



بررسی تحلیلی، تجربی و عددی عملکرد بالستیکی اهداف مرکب سرامیکی

مصطفی سیاح بادخور^۱، خداداد واحدی^{۲*} و علیرضا نداد اسکویی^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۲ استاد، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

کاهش عمق نفوذ پرتابه در هدف بسیار اهمیت دارد. در این مقاله به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی عملکرد بالستیکی اهداف ترکیبی سرامیکی پرداخته شده است. اهداف به صورت سوراخ‌دار در لایه اول در نظر گرفته شده است. در بخش تحلیلی به ارائه یک مدل کاملاً تحلیلی جدید برای این اهداف پرداخته شده است. در بخش تجربی با انجام آزمایش‌هایی روی این اهداف مقدار عمق نفوذ اندازه‌گیری شده است. در بخش عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. با صحت سنجی نتایج عددی با نتایج تجربی به توسعه شبیه‌سازی عددی و بررسی نتایج حاصل از مدل تحلیلی جدید پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، با نتایج تجربی مطابقت خیلی خوبی دارند. نتایج حاصل از مدل تحلیلی جدید نیز با نتایج شبیه‌سازی عددی مطابقت خیلی خوبی دارند. در سرعت‌های پایین و بالا مقدار سرامیک در تماس با پرتابه اهمیت دارد، اما در سرعت‌های متوسط، زاویه تمایل اهمیت بیشتری دارد. هرکدام از این عوامل موجب کاهش عمق نفوذ پرتابه در هدف برای آن سرعت‌ها شده است. در همه سرعت‌ها، ایجاد سوراخ موجب حرکت مورب پرتابه در هدف شده است.

کلمات کلیدی: مدل تحلیلی؛ آزمایش تجربی؛ مدل عددی؛ نرم‌افزار آباکوس؛ هدف ترکیبی.

Analytical, Experimental and Numerical Investigation of Ballistic Performance of Ceramic Composite Targets

M. Sayah Badkhor¹, K. Vahedi^{2,*}, A. Naddaf Oskouei³

¹ Assistant Professor, Faculty of Electrical, Computer and Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive Univ, Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive Univ, Tehran, Iran.

Abstract

One of the important issues is to reduce the depth of projectile penetration in the target. In this paper, the analytical, experimental and numerical investigation of the ballistic performance of ceramic composite targets is discussed. The targets are perforated in the first layer. In the analytical section, presents a new analytical model for these targets. In the experimental section, the depth of penetration was measured by conducting experiments on these targets. In the numerical section, Abaqus software is used. The validation of the numerical results with the experimental results are performed to develop the numerical simulation and to investigate the results of the new analytical model. The results of numerical simulation are in good agreement with the experimental results. The results of the new analytical model are also in good agreement with the numerical simulation results. At low and high velocities, the amount of ceramics in contact with the projectile is important, but at moderate velocities, the angle of obliquely is more important. Each of these factors has reduced the depth of projectile penetration in the target for those velocities. At all velocities, the hole has caused the projectile to move obliquely at the target.

Keywords: Analytical Model; Experimental Test; Numerical Model; Abaqus Software; Composite Target.

۱- مقدمه

نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی به منظور کاهش اثرات بالستیک آن از مسائل پرکاربرد در علم مکانیک نفوذ است. دست‌یابی به هدفی با قدرت بازدارندگی بالا و درعین حال سبک، کم‌هزینه و مقاوم اهمیت بسیار بالایی دارد.

در سال ۱۹۶۷، فلورنس^۱ و اهرنز^۲ [۱]، تقابل بین پرتابه و زره‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داد. آنها کار خود را در دو حوزه تحلیلی و تجربی انجام دادند. در سال ۱۹۶۷، تیت [۲]، نظریه‌ای برای کاهش سرعت میله‌های بلند بعد از ضربه ارائه داد. او از تئوری هیدرودینامیکی اصلاح شده استفاده کرد که در آن بعضی از اثرات مقاومت مواد برای پیش‌بینی کاهش سرعت میله‌های بلند در نظر گرفته شده است. در سال ۱۹۹۰، وود وارد^۳ [۳]، توسعه ساده‌ای از مدل‌های مربوط به نفوذ کامل در اهداف زره‌ای کامپوزیتی سرامیک انجام داد. او فرآیندهای فیزیکی ضروری را مشخص و وابستگی مقاومت بالستیک روی خواص فیزیکی و پارامترهای ضربه را بیان کرد. در سال ۱۹۹۱، دن ریجر^۴ [۴]، در پایان-نامه خود توسعه مستقلی از آنالیزهای راوید و همکاران و وود وارد انجام داد. اساس کار او بر مبنای جرم انباشته بود. در سال ۱۹۹۷، زائرا^۵ و گالوز^۶ [۵]، یک مدل تحلیلی از ضربه بالستیک قائم و مایل روی زره‌های سبک سرامیک - فلز ارائه کردند. این مدل بر اساس معادله الکسیوسکی و تیت برای نفوذ پرتابه به داخل سرامیک است. در سال ۱۹۹۹، فلوز^۷ و بارتن^۸ [۶]، مدلی را جهت پیش‌بینی نفوذ پرتابه به داخل زره‌های نیمه بی‌نهایت سرامیکی ارائه کردند. این مدل مطالعه خواص مواد و تغییر شکل زره در اثر نفوذ را سهولت می‌بخشد.

