



## بررسی عددی، تجربی و تحلیلی عمق نفوذ پرتابه تغییرشکل ناپذیر سرتخت در اهداف فولادی

محمد فرحمند<sup>۱</sup>، خداداد واحدی<sup>۲\*</sup>، علیرضا نداف اسکویی<sup>۳</sup> و روح... حسینی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران،

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی، عددی و تحلیلی برخورد پرتابه سرتخت تغییرشکل ناپذیر به اهداف فولادی پرداخته شده است. بدین منظور در بخش اول به تست‌های تجربی جهت یافتن عمق نفوذ پرتابه پرداخته شده است. پرتابه‌ها در این آزمایش به صورت استوانه‌ای با قطر ۱۰ و طول ۲۰ میلی-متر از جنس فولاد AISI 52100 و صفحات فولادی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۲۰ از جنس AISI 1045 انتخاب شده‌اند. در بخش دوم به شبیه‌سازی عددی مدل برخورد در نرم‌افزار آباکوس پرداخته و با توجه به میزان خطای ۸ درصدی نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تجربی، صحت مدل عددی به اثبات رسیده است. در بخش سوم به ارائه مدل تحلیلی برگرفته از مدل تحلیلی چن پرداخته و عمق نفوذ پرتابه را به دست آورده و در انتها مقایسه‌ای بین نتایج تجربی، عددی و تحلیلی انجام گرفته است. نتایج به دست آمده در سه حالت حل (تجربی، عددی و تحلیلی) دارای تطابق قابل قبولی می‌باشند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۰ مهر ۱۳۹۸

پذیرش: ۱۵ بهمن ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۹

### کلیدواژگان

هدف

پرتابه

حد بالستیک

ضربه

عمق نفوذ.

## Numerical, Experimental and Analytical Investigation of Penetration Depth of a rigid blunt projectile on the steel targets

Mohammad Farahmand<sup>1</sup>, Khodadad Vahedi<sup>2\*</sup>, Alireza Naddaf Oskouei<sup>3</sup> & Roholah Hoseini<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate, Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

2- Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

3- Associate Professor., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

4- Assistant Professor., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

### Article Information

Original Research Paper

Received 2 October 2019

Accepted 4 February 2020

Available Online 29 April

2020

### Keywords

Target

Projectile

ballistic limit

Impact

The Penetration Depth.

### ABSTRACT

In this paper, the experimental, numerical, and analytical investigation of a blunt rigid projectile to the steel targets is discussed. Therefore, in the first part, the experimental tests are carried out to find the depth of penetration and the projectiles are cylindrical in diameter 10 mm and 20 mm in length with AISI 52100 and steel plates with dimensions of 120 × 100 × 10 are selected from AISI 1045. In the second part, the numerical simulation of the impact model in the Abacus software is carried out and the accuracy of the numerical model is verified with 8% error rate of the numerical solution with the experimental results. In the third section, presents an analytical model derived from the Chen analytical model and obtain the depth of projectile penetration. Finally, a comparison between experimental, numerical and analytical results is performed, the results obtained in three solutions (experimental, Numerical and analytical) have acceptable agreement.

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohammad Farahmand, Khodadad Vahedi, Alireza Naddaf Oskouei & Roholah Hoseini, Numerical, Experimental and Analytical Investigation of Penetration Depth of a rigid blunt projectile on the steel targets, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 1, pp. 18-27, 2019-2020 (In Persian)

## ۱- مقدمه

بشر در طول تاریخ حیات خویش، همواره به دنبال پیدا کردن راهی برای حفاظت از خود در برابر ضربات دشمن بوده است، از همین رو تولید زره از مواد مختلف، نشانگر اهمیت ساخت زره در ادوار مختلف است که نمونه‌های آن‌ها را می‌توان در سرتاسر تاریخ مشاهده نمود.

وودوارد<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۱ به برخورد پرتابه با اهداف چندلایه‌ی هم‌جنس توسط پرداخت و به این نتیجه رسید که با به‌کارگیری اهداف چندلایه، حدود بالستیکی بالاتری قابل‌دسترسی است. دلیل این امر آن است که در اهداف یک‌لایه، بیشتر انرژی صرف شتاب‌دهی و برش پلاگ می‌شود اما در اهداف چندلایه خم‌شدگی و کشش نسبی لایه‌ها (مخصوصاً لایه‌هایی که عقب‌تر قرار گرفته‌اند)، انرژی قابل‌توجهی را از گلوله جذب می‌کنند [۱].

