و ضخامت حد بالستیک استخراج می‌گردد.

به این منظور، σ_n تنش نرمال وارد بر هدف از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_n = \sigma_s + \frac{3}{2}\rho_t u_0^2 \quad (۱)$$

در اینجا u_0 سرعت برخورد، ρ_t چگالی هدف و σ_s از رابطه (۲) محاسبه می‌شود که در این رابطه Y_t تنش تسلیم هدف، E_t مدول یانگ هدف، n توان سختی و I نیز از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در معادله (۵) با استفاده از قوانین حرکت نیوتن رابطه مابین سرعت و جابه‌جایی استخراج می‌گردد، به‌این‌ترتیب رابطه‌ای برای سرعت باقیمانده (u_r) به‌صورت معادله (۶) معرفی می‌شود. با توجه به شکل **۳**، h_t ضخامت هدف، r_j شعاع پوسته، r_f شعاع مغزه، l_f طول مغزه، l_j طول پوسته، A_j سطح مقطع پوسته که از رابطه (۴) به‌دست‌آمده و همچنین m_p جرم کل پرتابه است.

$$\sigma_s = \frac{2}{3}\, Y_t[1 + (\frac{2E_t}{3Y_t})^n I] \quad (۲)$$

$$I = \int_0^b \frac{(-\ln x)^n}{1-x}\,dx,\ \ b = 1 - (\frac{3Y_t}{2E_t}) \quad (۳)$$

$$A_j = \pi\left(r_j{}^2 - r_f{}^2\right) \quad (۴)$$

با استفاده از تفکیک معادله حرکت به متغیرهای جابه‌جایی و سرعت و انتگرال‌گیری از هریک سرعت باقیمانده و ضخامت حد بالستیک $(u_r = 0)$ به دست می‌آید.

$$F = m_p a \ \rightarrow\ F = m_p u\frac{du}{dx} \rightarrow dx = \frac{m_p u du}{\sigma_n A_j}$$

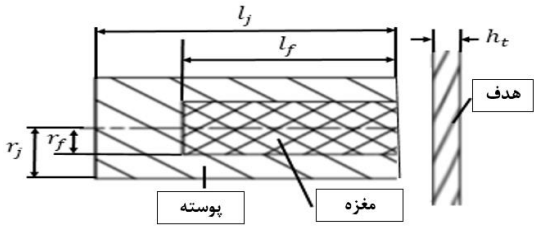
$$\rightarrow \int_0^{h_t} dx \quad (۵)$$

$$= \int_{u_0}^{u_r} \frac{m_p u}{\sigma_n A_j}\, du \ \rightarrow\ \int_{u_0}^{u_r} \frac{m_p u}{(\sigma_s + \frac{3}{2}\rho_t u^2)A_j}\, du$$

$$u_r = [\,\frac{2}{3\,\rho_t}(\left(\sigma_s + \frac{3}{2}\rho_t {u_0}^2\right)e^{\frac{3A_j\rho_t h_t}{m_p}} - \sigma_s)] \quad (۶)$$

۲-۲- روش موج شوک

در این روش با استفاده از معادله بقای انرژی و نظریه موج شوک، سرعت ذرات پوسته و هدف و همچنین مغزه و هدف به دست می‌آید. سپس انرژی‌های انتقالی در حین نفوذ از پرتابه به هدف به‌صورت جداگانه محاسبه گردیده است.



شکل (۳): شماتیک پرتابه و هدف.

انرژی کل (انرژی جنبشی پرتابه قبل از برخورد) برابر با برآیند انرژی‌های زیر می‌باشد:

- انرژی جنبشی منتقل‌شده به هدف
- انرژی پتانسیل ناشی از فشرده شدن پرتابه در حین برخورد
- انرژی برشی جداسازی پلاگ از هدف

انبساط شعاعی پوسته در فرآیند نفوذ نادیده گرفته‌شده و پوسته صلب در نظر گرفته می‌شوند. ازآنجاکه هنگام تجزیه‌وتحلیل، پرتابه و صفحه هدف ساختارهای متقارنی دارند توزیع تنش پرتابه و صفحه هدف، می‌تواند به‌صورت دوبعدی متقارن در نظر گرفته شود.

پارامترهای مورداستفاده: پرتابه با سرعت برخورد u_0 و جرم پرتابه m و همچنین λ و c ثوابت هاگونیوت E، D، ρ و p به ترتیب از راست به چپ، انرژی، سرعت موج شوک و چگالی و فشار است. با توجه به برهم‌کنش موج ضربه می‌توان روابط زیر را به دست آورد: در پوسته پارامترهای اولیه قبل از ضربه p_{0j}، ρ_{0j}، u_{0j} و c_{0j} و پس از انتشار موج ضربه p_{1j}، ρ_{1j}، u_{1j} و c_{1j} است. بنابراین، روابط زیر را می‌توان از طریق معادله ناپیوسته موج شوک و معادله شوک خطی به دست آورد.

$$p_{1j} = \rho_{0j}(D_j - u_0)(u_{1j} - u_0) \quad (۷)$$

$$D_j - u_0 = -c_{0j} + \lambda_j(u_{1j} - u_0) \quad (۸)$$

در مغزه نیز پارامترهای اولیه p_{0f}، ρ_{0f}، u_{0f} و c_{0f} و پس از انتشار موج ضربه p_{1f}، ρ_{1f}، u_{1f} و c_{1f} است. به همین ترتیب، روابط زیر را می‌توان از طریق معادله ناپیوسته موج شوک و معادله شوک خطی به دست آورد.

$$p_{1f} = \rho_{0f}(D_f - u_0)(u_{1f} - u_0) \quad (۹)$$

$$D_f - u_0 = -c_{0f} + \lambda_f(u_{1f} - u_0) \quad (۱۰)$$

در صفحه هدف پارامترهای اولیه p_{0t}، ρ_{0t}، u_{0t} و c_{0t} است و پس از برخورد یک موج شوک در صفحه هدف ایجاد می‌شود. موج شوک به دو منطقه تقسیم می‌شود:

اول: منطقه برهم‌کنش بین پوسته و صفحه هدف که پارامترهای آن p_{tj}، ρ_{tj}، u_{tj} و c_{tj} است. روابط زیر را می‌توان از طریق معادله ناپیوسته موج شوک و معادله شوک خطی بدست آورد.

$$p_{tj} = \rho_{0t} D_{tj} u_{tj} \quad (۱۱)$$

$$D_{tj} = c_{0t} + \lambda_t u_{tj} \quad (۱۲)$$

دوم: منطقه برهم‌کنش بین مغزه و صفحه هدف که پارامترهای آن p_{tf}، ρ_{tf}، u_{tf} و c_{tf} است. روابط زیر را می‌توان از طریق معادله ناپیوسته موج شوک و معادله شوک خطی بدست آورد.