بیشتر مدل‌هایی که بعد از سال ۲۰۰۰ ارائه شدند، مربوط به تغییر فرض‌های مدل‌های تحلیلی قبلی و بهبود تخمین عمق نفوذ، روش‌های جدید آزمایش تجربی و

شبیه‌سازی عددی است. در سال ۲۰۱۴، کلیک^۹ و همکارانش به بررسی تجربی و عددی تأثیر سوراخ‌های دایره‌ای شکل روی اهداف فولادی در مقابل نفوذ پرتابه پرداختند. آنها با ساخت هدف دو لایه فولادی و سوراخ کردن هدف جلویی به بررسی میزان عمق نفوذ در این اهداف پرداختند و نتیجه گرفتند که ایجاد سوراخ، باعث حرکت مایل پرتابه و کاهش عمق نفوذ می‌شود [۷]. در سال ۲۰۱۵، لیاقت و همکارانش به اصلاح مدل تحلیلی وودوارد در اهداف سرامیک - فلز پرداختند [۸]. در سال ۲۰۱۶ مستوفی و همکاران، مطالعاتی راجع به ایجاد اعداد جدید بدون بعد بر اساس معادله تجربی برای پیش‌بینی تغییر شکل عرضی بزرگ انعطاف‌پذیر اهداف مربعی یکپارچه و چندلایه به دلیل تأثیر طبیعی یک پرتابه کروی سفت‌وسخت در دستور کار خود قرار دادند [۹]. در سال ۲۰۱۷ نی^{۱۰} و همکارانش، به بررسی نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیکی پرداختند. آنها به دنبال ایجاد شرایطی برای نفوذ مایل پرتابه در هدف بودند؛ بنابراین در ساخت هدف از هرم‌های سرامیکی در سازه‌ای فولادی به صورت مایل استفاده کردند [۱۰]. در سال ۲۰۱۷، کلیک و همکارانش به بهینه‌سازی هدف سوراخ‌داری پرداختند که قبلاً ارائه کرده بودند. آنها پارامترهای از جمله فاصله هوایی بین دو لایه، قطر سوراخ و فاصله بین مراکز سوراخ‌ها را در این بهینه‌سازی در نظر گرفتند [۱۱]. در سال ۲۰۱۸، فراس^{۱۱} و فادرل^{۱۲} به بررسی خرابی گلوله در اهداف سوراخ‌دار فولادی با تغییر در شکل سوراخ پرداختند. آنها در آزمایش تجربی خود از سوراخ‌های بیضوی و دایره‌ای استفاده کردند [۱۲]. در سال ۲۰۱۹، سیاح و همکاران نیز به ارائه یک مدل تحلیلی برای بررسی نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت ترکیبی سرامیک - فلز پرداختند. مدل تحلیلی آنها، مقدار عمق نفوذ را با دقت خیلی خوبی نسبت به سایر مدل‌ها، پیش‌بینی کرده است [۱۳]. در همین سال سیاح و همکارانش به بررسی مدل‌های تحلیلی نفوذ در اهداف فلزی و سرامیکی پرداختند. آنها در بررسی‌های خود ضمن بیان مدل‌های تحلیلی موجود به دسته‌بندی این مدل‌ها نیز پرداختند. آنها در بخشی از کار

¹ Florence

² Ahrens

³ Woodward

⁴ Den Reijer

⁵ Zaera

⁶ Galvez

⁷ Fellows

⁸ Barton

⁹ Kilic

¹⁰ Ni

¹¹ Fras

¹² Faderl

جدول ۱- حالت‌های برخورد پرتابه با سوراخ در هدف

شماره	شکل پرتابه در قسمت بدون همپوشانی با سوراخ	سطح مقطع همپوشانی پرتابه و سوراخ
۱		0
۲		$1/6 \pi r^2$
۳		$1/4 \pi r^2$
۴		$1/2 \pi r^2$
۵		$2/3 \pi r^2$
۶		$3/4 \pi r^2$
۷		πr^2

به ترتیب محاسبه سطح مقطع پرتابه، ارتباط بین شعاع پرتابه و سوراخ، محاسبه سطح مقطع پرتابه در تماس با سرامیک و محاسبه سطح مقطع پرتابه بدون تماس با سرامیک آمده است.

$$A_0 = \pi(PR)^2 \quad (۱)$$

$$(PR) = 2(HR) \quad (۲)$$

$$A_{PIA} = \pi(PIR)^2 \quad (۳)$$

$$A_{PNIA} = A_0 - A_{PIA} \quad (۴)$$

در این روابط، A_0 ، سطح مقطع پرتابه، PR ، شعاع پرتابه، HR ، شعاع سوراخ، A_{PIA} ، سطح مقطع پرتابه در قسمت برخورد با سرامیک، PIR ، شعاع پرتابه در قسمت برخورد با سرامیک و A_{PNIA} ، سطح مقطع پرتابه در قسمت بدون برخورد با سرامیک است.