گوپتا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۲ با بررسی تجربی به این نتیجه رسید که با افزایش ضخامت هدف قطر سوراخ در صفحه جلویی هدف افزایش می‌یابد ولی در مقابل برای صفحه پشتی قطر سوراخ کمتر می‌شود و نزدیک به قطر پرتابه می‌گردد، و همچنین با افزایش ضخامت هدف کماتش در زاویه کمتر اتفاق می‌افتد [۲].

سیدنی چاکرون<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۱ به بررسی تجربی، عددی و تحلیلی برای شکست هسته گلوله پرداخت، مطالعه عددی پرتابه کلی (هسته، دماغه، روکش) نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که برای شکستن پرتابه احتیاج به تماس هسته پرتابه با لبه‌ی صفحه می‌باشد و تنها تماس روکش با صفحه و خراشیدگی برای شکستن پرتابه مناسب نمی‌باشد. برای ضخامت‌های یکسان هدف، صفحه فولادی از صفحه آلومینیومی در شکستن پرتابه مؤثرتر عمل می‌کند [۳].

زاکوس<sup>۴</sup> و شفلر<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۱ نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای عددی در برخورد پرتابه‌ها به اهداف یک یا چندلایه را بررسی کردند، در این تحقیق از روش لاگرانژی و همچنین از روش اوپلری استفاده گردید و به این نتیجه رسیدند

که روش لاگرانژی مطابقت بیشتری با نتایج تجربی و تحلیلی دارد [۴].

رگورامن<sup>۶</sup> و گوپتا در سال ۲۰۰۸ به مدل کردن پرتابه با دماغه اجایو و دارای غلاف تحت برخورد مایل با صفحه فولادی نرم پرداختند. در این مدل علاوه بر پیش‌بینی سرعت باقی‌مانده می‌توان مدهای شکست مختلف از جمله دیشینگ، فرسایش مس پرتابه و کمترین زاویه کماتش برای صفحات با ضخامت مختلف را نیز به دست آورد [۶].

در سال ۲۰۰۸ تنگ<sup>۷</sup>، به این نتیجه دست‌یافت که در سرعت‌های پایین، اهداف ۲ لایه فولادی که صفحه بالایی با نرمی بالا و استحکام کمتر و صفحه دومی برعکس آن باشد بهترین کارایی را در مقایسه با یک صفحه یک‌لایه از یک جنس و یا ۲ صفحه با چیدمان برعکس به دست می‌دهد، ولی در سرعت‌های بالاتر نفوذ به استحکام هدف و شکل پرتابه بستگی دارد [۷].

آن‌ها در مقاله‌ای دیگر نشان دادند که اهداف ۲ لایه در تماس از یک جنس مقاومت به نفوذ را ۷ تا ۲۵ درصد نسبت به تک لایه از همان جنس و وزنی معادل افزایش می‌دهد [۸].

لیاقت و فعلی در سال ۲۰۰۸ به مدل‌سازی تغییر شکل پرتابه‌های تخت حین نفوذ عمودی به هدف صلب پرداخت، اساس مدل تحلیلی که در این مقاله ارائه شده است بر پایداری انرژی در پیشانی موج تنش پلاستیک در پرتابه و پلاگ حین فرآیند برخورد و نفوذ استوار است [۹].

و در ادامه مدل‌سازی پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر در سال ۲۰۱۰ به تحلیل فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر تحت در اهداف فلزی چندگانه پرداختند، در این مقاله با فرض حفره‌ای شدن هدف فرآیند آغاز و پس از تماس کامل دماغه پرتابه با هدف مرحله شکل‌گیری پلاگ شروع می‌شود، معادلات حاکم در این مدل تحلیلی بر اساس روش بقا اندازه حرکت خطی و با استفاده از انتشار امواج پلاستیک در پرتابه و پلاگ استخراج شده است، و به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقاومت نسبت به

<sup>۱</sup>Woodward

<sup>۲</sup>GUPTA

<sup>۳</sup>Sidney Chocron

<sup>۴</sup>Zukas

<sup>۵</sup>Scheffler

<sup>۶</sup>Raguraman

<sup>۷</sup>Teng

نفوذ در اهداف چندلایه وقتی به دست می‌آید که چیدمان لایه‌ها از ضخامت بیشتر به ضخامت کمتر در مقابل ضربه باشد [۱۰].

در تحقیقی دیگر روزنبرگ<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۹ به بررسی مکانیزم شکستن پرتابه توسط شبیه‌سازی و تست تجربی پرداخت و به این نتیجه رسید که یک صفحه با استحکام بالا و به‌صورت مایل می‌تواند باعث شکستن پرتابه گردد [۱۱].