$$p_{tf} = \rho_{0t} D_{tf} u_{tf} p_{tf} = \rho_{0t} D_{tf} u_{tf} \quad (۱۳)$$

$$D_{tf} = c_{0t} + \lambda_t u_{tf} \quad (۱۴)$$

با توجه به شرایط تعادل مکانیکی منطقه برهم‌کنش سرعت و فشار برای هر دو طرف برابر است:

$$p_{tj} = p_{1j}, u_{tj} = u_{1j}$$

هنگامی‌که معادلات (۴)، (۵)، (۸) و (۹) با هم ترکیب می‌شوند، بیان سرعت ذرات صفحه هدف پس از موج شوک به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}&(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)u_{tj}^2 \\ &\quad - (2\rho_{0j}\lambda_j u_0 + \rho_{0j}c_{0j} \\ &\quad + \rho_{0t}c_{0t})u_{tj} + \rho_{0j}\lambda_j u_0^2 \\ &\quad + \rho_{0j}c_{0j}u_0 = 0\end{aligned} \quad (۱۵)$$

با حل معادله (۱۵) سرعت ذرات پس از برخورد بین پوسته و صفحه هدف به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}u_{tj} &= \frac{(2\rho_{0j}\lambda_j u_0 + \rho_{0j}c_{0j} + \rho_{0t}c_{0t})}{2(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)} \\ &- \frac{\sqrt{(2\rho_{0j}\lambda_j u_0 + \rho_{0j}c_{0j} + \rho_{0t}c_{0t})^2}}{2(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)} \\ &- \frac{\sqrt{-4(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)(\rho_{0j}\lambda_j u_0^2 + \rho_{0j}c_{0j}u_0)}}{2(\rho_{0j}\lambda_j - \rho_{0t}\lambda_t)}\end{aligned} \quad (۱۶)$$

شرایط تعادل بین مغزه و صفحه هدف:

$$p_{tf} = p_{1f}$$
$$u_{tf} = u_{1f}$$

وقتی معادلات (۶)، (۷)، (۱۰) و (۱۱) با هم ترکیب شوند، سرعت ذرات پس از برخورد بین مغزه و صفحه هدف به‌صورت رابطه (۱۷) به دست می‌آید؛ بنابراین، افزایش انرژی جنبشی صفحه هدف در منطقه برخورد پرتابه و صفحه هدف را می‌توان پس از موج ضربه به دست آورد.

$$\begin{aligned}u_{tf} &= \frac{(2\rho_{0f}\lambda_f u_0 + \rho_{0f}c_{0f} + \rho_{0t}c_{0t})}{2(\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{0t}\lambda_t)} \\ &- \frac{\sqrt{(2\rho_{0f}\lambda_f u_0 + \rho_{0f}c_{0f} + \rho_{0t}c_{0t})^2}}{2(\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{0t}\lambda_t)} \\ &- \frac{\sqrt{-4(\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{t0}\lambda_t)(\rho_{0f}\lambda_f u_0^2 + \rho_{0f}c_{0f}u_0)}}{2(\rho_{0f}\lambda_f - \rho_{0t}\lambda_t)}\end{aligned} \quad (۱۷)$$

۲-۲-۱- انرژی جنبشی

انرژی جنبشی منتقل‌شده به هدف از پوسته و مغزه به ترتیب برابر است با انرژی ناشی از سرعت ذرات هدف و پوسته و سرعت ذرات هدف و مغزه (معادلات (۱۸) و (۱۹)).

$$E_{tj} = \frac{1}{2}\pi(r_j^2 - r_f^2)h_t\rho_{0t}u_{tj}^2 \quad (۱۸)$$

$$E_{tf} = \frac{1}{2}\pi r_f^2 h_t \rho_{0t} u_{tf}^2 \quad (۱۹)$$

۲-۲-۲- انرژی پتانسیل

همراه با رابطه موج شوک، سرعت موج شوک D_{tj}، D_{tf}، D_j و D_f را می‌توان به دست آورد که D_{tj} سرعت موج ضربه صفحه هدف تحت تأثیر بین پوسته و صفحه هدف، D_{tf} سرعت موج ضربه صفحه هدف تحت تأثیر بین مغزه و صفحه هدف و D_j و D_f به ترتیب سرعت موج ضربه خارجی پوسته و مغزه است. طول موج ضربه t_j و t_f از پوسته و مغزه می‌تواند به شرح زیر بیان شود:

$$t_j = \frac{h_t}{D_{tj}} + \frac{(h_t - u_{tj}t_j)}{c_{0t} - u_{tj}} \quad (۲۰)$$

$$t_j = \frac{h_t}{D_{tj}} + \frac{(h_t - u_{tj}t_j)}{c_{0t} - u_{tj}} \quad (۲۱)$$

با توجه به روابط هوگونیوت، همراه با سرعت ذرات صفحه هدف پس از موج ضربه، تغییر انرژی داخلی پوسته و مغزه در طول t_j و t_f را می‌توان با تغییر انرژی جنبشی بیان کرد.

$$E_{1j} = \frac{1}{2}u_{1j}^2\pi(r_j{}^2 - r_f{}^2)D_j t_j \rho_j \quad (۲۲)$$

$$E_{1f} = \frac{1}{2}u_{1f}^2\pi r_f{}^2 D_f t_f \rho_f \quad (۲۳)$$

۲-۲-۳- انرژی برشی پلاگ

نیروی برشی با اختلاف سرعت و زمان حرکت مغزه با هدف و همچنین پوسته با هدف تعیین می‌شود. درواقع اختلاف سرعت ذرات هدف و پرتابه منجر به ایجاد نیروی برشی و به‌تبع آن ایجاد پلاگ می‌گردد. با فرض نبودن هیچ‌گونه

اتصال و اصطکاکی مابین مغزه و پوسته اختلاف‌زمان رسیدن قبل از برخورد به هدف به فاصله مابین پوسته و مغزه مرتبط است که به دلیل کوچکی از آن صرف‌نظر می‌شود. با فرض هم‌جنس پوسته و هدف سرعت ذرات آن‌ها یکسان بوده و انرژی برشی برای قطر خارجی پوسته از رابطه (۲۴) و برای قطر داخلی آن از رابطه (۲۵) می‌باشد [۱۲]:

$$E_{\tau j} = \frac{1}{\sqrt{3}}\pi R \sigma_Y^D {h_t}^2 \quad (۲۴)$$

$$E_{\tau f} = \frac{1}{\sqrt{3}}\pi r \sigma_Y^D {h_t}^2 \quad (۲۵)$$

۲-۲-۴- محاسبه سرعت باقیمانده و ضخامت حد بالستیک از بالانس انرژی

با صرف‌نظر از کاهش جرم، مطابق قانون بقاء انرژی، انرژی لحظه خروج پرتابه از هدف را می‌توان برابر با انرژی‌های اتلافی و باقیمانده به شرح زیر در نظر گرفت:

$$E_0 = E_{resj} + E_{tj} + E_{1j} + E_{\tau j} + E_r + E_{tf} + E_{1f} + E_{\tau f} \quad (۲۶)$$

