



## ارائه مدل تحلیلی و بررسی تجربی عمق نفوذ پرتابه سر تخت تغییر شکل ناپذیر در صفحه سوراخ‌دار فلزی

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

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

<sup>۲</sup> استاد، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

<sup>۳</sup> دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

<sup>۴</sup> استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

### چکیده

استفاده از صفحات سوراخ‌دار در برخورد پرتابه‌ها، موجب کاهش آسیب به هدف اصلی، هزینه نهایی ساخت و چگالی سطحی می‌شود. هدف این مقاله، ارائه یک مدل تحلیلی جدید و کامل جهت بدست آوردن عمق نفوذ و همچنین میزان انحراف پرتابه سر تخت صلب پس از برخورد به صفحه سوراخ‌دار است، این مدل بر پایه توسعه مدل ارائه شده توسط چن است. در ادامه به بررسی تجربی برخورد پرتابه به صفحه سوراخ‌دار پرداخته شده است، بدین منظور پرتابه‌هایی از جنس AISI ۵۲۱۰۰ و صفحات سوراخ‌دار از جنس AISI ۱۰۴۵ و با ۳ قطر سوراخ ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر استفاده شده است، در انتها نتایج بدست آمده از حل تحلیلی با نتایج تجربی مقایسه گردیده و دقت مدل تحلیلی به اثبات رسیده است. پس از بررسی حالات مختلف برخورد می‌توان به این نکته پی برد که پرتابه پس از برخورد به سوراخ از مسیر حرکت خود منحرف می‌شود و از برخورد عمودی به برخورد مایل تغییر پیدا می‌کند، با افزایش میزان قطر سوراخ یا میزان همپوشانی پرتابه با سوراخ، انحراف پرتابه نیز بیشتر می‌شود.

**کلمات کلیدی:** صفحه سوراخ‌دار؛ پرتابه؛ انحراف؛ ضربه؛ عمق نفوذ؛ مدل تحلیلی.

## An Analytical Model Presentation and Experimental Investigation of the Penetration Depth of the Rigid Blunt Projectile on the Perforated Metal Plate

M. Farahmand<sup>1</sup>, K. Vahedi<sup>2,\*</sup>, A. Naddaf Oskouei<sup>3</sup>, R. Hoseini<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student, Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assoc. Professor., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Assis. Professor., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

### Abstract

The use of perforated plates in the impact of projectiles reduces damage to the main target, the final cost of construction and surface density. The purpose of this paper is to present a new and complete analytical model to obtain the penetration depth as well as the deflection of the rigid head projectile after hitting the perforated plate. This model is based on the development of the model provided by Chen, and in the following experimentally investigation of the impact of the projectile on the perforated plate has been paid. For this purpose, projectiles of AISI 52100 and perforated plates of AISI 1045 with 3 hole diameters of 5, 7 and 9 mm have been used. Finally, the results obtained from the analytical solution are compared with the experimental results and the accuracy of the analytical model is proved. After examining the different states of impact, it can be seen that the projectile deviates from its path after hitting the hole and changes from vertical impact to oblique impact. As the diameter of the hole or the amount of overlap of the projectile with the hole increases, the deflection of the projectile also increases.

**Keywords:** Perforated Plate; Projectile; Deflection; Impact; The Penetration Depth; Analytical Model.

## ۱- مقدمه

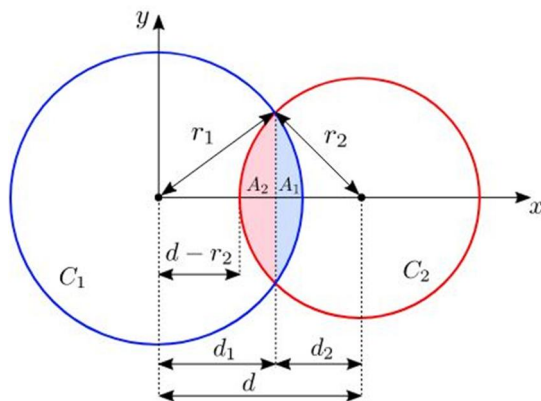
بشر در طول تاریخ حیات خویش، همواره به دنبال پیدا کردن راهی برای حفاظت از خود در برابر ضربات دشمن بوده است، از همین رو تولید زره از مواد مختلف، نشانگر اهمیت ساخت زره در ادوار مختلف است که نمونه‌های آن‌ها را می‌توان در سرتاسر تاریخ مشاهده کرد. در طراحی زره مناسب برای یک وسیله جنگی، عوامل مختلفی دخیل هستند، اما یکی از مهم‌ترین مواردی که باید در نظر داشت، این است که در نهایت زره باید علاوه بر سبک بودن، مؤثر واقع شود. یکی از مشخصه‌های کاربردی زره، چگالی سطحی آن است که با عنوان وزن در هر مترمربع از مساحت عمود برجهت حمله تعریف می‌شود. در صفحات سوراخ‌دار تلاش می‌شود تا با حفظ بازدارندگی، چگالی سطحی زره نیز کاهش داده شود.