لیاقت و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک پرداختند و یک مدل تحلیلی برای آن پیشنهاد کردند، در این تحقیق شکست از نوع پتالینگ نامتقارن فرض شده و آنالیز با استفاده از موازنه انرژی بین انرژی اولیه و کار انجام‌شده صورت می‌پذیرد.

در این مقاله با تخمین انرژی جذب‌شده در طی فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک، سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده محاسبه‌شده است و در سرعت‌های بالا همخوانی مشاهده گردید [۱۲].

در تحقیقی دیگر به تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی شاخک‌دار اهداف فلزی نازک پرداخت و در مورد اثر شاخک‌ها در فرآیند نفوذ بحث کرده است، و به این نتیجه رسید که باوجود مزیت استفاده از شاخک جهت به تعویق انداختن کمانش، مقدار اتلاف انرژی در طی نفوذ آن بسیار ناچیز است [۱۳].

لیاقت در سال ۲۰۱۱ به بررسی اثر تغییر شکل‌پذیری پرتابه دارای چرخش غیرمحوری که در اهداف آلومینیومی انجام‌گرفته است با استفاده از مدل لی گلداسمیت مورد مطالعه پرداخت.

در مدل جدید با لحاظ نیروی اصطکاک و تغییر فرم‌پذیری پرتابه با استفاده از مدل ونکسیو پاره‌ای از فرضیات حاکم بر مدل لی اصلاح‌شده است و سپس با نتایج تجربی دیگران مقایسه شده است و پیش‌بینی قابل قبولی از سرعت پلاگ خروجی و سرعت نهایی پرتابه و نیز ارتباط میان میزان افت سرعت با زاویه برخورد و سرعت اولیه پرتابه به‌دست‌آمده است [۱۴].

اقبال و سنتیل<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۷ به شبیه‌سازی برخورد مایل با نرم‌افزار آباکوس پرداختند، و با نتایج تجربی گلداسمیت ۱۹۸۶ مقایسه گردیده است، شکل‌گیری پتال، افت سرعت و تغییر فرم

هدف در مقابل پرتابه که در مدل‌سازی پیش‌بینی‌شده است با نتایج تجربی گلداسمیت همخوانی دارد.

در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که مقاومت هدف به‌صورت خطی با افزایش زاویه افزایش می‌یابد و همچنین تغییر شکل کلی هدف با افزایش زاویه، افزایش پیدا می‌کند [۱۵].

اقبال<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر میزان انحراف از حد نرمال (میزان مایل بودن)، بر حد بالستیک برای صفحات تک لایه و چندلایه فولادی تحت برخورد با گلوله پرداختند، حل عددی توسط نرم‌افزار آباکوس انجام‌گرفته و سپس با نتایج آزمایشگاهی قبلی دیگر محققین مقایسه گردیده است و مدل تأییدشده است.

در برخورد مایل صفحه یک‌لایه حد بالستیک بیشتری نسبت به صفحه چندلایه چسبیده و در آخر صفحه چندلایه بافاصله قرار دارد و دلیل این امر اختلاف ۳ حالت تغییر مسیر گلوله طی نفوذ می‌باشد، پرتابه در زمان نفوذ در هر ۳ پیکربندی از محور مرکزی منحرف می‌شود و این انحراف در تک لایه بیشتری است و به ترتیب در چندلایه و چندلایه بافاصله کمتر می‌شود [۱۶].

با توجه به مقدمه ذکر شده به منظور بررسی کامل پرتابه صلب در این مقاله به بررسی تجربی، عددی و تحلیلی برخورد پرتابه سرتخت تغییرشکل ناپذیر به اهداف فولادی پرداخته شده است. بدین منظور در بخش‌های بعدی به شرح آماده‌سازی شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی و حل تحلیلی می‌پردازیم و در ادامه به مقایسه بین نتایج می‌پردازیم.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی فرآیند

در این قسمت به آماده‌سازی قطعات، وسایل مورد استفاده و حالت‌های متفاوت تست شده در این تحقیق می‌پردازیم.

### صفحه هدف (آماده‌سازی نمونه)

اهداف طراحی‌شده در این آزمایش با ابعاد ۱۲۰×۱۰۰×۱۰ میلی‌متر و از جنس فولاد AISI 1045 می‌باشند.