از رابطه فوق سرعت باقیمانده خواهد شد:

$$u_r = \sqrt{u_0^2 - \frac{2}{m_j}(E_{tj} + E_{1j} + E_{\tau j} + E_{resp} + E_{tf} + E_{1f} + E_{\tau f})} \quad (۲۷)$$

درصورتی‌که سرعت باقیمانده برابر صفر در نظر گرفته شود و ضخامت هدف به‌عنوان مجهول در معادلات حضورداشته باشد، رابطه سرعت باقیمانده تبدیل به یک معادله درجه‌دو برحسب مجهول ضخامت می‌شود.

$$\frac{\pi}{\sqrt{3}}R\sigma_Y^D h^2 + \frac{\pi}{2}(R^2 - r^2)\rho_{0t}u_{tj}^2 h + E_{1j} + \frac{\pi}{\sqrt{3}}r\sigma_Y^D h^2 + \frac{\pi}{2}r^2\rho_{0t}u_{tf}^2 h + E_{1f} + \frac{u_0^2 m}{2} = 0 \quad (۲۸)$$

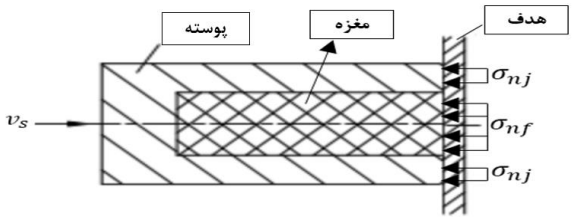
که با حل معادله بالا ضخامت حد بالستیک به دست می‌آید.

۲-۳- ترکش‌زایی

با برخورد پرتابه پله به هدف، پوسته سخت به‌خوبی در هدف نفوذ کرده و می‌تواند ایجاد پلاگ نماید، ولی مغزه به دلیل نرمی و استحکام پایین از پوسته عقب‌مانده در پشت پلاگ متراکم می‌شود. این فشردگی تا لحظه عبور کامل از هدف و جدا شدن پلاگ و پیشروی آن داخل پوسته و هم سرعت شدن با پوسته ادامه دارد تا اینکه پس از عبور کامل از هدف و آزاد شدن نیروی نگه‌دارنده پوسته (حذف قید شعاعی هدف که دورتادور پوسته را محصور کرده است)، فشردگی مغزه منجر به متلاشی شدن پوسته می‌گردد. این قسمت از تحلیل در دو گام موردبررسی قرارگرفته است:

۲-۳-۱- لحظه برخورد پرتابه به هدف

هنگام برخورد پرتابه به هدف با سرعت u_0، تنشی در پوسته و مغزه ایجاد می‌شود. این تنش از معادله (۱) برای پوسته و مغزه به‌صورت جداگانه قابل‌محاسبه است. باید توجه داشت به دلیل اختلاف بالای چگالی هدف و مغزه، برای محاسبه تنش بر روی مغزه، هدف و پرتابه جابه‌جا در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر هدف به‌صورت جسم صلب فرض شده که با سرعت u_0 به مغزه برخورد می‌نماید؛ بنابراین، در رابطه (۲) به‌جای پارامترهای E_t، Y_t، ρ_t و n که مربوط به هدف است، پارامترهای مشابه مرتبط با مغزه استفاده می‌شود. به‌این‌ترتیب تنش ایجادی در لحظه اول برخورد به هدف در پوسته σ_{nj} و در مغزه σ_{nf} است (شکل **۴**).



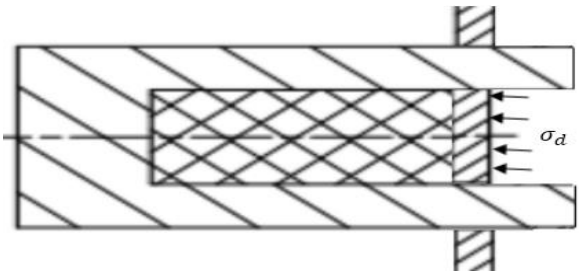
شکل (۴): تنش‌های وارده به پوسته و مغزه در لحظه برخورد به هدف.

۲-۳-۲- هنگام عبور پرتابه از هدف

تنش دینامیکی از طریق پلاگ جداشده از هدف به مغزه وارد می‌شود. پس از نفوذ کامل و عبور کامل قسمت جلویی پوسته پرتابه، پلاگ از هدف جداشده و پرتابه با سرعت باقیمانده u_r به حرکت ادامه می‌دهد. پلاگ نیز تا جایی که با پرتابه هم سرعت شود، درون پوسته پیشروی کرده و بر مغزه فشار وارد می‌نماید (شکل **۵**).

رابطه (۲۹) تنش محیطی وارد بر پوسته را بیان می‌نماید.

$$\sigma_h = \frac{p_d}{1 - \frac{r_f}{r_j}} > \sigma_{ult} \quad (۲۹)$$



شکل (۵): پیشروی پلاگ درون پوسته.

معادله حرکت شعاعی پوسته به‌صورت رابطه (۳۰) است که در آن F_P نیروی وارد بر جداره داخلی پوسته ناشی از فشار دینامیکی وارد بر مغزه و همچنین F_h نیروی حاصل از تنش محیطی وارد بر پوسته است. پوسته قبل از ترکش‌شدن در حال تعادل است؛ بنابراین نیروی ناشی از فشار شعاعی F_P با نیروی ناشی از تنش مماسی F_h برابر است و در صورت افزایش نیروی فشاری (فشار مغزه) برآیند این نیروها تبدیل به نیروی شعاعی ترکش‌ها می‌شود (رابطه۳۰). از این معادله شتاب ترکش‌ها برحسب تابعی از شعاع متوسط r_m ، مطابق رابطه (۳۱) به دست می‌آید که در آن V_R حجم استوانه با شعاع داخلی مغزه، شعاع خارجی و طول پوسته و m_R جرم پوسته برای حجم V_R است.

$$m_R a_{\text{frag}} = F_P - F_h \tag{۳۰}$$

$$a_{\text{frag}} = \frac{2}{m_R}\left[\left(r - \frac{V_R}{4r_m}\right)p_d - \frac{V_R}{2r_m}\,\sigma_h\right] \tag{۳۱}$$