آیویر<sup>۱</sup> و همکاران [۱] در سال ۱۹۹۱ به بررسی اثر زره مشبک فلزی با سوراخ‌های مثلثی پرداخت، در این مدل زره‌ها را عملیات حرارتی داده تا سطح بیرونی سخت و سطح درونی آن‌ها انعطاف‌پذیر باشند. مراحل تولید ورق مشبک شامل، مشخصات، فاصله سوراخ‌ها، پیکربندی، پروسه ساخت و عملیات حرارتی در این مقاله توضیح داده شده است. راوید<sup>۲</sup> و هرچیرگ<sup>۳</sup> [۲] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از زره مشبک فولادی با سختی بالا، به بررسی آسیب وارده از گلوله سلاح به صفحه هدف پرداختند که مساحت کل سوراخ‌ها بین ۴۰ تا ۵۰ درصد مساحت کل زره در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که زره مشبک فولادی آسیب وارده از گلوله سلاح‌های کالیبر کوچک را کاهش می‌دهد. بالوس<sup>۴</sup> و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۰، مقاومت بالستیک زره‌های سوراخ‌دار و متفاوت از نظر جنس فولاد، پیکربندی و شکل هندسی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که صفحات سوراخ‌داری که به صورت بهینه انتخاب شوند، باعث شکستگی مکرر هسته پرتابه پس از برخورد به سوراخ‌ها تا ۵ قسمت نیز می‌شود که خرده‌ها توانایی نفوذ به صفحه اصلی را دارا نمی‌باشند؛ همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با کاهش فاصله صفحه پشتی و قرار دادن در فاصله کمتری از صفحه

مشبک، اثر نفوذ بیشتر شده است، توجه این اثر ناشی از عدم توانایی در پخش کردن پرتابه‌های خردشده (در صورت خرد شدن پرتابه) به علت عدم فاصله کافی است و در اصل انرژی جنبشی پرتابه روی صفحه پشتی پخش نخواهد شد. مدهو<sup>۵</sup> و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۱، با انجام تست‌های تجربی، تأثیر مثبت این‌گونه زره‌ها را به اثبات رسانده و به این نتیجه رسیدند که عملکرد زره بالستیک در برابر گلوله‌های ۷/۶۲ میلی‌متر AP با اضافه کردن زره مشبک، تا مقدار ۲/۴ برابر بهبود می‌یابد. بالوس و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۳ برای به دست آوردن هندسه بهینه به بررسی تست‌های بیشتر پرداخته و مشاهده کردند که صفحه مشبک با قطر سوراخ بزرگ‌تر در خرد کردن هسته پرتابه مؤثرتر عمل می‌کند و صفحات سوراخ‌داری که قطر سوراخ آن‌ها مشابه قطر هسته پرتابه است، زودتر به جداسازی پرتابه منجر می‌شود. کلیک<sup>۶</sup> و بدیر<sup>۷</sup> [۶] در سال ۲۰۱۴، به بررسی تجربی و عددی اثر زره مشبک پرداخته و به این نتیجه رسیدند که ۳ اثر صفحه مشبک بر پرتابه شامل نیروی غیرمتقارن محوری که مسیر گلوله را منحرف می‌کند، شکستگی هسته گلوله و فرسایش دماغه هسته گلوله است. کلیک و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۶، در ادامه کارهای خود در زمینه اهداف مشبک به بهینه‌سازی اهداف سوراخ‌دار پرداختند و پارامترهایی از جمله فاصله هوایی بین لایه‌ها، قطر سوراخ‌ها و فاصله بین مراکز سوراخ را نیز در این بررسی و بهینه‌سازی در نظر گرفتند. فرانس<sup>۸</sup> و فادرل<sup>۹</sup> [۸] در سال ۲۰۱۸، با تغییر شکل در سوراخ‌های اهداف فولادی، به بررسی خرابی گلوله پس از برخورد به صفحه مشبک پرداختند. آن‌ها در این سری از تست‌های تجربی از سوراخ‌های دایروی و بیضوی شکل استفاده کردند و میزان خرابی گلوله‌ها را در اثر برخورد به این سوراخ‌ها با یکدیگر مقایسه کردند.

در این مقاله به ارائه یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه سرتخت صلب در اهداف سوراخ‌دار فلزی پرداخته شده است.

<sup>5</sup> Madhu<sup>6</sup> Kilic<sup>7</sup> Bedir<sup>8</sup> Fras<sup>9</sup> Faderl<sup>1</sup> Auyer<sup>2</sup> Ravid<sup>3</sup> Hirschberg<sup>4</sup> Balos



شکل ۱- بدست آوردن سطح همپوشانی دو دایره [۹]

$$A_{\text{intersection}} = r_1^2 \cos^{-1}\left(\frac{d_1}{r_1}\right) - d_1 \sqrt{r_1^2 - d_1^2} + r_2^2 \cos^{-1}\left(\frac{d_2}{r_2}\right) - d_2 \sqrt{r_2^2 - d_2^2} \quad (1)$$

که در این رابطه داریم:

$$d_1 = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (2)$$

$$d_2 = d - d_1 = \frac{r_2^2 - r_1^2 + d^2}{2d} \quad (3)$$

در روابط شماره (۱)، (۲) و (۳) داریم:

$r_1$  و  $r_2$  شعاع دایره‌ها،  $A_{\text{intersection}}$  سطح همپوشانی و  $d$  فاصله بین مراکز دایره‌ها،  $d_1$  موقعیت مرکز همپوشانی روی محور  $x$  و  $d_2 = d - d_1$  است.