<sup>۱</sup>Iqbal

<sup>۲</sup>Rosenberg

<sup>۳</sup>Senthil

### طراحی پرتابه

پرتابه استفاده شده در این آزمایش رولربیرینگ استوانه‌ای با قطر ۱۰ و طول ۲۰ میلی‌متر، از جنس فولاد AISI 52100 می‌باشد.



شکل ۳- الف) سابوت ساخته شده (ب) نحوه قرار گرفتن پرتابه در سابوت

### تجهیزات مورد استفاده (دستگاه و گیره‌ها)

برای آن که بتوان از حرکت صفحه پس از برخورد پرتابه جلوگیری کرد، اهداف فولادی همانند شکل زیر به وسیله نگهدارنده (فیکسچر) ثابت گردیده است.



شکل ۱- پرتابه استفاده شده در این آزمایش

جرم پرتابه مورد استفاده در این آزمایش ۱۲ گرم می‌باشد.



شکل ۴- نگهدارنده مورد استفاده در این آزمایش برای شلیک پرتابه از تفنگ گازی استفاده شده است، تفنگ گازی استفاده شده مستقر در آزمایشگاه ضربه به صورت ذیل می‌باشد



شکل ۲- جرم پرتابه مورد استفاده در این آزمایش

### طراحی سابوت

با توجه به آنکه کالیبر تفنگ گازی مستقر در آزمایشگاه دانشگاه امام حسین ۱۶ میلی‌متر می‌باشد و قطر پرتابه در تست‌های تجربی ۱۰ میلی‌متر بوده، بدین منظور از سابوت استفاده شده است.

برای ساخت سابوت از میله پلیمری به قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده، بدین منظور میله به قطعات ۲۰ میلی‌متری تقسیم گردیده و سپس به صورتی تراشکاری شده که قطر داخلی آن‌ها ۱۰ میلی‌متر و قطر خارجی آن‌ها ۱۵٫۹ میلی‌متر گردد.



شکل ۵- تفنگ گازی استفاده شده مستقر در آزمایشگاه

وون میسر را به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دمای ماده بر اساس رابطه‌ی زیر تشریح می‌کند.

$$\sigma_y(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p, T) = (A + B(\epsilon_p)^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)) (1 - T^{*m}) \quad 1$$

که در رابطه‌ی فوق  $A, B, C, n$  و  $m$  خواص ثابت ماده،  $\dot{\epsilon}_p$  نرخ کرنش پلاستیک معادل،  $\epsilon_p^*$  نرخ کرنش پلاستیک بی‌بعد شده می‌باشد.  $T^*$  دمای همگن نرمالایز شده می‌باشد.

و داریم

$$\dot{\epsilon}_p^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \quad 2$$

$$T^* = \frac{T - T_{\text{initial}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{initial}}} \quad 3$$

در این مدل فرض بر این است که تمام کار در ناحیه‌ی پلاستیک تبدیل به گرما شده و بنابراین دما افزایش می‌یابد.

عبارت موجود در پرانتز اول رابطه‌ی تنش را با کرنش، پرانتز دوم، رابطه‌ی تنش با نرخ کرنش و عبارت آخر رابطه‌ی تنش را با دما نشان می‌دهند. همچنین می‌توان گفت که پرانتزها به ترتیب بیانگر ترم‌های استاتیکی، دینامیکی و حرارتی می‌باشند. و ثوابت تنش از روش‌های زیر به دست می‌آیند:

- ✓  $A$  برابر با تنش تسلیم شبه‌استاتیکی
- ✓  $n$  مقدار شیب منحنی تسلیم  $\sigma - \sigma_{\text{تسلیم}}$
- برحسب کرنش پلاستیک
- ✓  $B$  مقدار تسلیم  $\sigma - \sigma_{\text{تسلیم}}$  در کرنش پلاستیک برابر با یک
- ✓  $C$  شیب منحنی تنش برحسب نرخ کرنش متغیر در دمای اتاق

### سرعت آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش‌های انجام‌شده برای اندازه‌گیری عمق نفوذ پرتابه درون اهداف فلزی با سرعت متوسط ۲۲۰ متر بر ثانیه انجام گرفته‌است.

### ۳- مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند

پرتابه و صفحه هدف به صورت ۳ بعدی و تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند و با توجه به تعریف انرژی شکست، زمانی که انرژی دریافت شده توسط المان به میزان انرژی تعریف‌شده برسد آن المان حذف خواهد گردید.

با توجه به این که سرعت اولیه گلوله بالا می‌باشد، باید رفتار ماده را وابسته به نرخ کرنش در نظر گرفت.