رابطه (۳۲) معادله کرنش شعاعی مغزه و پوسته را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کرنش شعاعی پوسته و مغزه با هم برابر است، فشار وارد بر مغزه به‌صورت معادله (۳۳) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \varepsilon_{rf} = \dfrac{1}{E_f}\left[-p_d - \vartheta_f(-\sigma_{nf} - \sigma_d)\right] \\ \varepsilon_{rj} = \dfrac{1}{E_j}\left[-p_d - \vartheta_j(\sigma_{nj} - \sigma_d - \sigma_{nf})\right] \\ \rightarrow \varepsilon_{rf} = \varepsilon_{rj} \end{cases} \tag{۳۲}$$

$$p_d = \frac{E_f\,\vartheta_j(\sigma_{nj} - \sigma_{nf} - \sigma_d) + E_j\,\vartheta_f\,(\sigma_d + \sigma_{nf})}{E_j - E_f} \tag{۳۳}$$

در این مرحله با انتگرال‌گیری از معادله (۳۱) برحسب r، سرعت اولیه ترکش‌ها مطابق معادله (۳۵) به دست می‌آید.

$$\int_{r_j}^{r_j + r_j\varepsilon_r} a_{frag}\,dr = \int_0^{v_{frag}} v\,dv \tag{۳۴}$$

$$\int_{r_j}^{r_j + r_j\varepsilon_r} a_{frag}\,dr = \int_0^{v_{frag}} v\,dv$$

$$\rightarrow\ v_{frag} = \left[\frac{4}{m_R}\left(\left(\frac{{r_j}^2}{2} - \frac{V_R}{4}Lnr_j\right)p_d - \frac{V_R\sigma_h}{2}Lnr_j\right)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{۳۵}$$

برای محاسبه جرم متوسط ترکش‌ها از معادله موت مطابق رابطه (۳۶) استفاده می‌شود. با محاسبه جرم متوسط ترکش‌ها و داشتن جرم کل پوسته، تعداد ترکش‌ها به دست می‌آید. در این معادله مقدار γ_M که یک ضریب ثابت است برای فلزات برابر ۱۵ در نظر گرفته‌شده و ρ_j چگالی بدنه، σ_{fr} تنش دینامیکی شکست و $\dot{\varepsilon}_{rj}$ نرخ کرنش وارد بر بدنه است [۱۳].

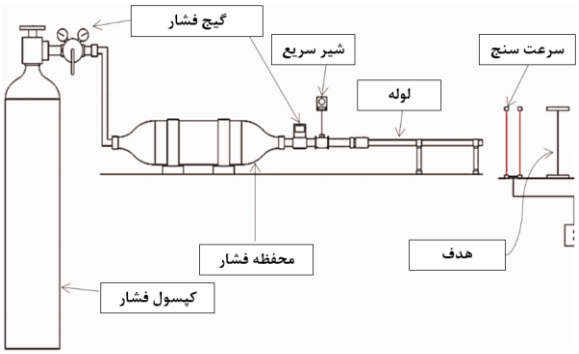
$$m_{avg,i} = \sqrt{\frac{2}{\rho_j}}\left(\frac{\sigma_{fr}}{\gamma_M}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{1}{\dot{\varepsilon}_{rj}}\right)^3 \tag{۳۶}$$

۳- آزمایش‌های تجربی

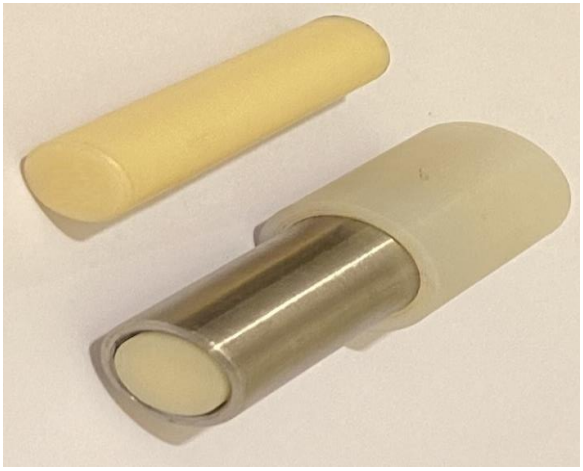
در این بخش شرحی بر آزمایش‌های تجربی انجام‌شده برای بررسی عملکرد پرتابه پله ارائه می‌شود. شلیک پرتابه‌ها توسط سامانه تفنگ گازی انجام‌شده است. مشخصات پرتابه، هدف و تفنگ گازی به شرح زیر است:

۳-۱- تجهیزات مورداستفاده

- تفنگ گازی با کالیبر ۵۰ میلی‌متر، طول لوله پرتاب ۱۶ متر، حجم محفظه گاز ۷/۱۵ دسی‌متر مکعب و گاز هوای فشرده (شکل ۶)
- هدف از جنس St37 با ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از لوله پرتاب
- سرعت‌سنج مغناطیسی در جلوی دهانه لوله تفنگ با فاصله ناچیز قرار دارد
- پوسته و مغزه و سابوت به ترتیب از جنس فولاد ۴۳۴۰ با سختی RC ۶۰ و پلی‌آمید نوع ۶
- ابعاد اجزاء پرتابه: قطر خارجی و داخلی پوسته به ترتیب ۲۲/۸ و ۱۷ میلی‌متر، طول آن ۷۸ و ضخامت انتهای پرتابه ۵ میلی‌متر، وزن کل پرتابه ۱۷۰ گرم (۲۰ گرم وزن مغزه و ۱۵۰ گرم وزن پوسته) است (شکل ۷).



شکل (۶): شماتیک مکانیسم تفنگ گازی.



شکل (۷): پرتابه پله، سابوت و مغزه

۳-۲- آزمون کشش

نتایج آزمون کشش مواد فلزی مورداستفاده (پوسته فولاد ۴۳۴۰ و هدف فولاد St37) در نرخ کرنش پایین در شکل **۸** آورده شده است.

۳-۳- نحوه انجام تست و اندازه‌گیری‌ها

در هر یک از شلیک‌ها فشار قبضه به نحوی تعیین گردیده تا سرعت‌های برخورد با تلورانس مثبت و منفی ۵ متر بر ثانیه احصاء گردد. برای هر سرعت حداقل ۳ شلیک جهت تشخیص ضخامت حد بالستیک (تغییر ضخامت هدف) و ۳ شلیک جهت تکرارپذیری نتیجه انجام‌شده است. (مجموعاً برای هر سرعت برخورد ۶ شلیک انجام‌شده است). تشخیص محدوده ضخامت هدف برای اولین بار توسط خبرگی صورت پذیرفته تا بتوان با حداقل تعداد شلیک نتایج مطلوبی را کسب نمود.