در ادامه جهت بدست آوردن قطر معادل پرتابه جدید از روابط (۴-۶) استفاده می‌کنیم:

$$A_o = \frac{\pi d_o^2}{4} \quad (4)$$

$$A_{\text{eq}} = A_o - A_{\text{int}} \quad (5)$$

$$A_{\text{eq}} = \frac{\pi d_{\text{eq}}^2}{4} \quad (6)$$

در این روابط  $d_o$  قطر پرتابه،  $A_o$ ،  $A_{\text{int}}$  و  $A_{\text{eq}}$  به ترتیب سطح مقطع پرتابه، سطح همپوشانی و سطح مقطع معادل می‌باشند.

## ۲-۲- بدست آوردن عمق نفوذ پرتابه با قطر معادل

حال با بهره‌گیری از معادلات حرکت ارائه‌شده در مقاله چن سال ۲۰۰۳ و با در نظر گرفتن این نکته که ضرایب  $N_1$  و  $N_2$

این اهداف قابلیت کاهش چگالی سطحی را در کنار عدم توجه به ضربه‌زننده برای ایجاد برخورد مایل را دارا می‌باشند. بررسی و مطالعه در مورد این اهداف، فقط به انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی محدود شده است و تاکنون مدلی تحلیلی جهت محاسبه عمق نفوذ پرتابه برای اهداف سوراخ‌دار ارائه نشده است. در این مقاله سعی شده است که در بخش اول به ارائه مدل تحلیلی (شامل به دست آوردن میزان انحراف پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخ‌دار و در ادامه بدست آوردن عمق نفوذ پرتابه) پرداخته و در بخش دوم به بررسی تجربی برخورد پرتابه سرتخت به اهداف فولادی پرداخته شده است، جهت بررسی تأثیر قطر سوراخ و همچنین اثر میزان همپوشانی پرتابه با سوراخ، آزمایش‌ها با ۳ قطر سوراخ و همپوشانی‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل تحلیلی

پس از برخورد پرتابه با سوراخ و با توجه به میزان همپوشانی پرتابه با سوراخ و سطح متفاوت همپوشانی، می‌توان پرتابه را به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول که قسمتی از سطح مقطع پرتابه در تماس با صفحه است و بخش دوم قسمتی است که با سوراخ درگیر است. در این مدل فرض می‌شود که قسمت در تماس با سوراخ تمایل دارد با سرعت اولیه خود درون سوراخ به حرکت ادامه دهد و به دلیل آن که سرعتی بیشتر از بخش درگیر پرتابه با صفحه را دارد، سبب انحراف پرتابه از مسیر خود می‌شود، ولی قسمتی از پرتابه که در تماس با صفحه است، به حرکت خود درون صفحه بدون در نظر گرفتن سوراخ ادامه می‌دهد. برای این منظور قطر معادل جدیدی برای پرتابه در تماس با صفحه بدون در نظر گرفتن بخش قبلی در نظر گرفته شده است و از بخش قبل تنها جهت به دست آوردن انحراف پرتابه استفاده می‌شود.

## ۲-۱- بدست آوردن قطر معادل

ابتدا لازم است، سطح تماس بین پرتابه و سوراخ محاسبه گردد. برای بدست آوردن سطح همپوشانی با توجه به اینکه سطح مقطع پرتابه و سوراخ دایروی است از رابطه (۳) استفاده شده است [۹].

تقسیم نمود و هر کدام از این گام‌ها را  $\Delta x$  نامید. با این فرض به حل معادله پرداخته و رابطه بازگشتی زیر جهت محاسبه سرعت پرتابه در هر مرحله از نفوذ بدست می‌آید:

$$x_i = i\Delta x \quad (16)$$

$$\Delta E_i = -F_x(x)dx = -\Delta x \left[ \frac{F(x_{i-1}) + F(x_i)}{2} \right] \quad (17)$$

$$\Delta E_i = \frac{1}{2}M(V_i^2 - V_{i-1}^2) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= -\Delta x \left[ \frac{F(x_{i-1}) + F(x_i)}{2} \right] \\ &= -\Delta x \left[ \frac{\pi d^2}{4} A \sigma_y + \frac{\pi d^2}{4} \times B \rho \frac{V_i^2 + V_{i-1}^2}{2} \right] \\ &= \frac{1}{2}M(V_i^2 - V_{i-1}^2) \end{aligned} \quad (19)$$

$$V_i = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}M V_{i-1}^2 - \Delta x \frac{\pi d^2}{8} [2A\sigma_y + B\rho V_{i-1}^2]}{\frac{1}{2} \left( M + \frac{\pi d^2}{4} B\rho \Delta x \right)}} \quad (20)$$

$V_i$  سرعت پرتابه در گام  $i$ ام است؛ در نتیجه سرعت متوسط نفوذ پرتابه در هدف از تقسیم مجموع سرعت‌ها در مراحل مختلف تقسیم بر تعداد مراحل بدست خواهد آمد.