انرژی اولیه گلوله پس از برخورد به صفحه فولادی صرف تغییر شکل و آزاد شدن گرما می‌شود، لذا دمای منطقه برخورد به صورت موضعی افزایش یافته و سبب نرم شدن موضعی فلز در منطقه برخورد می‌شود.

بنابراین رفتار مکانیکی صفحه‌ی فولادی به دما نیز وابسته است. به همین دلیل از معادله جانسون کوک برای مدل کردن رفتار پلاستیک صفحه فولادی استفاده می‌کنیم.

### مدل مادی جانسون کوک

مدل تنش جریانی جانسون کوک یک مدل ویسکو-پلاستیک برای مواد نرم می‌باشد. بر اساس این مدل، کرنش سخت‌شوندگی، نرخ کرنش سخت‌شوندگی و تأثیرات نرم‌شوندگی گرمایی بر تنش ماده جاری اثر گذرا دارد.

این مدل تغییر شکل ریزساختار و رویه‌ی شکست را برحسب میانگین پارامترهای پیوسته که بر روی یک حجم محدود اثر می‌کند مورد بررسی قرار می‌دهد. در واقع این مدل مادی، پدیده‌ی سخت‌شوندگی همگن را مورد توجه قرار داده و جریان تنش معادل

تماس بین پرتابه و صفحه به صورت تماس عمومی و نوع تماس به صورت رفتار مماسی<sup>۱</sup> با ضریب اصطکاک ۰,۰۲ و رفتار نرمال<sup>۲</sup> می باشد.

#### مشخصات جنس هدف

خواص صفحات فولادی AISI 1045 با ابعاد ۱۰×۲۰ میلیمتر استفاده شده در این سری تست ها به شرح ذیل می باشد:

جدول ۱- خواص صفحات فولادی AISI 1045 [۱۷]

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| ظرفیت گرمایی ویژه<br>Watt/kg.K | ۴۸۶  |
| ضریب انبساط خطی (۱۰-6)         | ۱۱,۲ |
| ضریب هدایت حرارتی<br>Watt/m.K  | ۵۱,۹ |
| چگالی<br>Kg/m <sup>3</sup>     | ۷۸۷۰ |
| نسبت پواسن                     | ۰,۲۹ |
| مدول الاستیسیته<br>GPa         | ۲۰۰  |

برای شبیه سازی از ثوابت جانسون کوک به شرح ذیل استفاده گردیده است:

جدول ۲- ثوابت جانسون کوک AISI 1045 [۱۷]

| ثابت های معادله جانسون کوک | AISI 1045 |
|----------------------------|-----------|
| A (MPa)                    | 553       |
| B (MPa)                    | 600       |
| N                          | 0.234     |
| C                          | 0.0134    |
| M                          | 1         |
| Tmelt (oC)                 | 1460      |
| ε <sub>o</sub>             | 0.001     |

#### المان بندی صفحه هدف

برای بدست آوردن جواب های دقیق تر اطراف محل برخورد پرتابه به صفحه هدف، مربعی با اضلاع ۶۰

✓  $m = \log\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{room}}\right)$  که در این رابطه  $\sigma_{room}$  تنش معین در دمای اتاق می باشد.

در این مدل مادی، کرنش شکست به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$\epsilon^f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*)(1 + D_4 \epsilon^*)(1 + D_5 T^*) \quad 4$$

که ثوابت  $D_1, D_2, D_3$  و  $D_4$  به تنش وابسته اند در حالی که ثابت  $D_5$  به نرخ کرنش سخت شونده گی و ثابت  $D_5$  به دمای نرم شونده گی بستگی دارد.

$\sigma^*$  از تقسیم فشار بر تنش مؤثر حاصل می گردد.

بر مبنای این مدل، طی کرنش پلاستیک، آسیب ها در ماده انباشته می شود و به محض رسیدن مجموع این مقادیر به یک حد بحرانی، شکست رخ می دهد شکست زمانی رخ می دهد که ضریب تخریب  $D$  برابر یک شود.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^{-P}}{\epsilon^f} \quad 5$$

#### شرایط شبیه سازی در محیط نرم افزار آباکوس

#### شرایط مرزی و اولیه

در تمامی شبیه سازی ها شرایط مرزی به گونه ای تعریف می شود که لبه های جانبی هدف، در هر شش درجه ی آزادی مقید شده و برای حرکت پرتابه محدودیت حرکت در راستاهای  $y$  وجود ندارد و در بقیه درجات مقید گشته است.