۳-۴- نتایج آزمایش‌های عملکرد پرتابه پله

پس از شلیک پرتابه پله به صفحات هدف از جنس فولاد St37، عبور کامل پرتابه ثبت گردیده و نتایج آزمایش در جدول **۱** ارائه‌شده است. با توجه به نتایج با افزایش سرعت برخورد ضخامت حد بالستیک افزایش داشته و همچنین پارگی‌های مقطعی در هدف نیز کاهش می‌یابد.

۴- شبیه‌سازی عددی عملکرد پرتابه پله

شبیه‌سازی برخورد پرتابه پله به هدف فلزی در نرم‌افزار اجزاء محدود Autodyn به‌صورت سه‌بعدی انجام‌شده است. در این بخش مدل‌های رفتاری، مدل هندسی و شرایط مرزی مسئله و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد پرتابه پله تشریح می‌گردد.

۴-۱- مدل‌های مادی

رفتار مواد پوسته و هدف (شکست ترد-ترکش شدن) پس از تغییرشکل با نرخ کرنش‌های زیاد (بیش از ۱۰۰۰ بر ثانیه) که به دلیل سرعت‌های برخورد بالا رخ می‌دهد، توسط مدل مادی جانسون-کوک قابل مدل‌سازی است. این مدل برای تحلیل مواد فلزی که تحت تأثیر نرخ کرنش‌های بالا (ضربه و نفوذ و...) قرار دارند به همراه معادله حالت شوک که مکمل تعیین رفتار تنشی مدل جانسون-کوک است جزء پرکاربردترین مدل‌های مادی است. برای مغزه نیز از مدل مادی فون میسز استفاده‌شده است. در این مدل با استفاده از تنش تسلیم، مدول برشی و همچنین معادله حالت گرونایزن (مورداستفاده برای مواد نرم مثل فلزات، پلیمر و...) رفتار مغزه موردبررسی قرارگرفته است. ضرایب در جداول **۲** و **۳** ارائه‌شده است.

۴-۲- مدل هندسی و شرایط مرزی

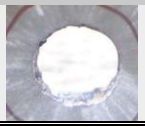
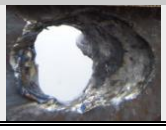
به دلیل تقارن و کاهش حجم محاسبات، هندسه پرتابه و هدف یک‌چهارم مدل شده است. نوع المان SOLID3D انتخاب‌شده و ابعاد المان در مقاطعی که تغییرشکل بالا وجود دارد کوچک‌تر از مقاطعی است که تغییرشکل‌های چندانی دیده نمی‌شود (شکل **۹**). ضخامت هدف St37 برای

تمامی سرعت‌های برخورد ۵ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است. دورتادور هدف در راستای برخورد بسته‌شده و صفحات XZ و YZ به‌عنوان صفحات تقارن دارای شرایط مرزی تقارن می‌باشند.

۴-۳- همگرایی مش

جواب‌های به‌دست‌آمده از حل مسئله به روش المان محدود همواره به سایز مش و اندازه المان‌های مورداستفاده وابسته می‌باشد. با افزایش چگالی مش (کاهش ابعاد المان‌ها و درنتیجه کاهش حجم المان) حل عددی مسئله به یک جواب واحد همگرا می‌شود. البته ریزتر شدن مش سبب افزایش توان سخت‌افزاری مورداستفاده برای حل مدل المان محدودشده و فرآیند پردازش زمان بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. درصورتی‌که با کاهش پیاپی اندازه المان‌ها، تغییرات قابل صرف‌نظر کردنی در نتایج حل حاصل گردد، اصطلاحاً "همگرایی مش" می‌گویند. المان‌هایی با شکل تقریباً مکعب مربع برای پرتابه و هدف استفاده‌شده است. طول ضلع المان از ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر تغییر کرده و نتایج آن در شکل **۱۰** آورده شده است. با توجه به نتایج اندازه المان ۰/۸ میلی‌متر علاوه بر نزدیک بودن به نتایج همسایه خود (همگرایی) برای کاهش زمان محاسبات نیز بهینه می‌باشد.

جدول (۱): فشار، سرعت برخورد و ضخامت حد بالستیک.

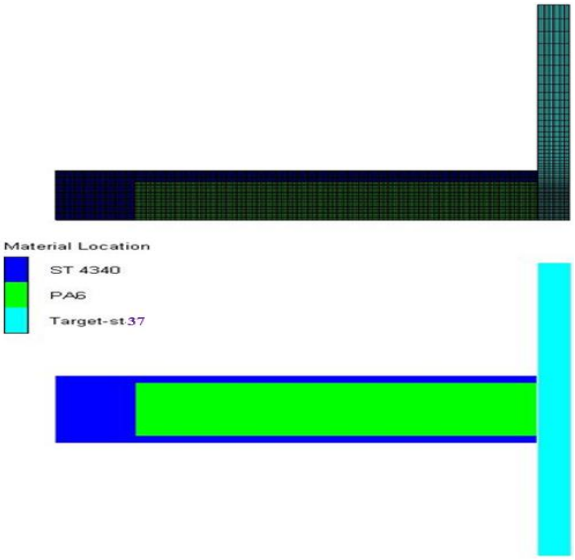
فشار (bar)	۷	۱۲/۵	۲۰/۶	۲۸	۴۳
سرعت برخورد (m/s)	۳۱۲	۴۲۰	۵۴۰	۶۳۰	۷۸۰
ضخامت حد بالستیک (mm)	۹	۱۰/۵	۱۲	۱۴	۲۰
شماتیک هدف					

جدول (۲): خواص مدل مادی و پارامترهای مواد.

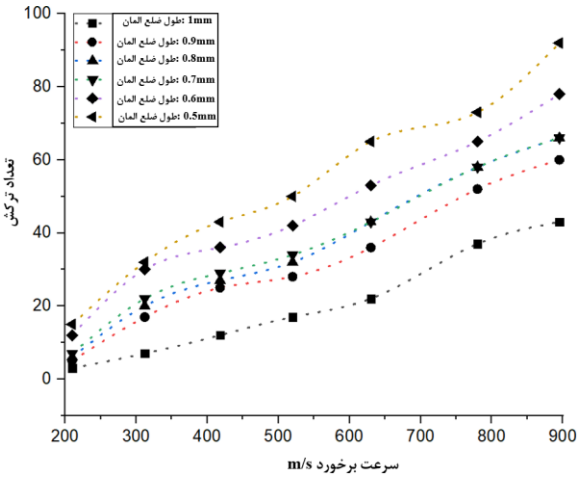
	St37	6 PT-Type	St4340
$\rho_0(^{g}/_{cm^3})$			
$C_0(^{km}/_{s})$			
S			

جدول (۳): ضرایب جانسون-کوک و فون میسز

	A(MPa)	B(MPa)	C	N	m	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
St4340								-		
St37								-		
6 PT-Type				GPa		GPa		J/kg.K		



شکل (۹): هندسه پرتابه و هدف.