دقت حل بستگی به میزان  $\Delta x$  خواهد داشت، در این مقاله میزان کوچک  $0.0001$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای حل این معادله از کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

حال با تقسیم میزان عمق نفوذ پرتابه بر سرعت متوسط مدت‌زمان نفوذ بدست خواهد آمد.

$$t = \frac{X}{\bar{V}} \quad (21)$$

$\bar{V}$  سرعت متوسط پرتابه از ابتدا تا انتهای نفوذ است.

#### ۲-۴- بدست آوردن زاویه انحراف پرتابه

حال با داشتن زمان نفوذ پرتابه می‌توان میزان نفوذ پرتابه با قسمت سوراخ‌دار صفحه را بدست آورد.

$$x' = V_0 t \quad (22)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{(x' - X)}{d} \quad (23)$$

در این مقاله برای پرتابه تخت یک است، می‌توان عمق نفوذ پرتابه در هدف را در برخورد قائم با رابطه (۱۰) محاسبه کرد [۱۰]:

$$\frac{X}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left( 1 + \frac{I}{N} \right) \quad (7)$$

در آن  $N, I$  کمیت‌های بدون بعد به‌عنوان تابع برخورد و تابع هندسی با روابط (۸-۹) تعریف می‌شوند:

$$I = \frac{\lambda \Phi_J}{AN_1} = \frac{\lambda \Phi_J}{A} \quad (8)$$

$$N = \frac{\lambda}{BN_2} = \frac{\lambda}{B} \quad (9)$$

$\Phi_J$  عدد تخریب جانسون و  $\lambda$  جرم بی‌بعد شده پرتابه به شکل (۱۰-۱۱) تعریف می‌شوند:

$$\Phi_J = \frac{\rho V_i^2}{\sigma_y} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{M}{\rho d^3} \quad (11)$$

برای ماده تراکم ناپذیر الاستیک-پلاستیک کامل خواهیم داشت (ضرایب  $A, B$ ) [۱۰]:

$$\begin{aligned} A &= \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{E}{3(1-\gamma)\sigma_y} \right] \right\} \\ B &= \frac{3}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

در این روابط  $N_1$  و  $N_2$  ضرایب شکل مربوط به هندسه دماغه پرتابه،  $\sigma_y$  تنش تسلیم دینامیکی هدف،  $E$  مدول الاستیسیته هدف،  $\gamma$  نسبت پواسن و  $\rho$  چگالی هدف است.

#### ۲-۳- بدست آوردن سرعت متوسط حین نفوذ

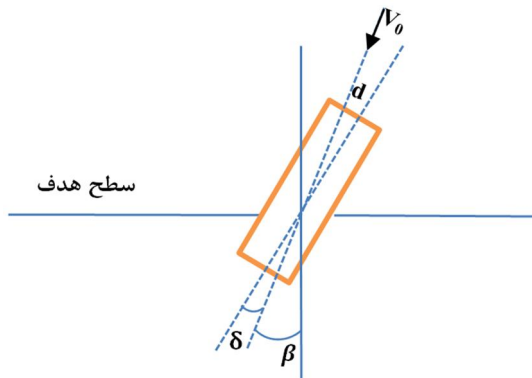
حال برای یافتن سرعت پرتابه حین نفوذ در هدف به حل معادلات (۱۳-۱۵) می‌پردازیم:

$$\Delta E_k = -F_x(x)\Delta x \quad (13)$$

$$E_k = \frac{1}{2}M V_0^2 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\pi d^2}{4} (AN_1 \sigma_y + BN_2 \rho V^2) \\ &= \frac{\pi d^2}{4} (A\sigma_y + B\rho V^2) \end{aligned} \quad (15)$$

$F_x$  نیروی مقاوم در جهت حرکت پرتابه و  $E_k$  انرژی جنبشی پرتابه است. برای حل این معادله فرض می‌شود که کل عمق نفوذ پرتابه را می‌توان به تعداد گام‌های زیادی



شکل ۳- تغییر راستای نفوذ پرتابه نسبت به راستای سرعت اولیه

که در آن مؤلفه سرعت در راستای مسیر نفوذ و  $V_{\perp}$  مؤلفه سرعت عمود بر مسیر نفوذ است. از تجزیه سرعت مشخص می‌شود که مؤلفه سرعت عمود بر مسیر نفوذ باعث چرخش پرتابه و مؤلفه دیگر سرعت باعث حرکت پرتابه روبه جلو و نفوذ آن در هدف می‌شود. پس از نفوذ کامل دماغه پرتابه در هدف، دیگر پرتابه تغییر جهت نمی‌دهد، یعنی میزان  $V_{\perp}$  صفر می‌شود و یا به عبارت دیگر، انرژی جنبشی پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ به صفر می‌شود و پرتابه چرخشی به اندازه  $\delta$  دارد. انرژی جنبشی عمود بر مسیر نفوذ، در مسیر چرخش پرتابه مصرف می‌شود. حال از برابر قرار دادن میزان این انرژی جنبشی با مقدار کار مصرفی در این مسیر، می‌توان میزان چرخش را محاسبه کرد. برای این کار، مسیر چرخش پرتابه در هدف به صورت یک کمان و به شکل زیر تخمین زده می‌شود:

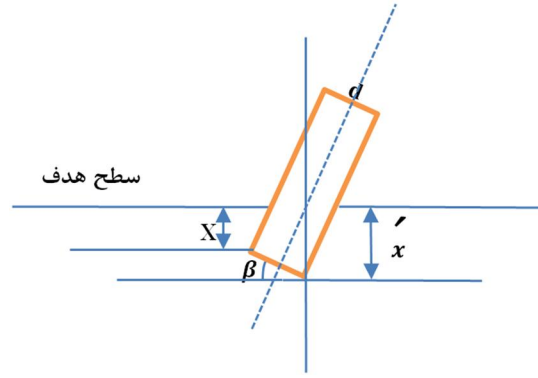
$$S_{\perp} = [h + d \tan(\beta + \delta)] \delta \quad (26)$$

در این مرحله، تغییرات نیروی مقاوم جانبی نسبت به زمان به صورت خطی فرض می‌شود. به این ترتیب می‌توان نیروی جانبی متوسط وارده به پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$F_{\perp \text{avg}} = \frac{1}{2} F_o \sin \beta \quad (27)$$

$$F_o = \frac{\pi d^2}{4} (A \sigma_y + B \rho V^2) \quad (28)$$

حال می‌توان مقدار کار انجام شده در کمان  $S_{\perp}$  را به صورت حاصل ضرب نیروی متوسط در کمان در نظر گرفت. و با برابر قرار دادن میزان انرژی جنبشی مصرف شده با کار



شکل ۲- انحراف پرتابه پس از برخورد به سوراخ

$X$  میزان نفوذ پرتابه در قسمت سوراخ دار است. پس تا اینجا می‌توان برخورد پرتابه با صفحه سوراخ دار را با پرتابه‌ای با قطر معادل و زاویه انحراف اولیه  $\beta$  (نسبت به خط عمود بر صفحه) و صفحه بدون سوراخ جایگزین کرد.

حال پرتابه با سرعت اولیه  $V_o$  و تحت زاویه کجی اولیه  $\beta$  به یک هدف فلزی بدون سوراخ برخورد می‌کند و به دلیل غیرمتقارن بودن نیروهای وارد به پرتابه، ادامه فرآیند نفوذ آن در هدف با تغییر راستایی به اندازه  $\delta$  همراه است.

## ۲-۵- محاسبه زاویه تغییر راستا

فرض می‌شود که تغییر راستای پرتابه تا زمانی ادامه دارد که سطح مقطع پرتابه به طور کامل وارد هدف شود. در این حالت، نیروی مقاوم وارد بر پرتابه در راستای محور آن قرار می‌گیرد و باعث به وجود آمدن تقارن می‌شود. این مسئله باعث می‌گردد که گشتاور وارده به پرتابه صفر شود و پرتابه نفوذ خود را در راستای جدید، به صورت یک حرکت صلب با سرعت  $V$  ادامه دهد. برای اندازه‌گیری این کمیت باید دانست که چه عاملی باعث چرخش پرتابه و چه عاملی باعث حرکت روبه جلوی پرتابه در هدف می‌شود. همان طور که در شکل زیر مشخص است، پس از آنکه سطح مقطع پرتابه به طور کامل وارد هدف شد، راستای نفوذ پرتابه نسبت به راستای سرعت اولیه آن تغییر کرده است.

می‌توان سرعت اولیه پرتابه را به دو راستای عمود بر مسیر نفوذ و موازی مسیر نفوذ تجزیه کرد:

$$V_{\perp} = V_o \sin \delta \quad (24)$$

$$V_x = V_o \cos \delta \quad (25)$$

$$\theta = \beta + \delta \quad (34)$$

### ۳- مطالعات آزمایشگاهی فرآیند

در این قسمت به آماده‌سازی قطعات، وسایل مورد استفاده و حالت‌های متفاوت تست‌شده این تحقیق پرداخته شده است.

#### ۳-۱- صفحه هدف (آماده‌سازی نمونه)

اهداف طراحی شده در این آزمایش با ابعاد  $10 \times 100 \times 120$  میلی‌متر و از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ می‌باشند.



شکل ۴- سوراخ کردن صفحات به قطر سوراخ‌های متفاوت توسط دستگاه فرز انگشتی

انجام‌شده، می‌توان میزان انحراف را از رابطه غیرخطی زیر بدست آورد:

$$\frac{1}{2}MV_{\perp}^2 = F_{\text{avg}} \times S_{\perp} \quad (29)$$

$$\sin^2 \delta = \delta \sin \beta \times \frac{\pi}{4} [\tan(\beta + \delta)] \times \left( \frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \quad (30)$$

با حل رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\delta = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \tan \beta \sin \beta \quad (31)$$

میزان چرخش پرتابه در هدف تابعی از شکل پرتابه، سرعت برخورد پرتابه به هدف و همچنین زاویه اولیه اولیه برخورد است. علاوه بر موارد گفته‌شده، جنس هدف و خصوصیات فیزیکی نیز در مقدار این زاویه مؤثر هستند. برای بررسی حرکت پرتابه در هدف، فقط مؤلفه مماسی سرعت مدنظر قرار می‌گیرد. با بهره‌گیری از معادلات حرکت می‌توان عمق نفوذ پرتابه در هدف را محاسبه کرد:

$$\frac{X_{obl}}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left( 1 + \frac{I \cos^2 \delta}{N} \right) \quad (32)$$

$X_{obl}$  مقدار نفوذ پرتابه در راستای حرکت است.