<sup>1</sup> tangential behavior

<sup>2</sup> normal behavior

می‌باشد میتوان عمق نفوذ پرتابه در هدف را در برخورد قائم محاسبه نمود [۱۸].

معادلات حرکت در برخورد به صورت زیر تعریف میشوند:

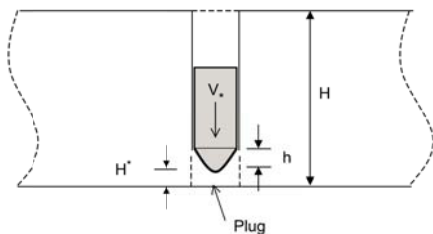
$$M \frac{dV}{dt} = -F_x \quad 6$$

$$V = \frac{dX}{dt} \quad 7$$

$$F_x = \frac{\pi d^2}{4} (AN_1 \sigma_y + BN_2 \rho V^2) \quad 8$$

که در آن  $F_x$  نیروی اولیه وارد بر پرتابه است  $A, B$  ثابتهای تجربی هستند که به جنس ماده هدف بستگی دارند و  $N_1, N_2$  ضرایب شکل دماغه پرتابه‌اند.

$\sigma_y$  و  $\rho$  به ترتیب تنش تسلیم دینامیکی و چگالی ماده هدف می‌باشند.



شکل ۸- نفوذ پرتابه در هدف ضخیم و تشکیل پلاگ

$$\frac{X}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln(1 + \frac{I}{N}) \quad 9$$

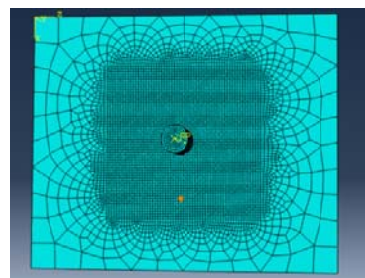
که در آن  $I, N$  کمیت‌های بدون بعد به عنوان تابع برخورد و تابع هندسی به صورت زیر تعریف میشوند:

میلی‌متر جدا کرده و با مش‌های ریزتر المان‌بندی شده است.

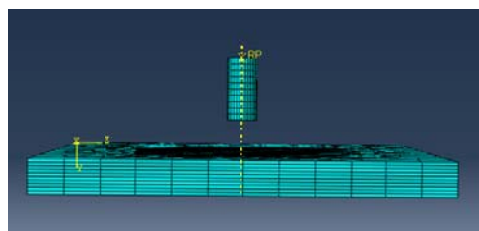
بدین ترتیب که مربع اضلاع مربع انتخابی با اندازه ۱ میلی‌متر المان‌بندی گشته (اضلاع به ۶۰ قسمت تقسیم شده‌اند) و قسمت‌های دیگر صفحه با اندازه مش ۱۰ میلی‌متر المان‌بندی شده است.

### المان‌بندی پرتابه

مش انتخابی جهت پرتابه به صورتی می‌باشد که المان‌های سطح مقطع دایروی پرتابه با ابعاد ۱ میلی‌متر و در راستای طول پرتابه مش با ابعاد ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- المان بندی صفحه بدون سوراخ و پرتابه از نمای بالا



شکل ۷- المان بندی صفحه بدون سوراخ و پرتابه از نمای بغل

### ۴- مدل تحلیلی

حال با بهره‌گیری از معادلات حرکت ارائه شده در مقاله چن سال ۲۰۰۳ و با در نظر گرفتن این نکته که ضرایب  $N_1$  و  $N_2$  در این مقاله برای پرتابه تخت یک



شکل ۹- برخورد پرتابه با صفحه فولادی

میزان عمق نفوذ پرتابه در صفحه هدف : ۱,۲ میلی‌متر

### نتایج عددی

در شبیه‌سازی با استفاده از آیکون Query و انتخاب گزینه فاصله از منو باز شده، با انتخاب دو نقطه در قسمت نتایج شبیه‌سازی می‌توان اختلاف ارتفاع در ۲ نقطه را مشاهده نمود، بدین ترتیب می‌توان با انتخاب نقطه‌ای دور از محل برخورد و یا انتخاب نقطه‌ای که در سطوح ثابت شده در شرایط مرزی هستند به‌عنوان نقطه اول و انتخاب نقطه دیگر که دنبال میزان نفوذ پرتابه در آن نقطه می‌باشیم میزان دقیق عمق نفوذ را بدست آوریم.