شکل (۱۰): تعداد ترکش برحسب سرعت برخورد برای اندازه المان‌های ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر.

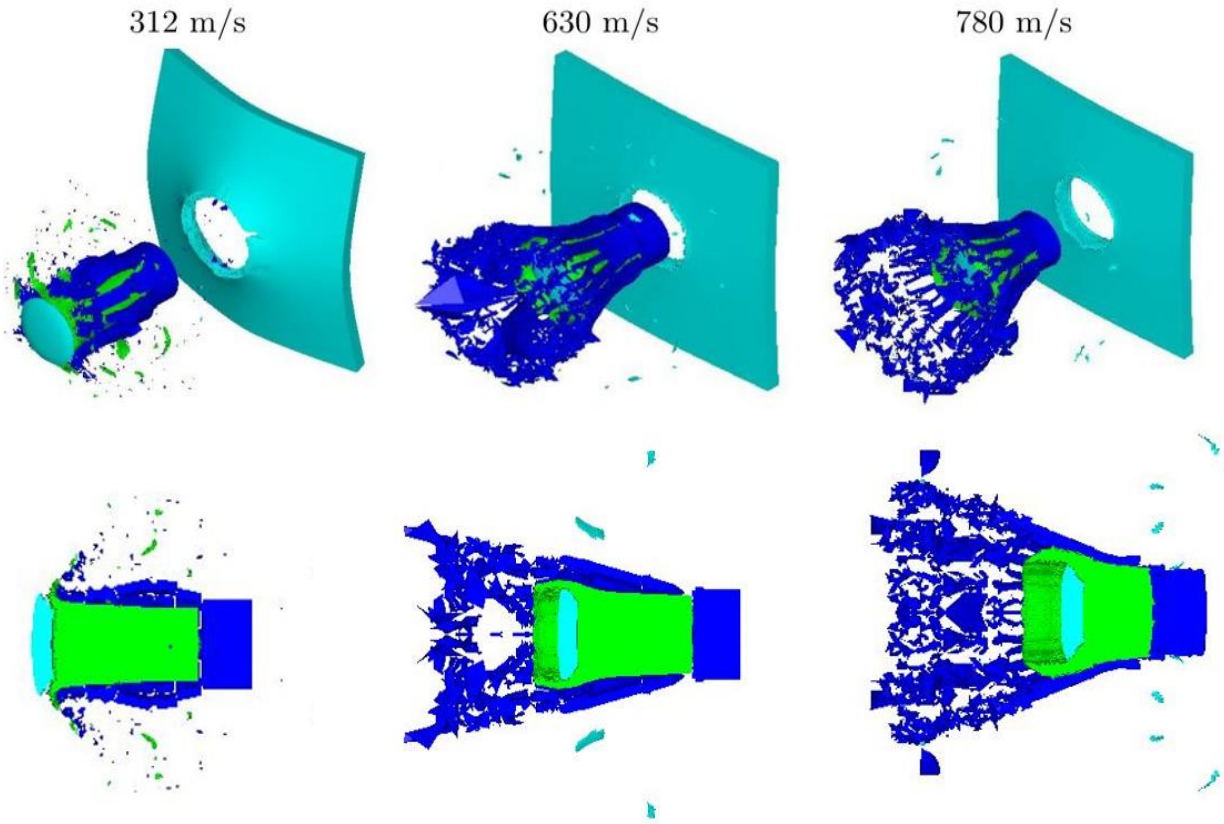
۴-۴- نتایج شبیه‌سازی عددی

اختلاف سرعت مابین پلاگ و پرتابه منجر به فشردگی مغزه شده و درنتیجه سرعت پرتابه کاهش می‌یابد. در این فرایند مشابه عملیات اکستروژن، فشار پلاگ به مغزه منجر به کاهش طول و افزایش قطر آن می‌شود. افزایش قطر منجر به ایجاد فشار شعاعی داخل پوسته و ازهم‌گسیختگی آن خواهد شد. همان‌طور که در شکل **۱۱** مشخص است در لحظه عبور از هدف به دلیل احاطه شدن پوسته توسط هدف شکست اتفاق نمی‌افتد اما پس از عبور از هدف (حذف قید احاطه‌کننده) پوسته دچار ازهم‌گسیختگی شده و تبدیل به ترکش می‌گردد.

نمونه‌هایی از نتایج شبیه‌سازی عددی عملکرد پرتابه پله با سرعت‌های برخورد ۳۱۲، ۶۳۰ و ۷۸۰ متر بر ثانیه در شکل **۱۱** نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل پوسته پس از عبور از هدف به علت فشرده شدن مغزه در اثر نیروی پلاگ جداشده از هدف دچار تنش‌های شعاعی می‌شود. این تنش‌ها پس از عبور پرتابه از هدف منجر به ازهم‌گسیختگی پوسته و ایجاد ترکش شده است. نکته قابل‌توجه افزایش تعداد ترکش‌ها با توجه به افزایش سرعت برخورد است. همچنین با این افزایش سرعت، تقعر و پارگی‌های لبه سوراخ شده در هدف کاهش می‌یابد. تغییر فرم و تحدب صفحه هدف برای سرعت‌های پایین برخورد بیشتر است، چراکه در سرعت‌های برخورد پایین رفتار صفحه کلی و در سرعت‌های بالا رفتار آن محلی است.

۵- بحث و نتایج

نتایج مدل‌های تحلیلی تحقیق حاضر با نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی در جدول **۴** مقایسه شده است. از نتایج تحلیلی تعداد ترکش و ضخامت حد بالستیک برای دو روش قابل‌استخراج است. نتایج تجربی تنها نشان‌دهنده ضخامت حد بالستیک بوده و از شبیه‌سازی نیز تعداد ترکش برای هدف St37 با ضخامت ۵ میلی‌متر با توجه به سرعت‌های متفاوت استخراج گردیده است. با توجه به جدول **۴** اختلاف نتایج تحلیلی با تجربی برای ضخامت‌های حد بالستیک نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر مدل موج شوک با نتایج تجربی به نسبت نتایج مدل انبساط دینامیکی حفره کروی می‌باشد. در بخش ترکش‌زایی نیز اختلاف نتایج حاکی از نزدیکی بیشتر نتایج مدل موج شوک (به نسبت نتایج مدل انبساط دینامیکی حفره کروی) به نتایج شبیه‌سازی است. عملکرد مناسب‌تر مدل موج شوک بیشتر به علت نحوه محاسبه سطح مقطع و در نظر گرفتن انرژی برشی لبه‌های داخلی و خارجی (قطر داخلی و خارجی) پوسته می‌باشد.