برای بدست آوردن مقدار نفوذ کلی پرتابه در راستای عمود بر صفحه خواهیم داشت:

$$X_{tot} = X_{obl} \times \cos(\beta + \delta) \quad (33)$$

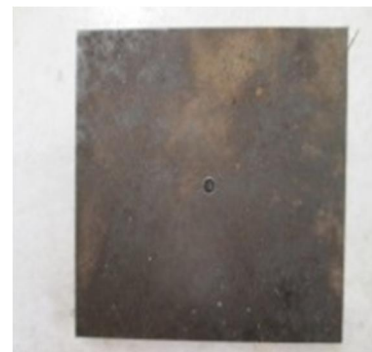
$X_{tot}$  مقدار نفوذ کلی پرتابه در راستای عمود بر صفحه است و مقدار کلی انحراف پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخ‌دار برابر با رابطه (۳۴) خواهد بود:



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۵- انواع آرایش سوراخ، الف) قطر ۵ میلی‌متر، ب) قطر ۷ میلی‌متر و ج) قطر ۹ میلی‌متر



شکل ۶- پرتابه استفاده شده در این آزمایش  
جرم پرتابه مورد استفاده در این آزمایش ۱۲ گرم است.



شکل ۷- جرم پرتابه مورد استفاده در این آزمایش

### جدول ۱- خواص صفحات فولادی AISI ۱۰۴۵ [۱۲]

۴۸۶	ظرفیت گرمایی ویژه Watt/kg.K
۱۱/۲	ضریب انبساط خطی ( $10^{-6}$ )
۵۱/۹	ضریب هدایت حرارتی Watt/m.K
۷۸۷۰	چگالی $kg/m^3$
۰/۲۹	نسبت پواسن
۲۰۰	مدول الاستیسیته GPa

بدین منظور صفحات فولادی را به ابعاد ذکر شده برش داده و برای بررسی اثر سوراخ‌ها، پس از برش صفحات اقدام به سوراخ کردن صفحات به قطر سوراخ‌های متفاوت توسط دستگاه فرز انگشتی شده است و در این فرآیند از سه مته با قطر متفاوت استفاده گردیده است.

برای بررسی اثر قطر سوراخ بر میزان انحراف پرتابه ۳ نوع آرایش سوراخ به شرح ذیل صورت پذیرفته است:

- ✓ سوراخ با سطح مقطع دایره و قطر ۵ میلی‌متر
- ✓ سوراخ با سطح مقطع دایره و قطر ۷ میلی‌متر
- ✓ سوراخ با سطح مقطع دایره و قطر ۹ میلی‌متر

### ۳-۲- طراحی پرتابه

پرتابه استفاده شده در این آزمایش رولربیرینگ استوانه‌ای با قطر ۱۰ و طول ۲۰ میلی‌متر، از جنس فولاد AISI ۵۲۱۰۰ است.



(ب)



(الف)

شکل ۸- (الف) سابوت ساخته شده و (ب) نحوه قرار گرفتن پرتابه در سابوت

### ۳-۳- طراحی سابوت

با توجه به آنکه کالیبر تفنگ گازی مستقر در آزمایشگاه دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۱۶ میلی‌متر است 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.

### ۳-۴- تجهیزات مورد استفاده (دستگاه و گیره‌ها)

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

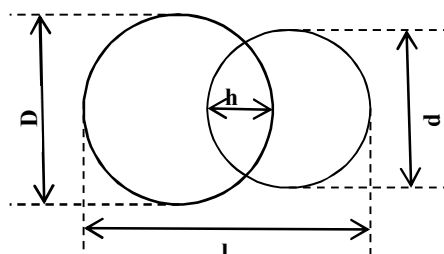
آزمایش‌های انجام شده با سرعت متوسط ۲۲۰ متر بر ثانیه می‌باشند که با توجه به سرعت آزمایش و استحکام پرتابه و بررسی شکل ظاهری پرتابه پس از برخورد می‌توان به این مهم دست‌یافت که فرض صلب بودن پرتابه در این شرایط آزمایشگاهی فرضی قابل قبول است.

### ۴- نتایج تحلیلی و تجربی

در این قسمت به بررسی نفوذ و انحراف پرتابه در صفحات سوراخ‌دار پرداخته شده است. ابتدا نحوه بدست آوردن عمق نفوذ و همچنین میزان انحراف پرتابه پس از تست تجربی شرح داده شده است. نحوه بدست آوردن مکان دقیق برخورد پرتابه و میزان انحراف پرتابه از حالت قائم و یا به عبارتی میزان تأثیر سوراخ در مایل کردن نفوذ در بخش تجربی به شرح ذیل است:



شکل ۱۱- سوراخ به قطر ۷ میلی‌متر و همپوشانی ۶ میلی‌متر



شکل ۱۲- معرفی پارامترها و نحوه همپوشانی

برای بدست آوردن میزان انحراف پرتابه پس از برخورد از رابطه (۳۵) استفاده می‌شود:



شکل ۹- 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 است.