از جمله راه‌حل‌های دیگر جهت محاسبه عمق نفوذ پرتابه انتخاب نقطه‌ای از پرتابه (برای مثال مرکز سطح دایروی پرتابه) جابه‌جایی پرتابه را مشاهده نمود.

با توجه به توضیحات داده شده در بالا به دو طریق به محاسبه عمق نفوذ می‌پردازیم:

$$I = \frac{\lambda \Phi_I}{AN_1} = \frac{\lambda \Phi_I}{A} \quad 10$$

$$N = \frac{\lambda}{BN_2} = \frac{\lambda}{B} \quad 11$$

$\Phi_I$  عدد تخریب جانسون و  $\lambda$  جرم بی‌بعد شده پرتابه به شکل زیر تعریف میشوند:

$$\Phi_I = \frac{\rho V_i^2}{\sigma_y} \quad 12$$

$$\lambda = \frac{M}{\rho d^3} \quad 13$$

برای ماده تراکم‌ناپذیر الاستیک-پلاستیک کامل خواهیم داشت (ضرایب A, B):

$$A = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{E}{3(1-\gamma)\sigma_y} \right] \right\} \quad 14$$

$$B = \frac{3}{2}$$

### ۵- نتایج و بحث

#### نتایج تجربی

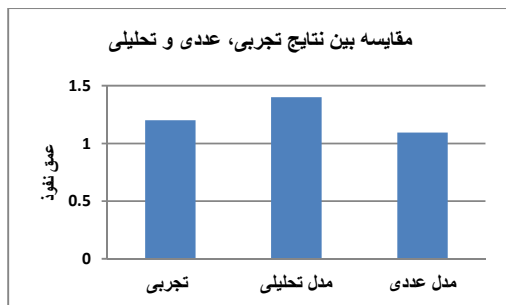
در این بخش پرتابه با سرعت ۲۲۰ متر بر ثانیه به هدف فولادی برخورد کرده است، عمق نفوذ حاصل از برخورد در این مرحله به وسیله کولیس اندازه‌گیری شده است.



X=1.4 mm

در ادامه نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی، مدل عددی با نتایج تجربی مقایسه می گردد

نمودار ۱- مقایسه بین نتایج تجربی، عددی و تحلیلی



#### ۶- نتیجه گیری

(۱) در این مقاله ابتدا به انجام آزمایش‌های تجربی پرداخته و پرتابه‌ها به صورت استوانه‌ای با ابعاد ۲۰×۱۰ میلی‌متر از جنس AISI 52100 و صفحات فولادی با ابعاد ۱۲۰×۱۰۰×۱۰ از جنس AISI 1045 انتخاب شده‌اند.

(۲) در ادامه توسط مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس به حل عددی فرآیند پرداخته شده‌است، میزان خطا بین مدل عددی و نتایج تجربی ۸ درصد بوده، وصحت مدل اثبات گردید.

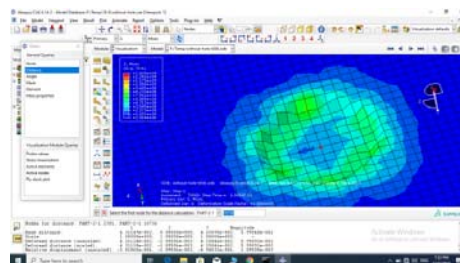
(۳) از مدل عددی استخراج شده می‌توان جهت بدست آوردن تاثیر دیگر پارامترها (که در شرایط تجربی کاری سخت و پرهزینه می‌باشند) در فرآیند نفوذ استفاده نمود.

(۴) در بخش سوم به ارائه مدل تحلیلی پرداخته و عمق نفوذ پرتابه را بدست آمده است.

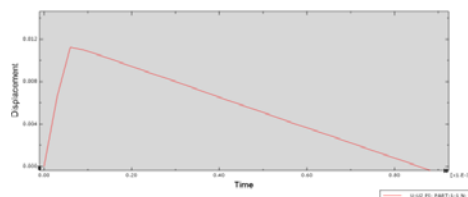
(۵) در انتها مقایسه‌ای بین نتایج تجربی، عددی و تحلیلی انجام گرفته‌است، نتایج بدست آمده در سه حالت حل (تجربی، عددی و تحلیلی) دارای تطابق قابل قبولی می‌باشند.

#### ۷- مراجع

- [1]. R. L. Woodward et al., (1991) The Response of Homogeneous and aminated Metallic Sheet Material to Ballistic Impact, Journal de Physique V1 Colloque, Vol 1, pp 277-28.