شکل (۱۱): نتایج شبیه‌سازی نفوذ و ترکش‌زایی در پشت هدف در سرعت‌های برخورد ۳۱۲، ۶۳۰ و ۷۸۰ متر بر ثانیه.

جدول (۴): مقایسه نتایج تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی.

سرعت برخورد (m/s)	ضخامت حد بالستیک و تعداد ترکش					
	تحلیل موج شوک		تحلیل انبساط دینامیکی حفره کروی		تجربی	شبیه‌سازی
	ضخامت حد بالستیک (mm)	تعداد ترکش	ضخامت حد بالستیک (mm)	تعداد ترکش	ضخامت حد بالستیک (mm)	تعداد ترکش
۳۱۲	۱۰/۶	۲۰	۱۶/۲	۲۶	۹	۲۰
۴۲۰	۱۴/۴	۳۰	۱۹/۲	۲۷	۱۰/۵	۲۷
۵۴۰	۱۸/۶	۴۱	۲۶/۵	۴۲	۱۲	۳۶
۶۳۰	۲۱/۸	۴۵	۳۰/۶	۵۷	۱۴	۴۳
۷۸۰	۲۷/۲	۶۲	۴۰/۵	۸۳	۲۰	۵۸

نتایج جدول **۴** به‌صورت نمودارهای شکل **۱۲** و **۱۳** نشان داده‌شده است که از آن نزدیکی بیشتر مدل موج شوک با نتایج تجربی مشاهده می‌گردد؛ بنابراین نتایج این روش (سرعت باقیمانده و ضخامت حد بالستیک) جهت محاسبه تعداد ترکش‌ها و نواحی ترکش‌زایی مناسب‌تر از روش انبساط دینامیکی حفره کروی می‌باشد. در تحلیل نفوذ و ترکش‌زایی پرتابه پله دو ناحیه مرزی با توجه به هندسه، وزن، سرعت برخورد و همچنین ضخامت و جنس هدف ایجاد می‌شود، این دو ناحیه عبارت‌اند از:

۱) ناحیه ترکش‌زایی پایین: حداکثر تعداد ترکش‌ها در پشت هدف ۱۰ عدد با متوسط وزنی ۱ الی ۲ گرم

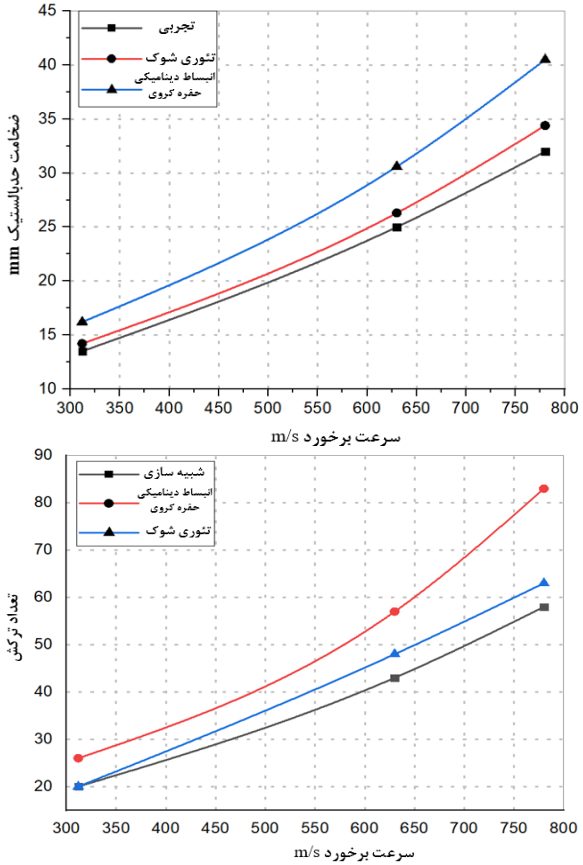
۲) ناحیه ترکش‌زایی بالا: حداقل تعداد ترکش‌ها در پشت هدف ۱۰ عدد با متوسط وزنی ۱ الی ۲ گرم

با استفاده از روش تحلیل موج شوک (روش تحلیلی منتخب) نواحی ترکش‌زایی پایین و بالا با توجه به تعریف، برای نمودارهای ضخامت حد بالستیک برحسب سرعت برخورد استخراج گردیده است. برای دامنه سرعت برخورد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه و هدف از جنس St37 میزان ترکش‌زایی در دو ناحیه به ترتیب زیر ارائه گردیده است:

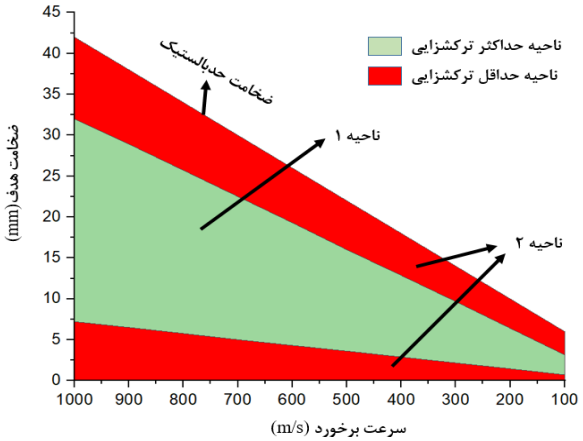
۱) ناحیه قرمز: با کاهش ضخامت هدف نیروی پلاگ به پرتابه کاهش‌یافته و درنتیجه فشار شعاعی وارد بر پوسته از طرف مغزه کاهش می‌یابد، به‌این‌ترتیب قابلیت ترکش‌زایی کمتر خواهد شد. همچنین با افزایش ضخامت هدف در محدوده ضخامت حد بالستیک یا بیشتر از آن، پرتابه قبل از عبور از هدف در داخل یا روی هدف متلاشی‌شده و درنتیجه تعداد ترکش در پشت هدف کاهشی یا بدون ترکش خواهد بود.

۲) ناحیه سبز: میزان سرعت برخورد و ضخامت هدف در ناحیه‌ای بهینه برای ایجاد حداکثر ترکش در پشت هدف قرار دارد.