شکل ۱۰- تفنگ گازی استفاده شده مستقر در آزمایشگاه



افزایش قطر سوراخ انحراف پرتابه پس از برخورد نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۵ نمودارهای میله‌ای نتایج تجربی و تحلیلی میزان انحراف پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخ‌دار به نمایش گذاشته شده است. مقایسه بین نتایج دقت قابل قبول مدل ارائه شده را در بدست آوردن میزان انحراف پرتابه پس از برخورد به سوراخ را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۶ نمودارهای میله‌ای نتایج تجربی و تحلیلی عمق نفوذ پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخ‌دار به نمایش گذاشته شده است. مقایسه بین نتایج دقت قابل قبول مدل ارائه شده را در بدست آوردن عمق نفوذ پرتابه پس از برخورد به سوراخ را نشان می‌دهد.

جدول ۲- معرفی پارامترهای مورد استفاده

l	طول کلی
d	قطر سوراخ
l-d	طول ناحیه‌ای از پرتابه که با سوراخ درگیر نشده
$y_{min}$	میزان حداقل عمق نفوذ پرتابه (محاسبه شده توسط کولیس)
$y_{max}$	میزان حداکثر عمق نفوذ پرتابه (محاسبه شده توسط کولیس)
y	متوسط عمق نفوذ حداقل و حداکثر

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{y_{max} - y_{min}}{(l-d)} \right\} \quad (35)$$

و برای بدست آورد عمق نفوذ پرتابه می‌توان از متوسط عمق نفوذ حداقل و حداکثر استفاده کرد. پارامترهای استفاده شده در این رابطه عبارت‌اند از:

#### ۴-۱- مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

در این قسمت به مقایسه بین نتایج تحلیلی و تجربی پرداخته شده است:

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتایج تجربی حاصل از برخورد پرتابه به صفحه سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر و نسبت همپوشانی مختلف به نمایش گذاشته شده است و در کنار آن‌ها نتایج حاصل از مدل تحلیلی نیز نمایش داده شده است، مقایسه بین نتایج دقت قابل قبول مدل ارائه شده را نشان می‌دهد. از شکل (۱۳) که به بررسی اثر میزان همپوشانی در صفحه سوراخ‌دار با قطر سوراخ ثابت (قطر سوراخ ۵ میلی‌متر) و میزان همپوشانی متفاوت پرداخته شده است، به این نکته می‌توان دست‌یافت که با افزایش میزان همپوشانی انحراف پرتابه پس از برخورد نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه از شکل ۱۴ نیز برای قطر سوراخ ۹ میلی‌متر و میزان همپوشانی متفاوت حاصل می‌شود. با بررسی این نتایج برای صفحات سوراخ‌دار با قطر سوراخ ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر با میزان همپوشانی ثابت، به این نکته می‌توان دست‌یافت که با



سوراخ به قطر ۵ و همپوشانی ۱ میلی‌متر		سوراخ به قطر ۵ و همپوشانی ۲ میلی‌متر		سوراخ به قطر ۵ و همپوشانی ۴/۲ میلی‌متر	
نتایج تجربی	نتایج تحلیلی	نتایج تجربی	نتایج تحلیلی	نتایج تجربی	نتایج تحلیلی
$\theta = 5/07$	$\theta = 6/13$	$\theta = 7/33$	$\theta = 6/84$	$\theta = 8/82$	$\theta = 7/31$
$y = 1/3$	$y = 1/47$	$y = 1/35$	$y = 1/56$	$y = 1/55$	$y = 1/8$

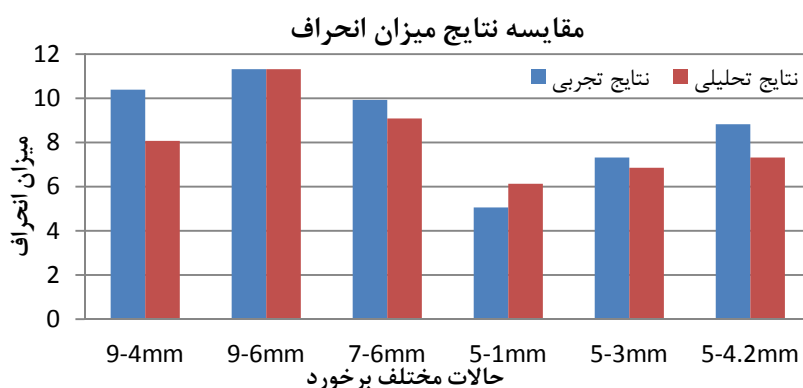
شکل ۱۳- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی برای صفحات با قطر سوراخ ۵ میلی‌متر