شکل ۱۰- تعیین عمق نفوذ پرتابه در صفحه بدون سوراخ توسط آیکون Query



شکل ۱۱- تعیین عمق نفوذ پرتابه در صفحه بدون سوراخ توسط ردیابی یک المان از پرتابه (در این شکل نقطه مرجع)

محاسبه مقدار عمق نفوذ با استفاده از ابزار Query : ۱,۰۹۵ میلی‌متر

محاسبه خطا در عمق نفوذ پرتابه بین نتایج عددی و تجربی: ۸٪

#### نتایج تحلیلی

مطابق روابط ارائه شده در قسمت قبل خواهیم داشت:

$$A = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{E}{3(1-\gamma)\sigma_y} \right] \right\} = 4.089$$

$$B = \frac{3}{2}$$

$$\Phi_I = \frac{\rho V_i^2}{\sigma_y} = 0.68$$

$$\lambda = \frac{M}{\rho d^3} = 1.524$$

$$N = \frac{\lambda}{BN_2} = \frac{\lambda}{B} = 1.016$$

$$I = \frac{\lambda \Phi_I}{AN_1} = \frac{\lambda \Phi_I}{A} = 0.253$$

- [2]. N. K. Gupta and V. Madhu, (1992) Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates. *J Impact Engny* Vol 12, No 3, pp 333-343.
- [3]. Sidney Chocron, Charles E. Anderson Jr., Donald J. Grosch, Carl H. Popelar, (2001) Impact of the 7.62-mm APM2 projectile against the edge of a metallic target, *International Journal of Impact Engineering* 423-437, 25.
- [4]. J. A. Zukas and D. R. Scheffler, (2001) Impact effects in multi-layered plates, *International Journal of solids and structures*, Vol 38, pp 3321-3328.
- [5]. N. Kilic et al., (2016) Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- [6]. M. Raguramana; A. Debb and N.K. Gupt, (2008) A simulation-driven study of oblique impact of ogival-nosed projectiles on mild steel armour plates, *Latin American Journal of Solids and Structures* 225-235, 5.
- [7]. TengX, WierzbickiT, HuangM. (2008) Ballistic resistance of double-layered armor plates. *Int J ImpactEng* 35:870-84.
- [8]. Teng, X.; Dey, S.; Børvik, T.; Wierzbicki, T. (2007) Protection Performance of Double-Layered Metal Shields Against Projectile Impact. *J. Mech. Mater. Solids*, 1307-1328.
- [9]. Z. Abbasi; GH. Liaghat; S. Feli, (2008) Deformation of Blunt Projectiles during Penetration into Deformable Medium Metallic Targets, *mechanical engineering*, 42,1.
- [۱۰]. غ ح لیاقت، س فعلی، د رادمهر (1990)، تحلیل فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییرشکل‌پذیر تخت در اهداف فلزی چندگانه، شماره 1، سال ششم مجله پژوهشی علمی مواد پراورژی.
- [11]. Rosenberg Z, Ashuach Y, Yeshurun Y, Dekel E. (2009) On the main mechanism for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets. *Int J Impact Eng*;36:588-96.
- [۱۱]. غ ح لیاقت، م ح پل، ع حسینی (1384)، تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک، صفحه 1-10، مکانیک و هوافضا جلد 2، شماره 2.
- [۱۲]. غ ح لیاقت، م ح پل، ع حسینی (1387) تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی شاخک‌دار در اهداف فلزی نازک، صفحه 49-56، مکانیک و هوافضا جلد 3 شماره 1.
- [۱۳]. غ ح لیاقت، س فعلی، ط اکبری (1391)، بررسی اثر تغییر شکل‌پذیری پرتابه دارای چرخش غیرمحوری، شماره 4، سال هفتم مجله - پژوهشی علمی مواد پراورژی.
- [15]. K Senthil, S Rupali, M A Iqbal, (2017) FINITE Element Studies On Metal Plates Against Oblique Impact Of Cylindero-Conical Projectiles, 8th International Conference on Structural Engineering and Construction Management.
- [16]. MA Iqbal, K Senthil, V Madhu, N K Gupta (2017) Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles, *International Journal of Impact Engineering* 1-13.
- [17]. C.Z.Duan, T.Dou, Y.J.Cai, Y.Y.Li, (2011) Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel, *Int. J. on Production and Industrial Engineering*, Vol. 02, No. 01.
- [18]. Chen, X, Li, Q. (2003) Perforation of a thick plate by rigid projectiles. *Int. J. Impact Eng.* 28(7), 743-759.