پرتابه پله درصدی از عملکرد تمامی پرتابه‌های مشابه و هم‌خانواده (هم کالیبر و وزن مشابه) خود را دارد. به‌عبارت‌دیگر این نوع پرتابه همانند پرتابه ثاقب قابلیت نفوذ دارد (ولی کمتر از پرتابه ثاقب) و مانند پرتابه انفجاری قابلیت ترکش‌زایی دارد (ولی کمتر از پرتابه انفجاری). برتری اصلی این پرتابه انتقال ترکش‌ها به پشت هدف است که هیچ یک از پرتابه‌های مشابه قابلیت انجام آن را ندارند. ضخامت حد بالستیک برای سرعت برخورد ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برابر ۴۲ میلی‌متر است. در این سرعت، ترکش‌زایی بالا در محدوده ضخامت‌های هدف ۷/۲ تا ۳۲ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. همچنین ضخامت حد بالستیک برای سرعت برخورد ۱۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶ میلی‌متر می‌باشد. در این سرعت برخورد، ترکش‌زایی بالا در محدوده ضخامت‌های هدف ۰/۷ تا ۳/۱۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج، کاربرد پرتابه پله بسته به ابعاد پرتابه بیشتر برای سرعت‌های برخورد متوسط و بالا (بیش از ۳۰۰ متر بر ثانیه) است.



شکل (۱۲): ضخامت حد بالستیک و تعداد ترکش (ضخامت هدف ۵ میلی‌متر St37) برحسب سرعت برخورد.



شکل (۱۳): ناحیه‌های عبور پرتابه مرکب از هدف.

۶- نتیجه‌گیری

بررسی ضخامت حد بالستیک هدف فلزی St37 و ترکش‌زایی در مواجه با پرتابه پله به‌صورت تحلیلی،

شبیه‌سازی و تجربی انجام‌شده و نتایج حاصل به شرح زیر است:

۱) با استفاده از دو مدل تحلیلی عملکرد پرتابه پله موردبررسی قرار گرفت که با توجه به نتایج، مدل تحلیلی تئوری موج شوک انطباق مناسب‌تری در مقایسه با مدل انبساط دینامیکی حفره کروی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی دارد.

۲) مدل تحلیلی با استفاده از تئوری موج شوک و برآیند انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و برشی، سرعت باقیمانده و به‌تبع آن ضخامت حد بالستیک هدف فلزی و تعداد ترکش در پشت هدف را تعیین می‌نماید.

۳) با توجه به نتایج به‌دست‌آمده محدوده عملکرد مناسب پرتابه پله دامنه متوسطی از سرعت‌های برخورد و همچنین ضخامت‌های هدف می‌باشد، به‌گونه‌ای که این محدوده کمتر از ضخامت‌های حد بالستیک و بالاتر از ضخامت‌های حداقلی قابل‌عبور از هدف است.

۷- مراجع

[1] Paulus G, Schirm V. Impact behaviour of PELE projectiles perforating thin target plates. International Journal of Impact Engineering. 2006;33(1-12):566-79. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.026.

[2] Kesberg G, Schirm V, Kerk S, editors. PELE: The future ammunition concept. Proceedings of the 21st International Symposium on Ballistics (ISB'21), Adelaide, Australia; 2004.

[3] Bakhtiari A, Sheikhi MM, Arab NBM, Khodarahmi H. Studying the ballistic performance of a metal target under combined KE projectile impact. Physica Scripta. 2023;98(9):095207. **DOI** https://doi.org/10.1088/1402-4896/ace8cb.

[4] Zhang HC, Yin JP, Wang ZJ. Influence of Jacket and Filling Materials Characteristics on PELE Effects. Applied Mechanics and Materials. 2012;217:358-61. **DOI** https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.358.

[5] Zhu JS, Fan Z, Gao B. Influences of material parameters on terminal effect of PELE with tungsten fiber composite jacket. Advanced Materials Research. 2014;936:1927-32. **DOI** https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.936.1927.

[6] Zhou J, Ran X, Tang W, Zhang K, Wang H, Chen P, Ding L. Research on the Penetration Characteristics of PELE Projectile with Reactive Inner Core. Polymers. 2023;15(3):617. **DOI** https://doi.org/10.3390/polym15030617.

[7] Qi Y, Jiang C, Wang Z, Hu R, Xu W, Mao L, editors. Numerical study on damage effects of segmented reactive-core penetrator impacting double-layer steel targets. Journal of Physics: Conference Series; 2023: IOP Publishing. **DOI** https://doi.org/10.1088/1742-6596/2478/6/062034.

[8] Jianping Y, Yakun L, Zhijun W, Xuepeng Z, Jianzhong Z, Yana Z. Formation and penetration of PELE/EFP multi-mode warhead based on double-layer shaped charge. Journal of Energetic Materials. 2023;41(1):4-26. **DOI** https://doi.org/10.1080/07370652.2021.1902615.

[9] Zhang J, Wang H, Zheng Y, Chen P, Ge C, Yu Q. Lateral enhancement effect of reactive PELE: Two-step segmented simulation and analytical modeling. Thin-Walled Structures. 2023;192:111204. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111204.

[10] Guo Z. Rate-Dependent Dynamic Cylindrical Cavity Expansion Equations for Conical-and Ogival-Nosed Projectiles. Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2022;8(4):437-42. **DOI** https://doi.org/10.1007/s40870-022-00349-4.

[11] Forrestal MJ, Warren TL. Penetration equations for ogive-nose rods into aluminum targets. International Journal of Impact Engineering. 2008;35(8):727-30. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.11.002.

[12] Afdhal A, Gunawan L, Santosa SP, Putra IS, Huh H. Measurement of mechanical properties of St 37 material at high strain rates using a split Hopkinson pressure bar. Applied Mechanics and Materials. 2014;660:562-6. **DOI** https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.660.562.

[13] Bacon JB, Allen AR, Ferrer JM, Opiela JN, Ward MA, editors. X-ray Imagery as the Record of All Data of Interest in Hypervelocity Impact Fragment Studies. 8th European Conference on Space Debris; 2021.

[14] Fan Z, Ran X, Tang W, Ke Y, Li Z. The model to calculate the radial velocities of fragments after PELE

penetrator perforating a thin plate. International Journal of Impact Engineering. 2016;95:12-6. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.04.011.

[15] Ding L, Zhou J, Tang W, Ran X, Cheng Y. Damage characteristics of PELE projectile with gradient density inner core material. Materials. 2018;11(12):2389. **DOI** https://doi.org/10.3390/ma11122389.

[16] Lei MA, Wang Hf, Yu Qb, Zheng Yf. Fragmentation behavior of large-caliber PELE impacting RHA plate at low velocity. Defence Technology. 2019;15(6):912-22. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.004.