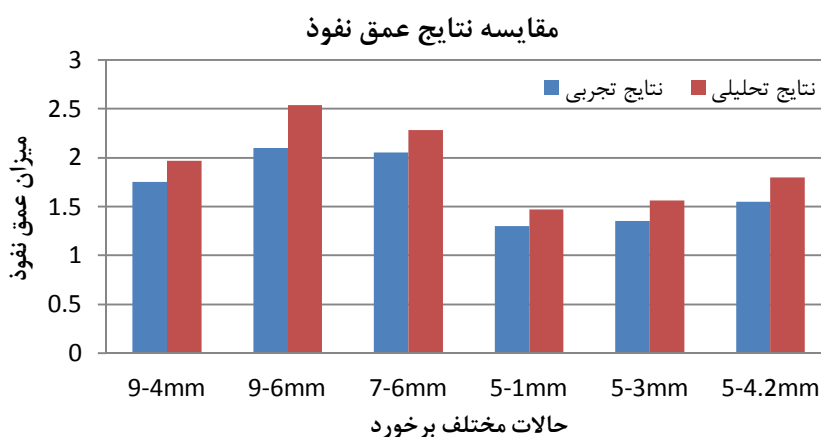
سوراخ به قطر ۷ و همپوشانی ۶ میلی‌متر      سوراخ به قطر ۹ و همپوشانی ۴ میلی‌متر      سوراخ به قطر ۹ و همپوشانی ۶ میلی‌متر

نتایج تجربی	نتایج تحلیلی	نتایج تجربی	نتایج تحلیلی	نتایج تجربی	نتایج تحلیلی
$\theta = 9/92$	$\theta = 9/08$	$\theta = 10/38$	$\theta = 8/06$	$\theta = 11/30$	$\theta = 11/32$
$\gamma = 2/05$	$\gamma = 2/28$	$\gamma = 1/75$	$\gamma = 1/97$	$\gamma = 2/1$	$\gamma = 2/54$

شکل ۱۴- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی برای صفحات با قطر سوراخ ۷ و ۹ میلی‌متر



شکل ۱۵- نمودار میله‌ای مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی میزان انحراف پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخ دار



شکل ۱۶- نمودار میله‌ای مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی عمق نفوذ پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخ دار

- [2] Ravid M, Hirschberg Y (2009) Ballistic armor. Uspto, US 7,513,186.
- [3] Balos S, Grabulov V, Sidjanin B, Pantic A, Radisavljevic C (2010) Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application. *Mater Des* 31: 2916-2924.
- [4] Madhu V, Bhat T (2011) Armour protection and affordable protection for futuristic combat vehicles. *Defense. Sci J* 61: 394-402.
- [5] Radisavljevic I, Balos S, Milutin B, Nikacevic A, Sidjanin B (2013) Optimization of geometrical characteristics of perforated plates. *Mater Des* 49: 81-89.
- [6] Kilic N, Bedir S, Erdik B, Ekici A, Guden M (2014) Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Mater Des* 63: 427-438.
- [7] Kilic N, Bedir S, Erdik B, Ekici A (2016) Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods. *Mech Adv Mater Struc* 24(7): 615-24.
- [8] Fras T, Faderl N (2018) Influence of add-on perforated plates on the protective performance of light-weight armour systems. *Problemy Mechatroniki* 9(31): 31-48.
- [9] Teemu R, (2020) Prospects for the detection of planetary rings around extrasolar planets. Master's thesis, Space Physics and Astronomy Research Unit, University of Oulu, Finland.
- [10] Chen X, Li Q (2003) Perforation of a thick plate by rigid rojectiles. *Int J Impact Eng* 28(7): 743-759.
- [11] Chen X, Li Q, Fan S (2006) Oblique perforation of thick metallic plates by rigid projectiles. *Acta Mech Sinica* 22: 367-376.
- [12] Duan C, Dou T, Cai Y, Li Y (2011) Finite element simulation and experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 hardened steel. *J Ind Prod Eng* 01: 28-32.

## ۵- نتیجه گیری

- (۱) در این مقاله به ارائه مدل تحلیلی جدید جهت بدست آوردن عمق نفوذ و همچنین میزان انحراف پرتابه پس از برخورد به صفحه سوراخدار پرداخته شده است، در ادامه نتایج بدست آمده از حل تحلیلی با نتایج تجربی مقایسه گردیده و دقت مدل به اثبات رسیده است.
- (۲) در این مدل تحلیلی با حل معادلات ارائه شده در مدل چن رابطه بازگشتی جهت یافتن سرعت لحظه-ای پرتابه حین نفوذ بدست آمده است، در ادامه با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب سرعت متوسط حرکت پرتابه را حین نفوذ محاسبه می شود.
- (۳) تست های تجربی در صفحات سوراخدار با ۳ قطر سوراخ ۵، ۷ و ۹ میلی متر و با سرعت ۲۲۰ متر بر ثانیه انجام گرفته است.
- (۴) با بررسی میزان همپوشانی در صفحه سوراخدار با قطر ثابت، به این نکته می توان دست یافت که با افزایش میزان همپوشانی انحراف پرتابه پس از برخورد نیز افزایش می یابد.
- (۵) با بررسی صفحات سوراخدار با قطر متغیر و با میزان همپوشانی ثابت، به این نکته می توان دست یافت که با افزایش قطر سوراخ انحراف پرتابه پس از برخورد نیز افزایش می یابد.
- (۶) پس از بررسی به عمل آمده می توان به این نکته پی برد که صفحات سوراخدار در منحرف کردن حرکت پرتابه مؤثر می باشند.

## ۶- مراجع

- [1] Auyer R, Buccellato R, Gidynski A, Ingersoll R, Sridharan N (1991) Perforated plate armor. Uspto, US 5,014,593.