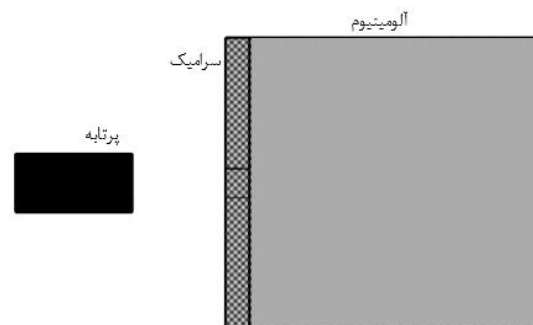
در برخورد پرتابه به سرامیک سوراخ‌دار، بخشی از پرتابه که روی سوراخ قرار می‌گیرد، فرض شده است که بدون هیچ عاملی برای کاهش سرعت و یا سایش آن، به سطح فلز پشتیبان برخورد کند. مساحت مقطع این سطح در جدول ۲ برای هر ۷ حالت نشان داده شده است؛ بنابراین سرعت پرتابه در لحظه برخورد با سرامیک بدون تغییر برای این بخش از

خود نیز به بیان مدل‌های بی بعد برای نفوذ پرتابه در اهداف پرداختند [۱۴].

در این مقاله به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی نفوذ پرتابه سر تخت در اهداف سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت ترکیبی سرامیک - فلز پرداخته شده است. با توجه به پیشینه پژوهش، تاکنون هیچ‌گونه بررسی روی این اهداف انجام نشده است؛ بنابراین هرکدام از بررسی‌های تحلیلی، تجربی و عددی انجام شده در این مقاله دارای نوآوری کامل است.

۲- مدل تحلیلی جدید

در این بخش به ارائه یک مدل تحلیلی جدید برای اهداف سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز پرداخته شده است. شرایط هندسی پرتابه و هدف در شکل ۱ نشان داده شده است. هدف از دولایه سرامیک و فلز تشکیل شده است. لایه جلویی که سرامیک است، دارای یک سوراخ به اندازه نصف قطر پرتابه است.



شکل ۱- نمایی از پرتابه و هدف ترکیبی سوراخ‌دار

از آنجایی که هندسه سطح مقطع پرتابه و سوراخ دایره هستند، بنابراین در برخورد پرتابه با سوراخ، حالت‌های مختلفی وجود دارد. ۷ حالت از بین این حالت‌ها در جدول ۱، در نظر گرفته شده است. برای سایر حالت‌ها نیز می‌توان به همین صورت اقدام نمود که در ادامه بیان شده است.

اولین برخورد پرتابه به هدف، با لایه سرامیک است. در حالتی که سطح مقطع همپوشانی پرتابه و سوراخ، صفر است، با استفاده از مدل اصلاحی فلوز، عمق نفوذ محاسبه می‌گردد [۱۳]. در هرکدام از ۶ حالت دیگر، پرتابه به دو قسمت تقسیم شده است. قسمتی در تماس با سرامیک و قسمتی بدون تماس با سرامیک است. در روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴)

$$X_1 = \dot{X}_{PIB} t \quad (۶)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{X_2}{PD} \right) \quad (۷)$$

$$\beta = 90 - \theta \quad (۸)$$

در این رابطه‌ها، X_1 مقدار نفوذ پرتابه با سرعت محاسبه‌شده برای قسمت در برخورد با سرامیک آن از روابط اصلاح‌شده فلوز، \dot{X}_{PIB} ، سرعت پرتابه برای قسمت در برخورد با سرامیک از روابط اصلاح‌شده فلوز در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان، t مدت‌زمان طی شده، X_2 مسافت باقیمانده تا رسیدن پرتابه به سطح فلز پشتیبان، PD، قطر پرتابه، θ ، زاویه بین پرتابه و سطح افقی، β ، زاویه بین راستای پرتابه و سطح افقی و β زاویه بین راستای پرتابه و سطح قائم است. با عبور پرتابه از سرامیک و رسیدن به پشتیبان فلزی باید همه مشخصات پرتابه معلوم باشند. این مشخصات شامل، سرعت پرتابه، طول پرتابه، زاویه انحراف پرتابه و نفوذ اولیه در پشتیبان است. سرعت و طول پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان با استفاده از یک تابع وزنی به‌دست‌آمده می‌آید. سطح مقطع هر یک از دو قسمت پرتابه کسری از سطح مقطع پرتابه اولیه هستند. سرعت پرتابه در لحظه ورود به فلز پشتیبان از رابطه (۹) به‌دست‌آمده است.

پرتابه، به فلز پشتیبان رسیده است. با حل رابطه (۵)، مقدار این زمان به‌دست‌آمده است.

$$C_t = \dot{X}_p t \quad (۵)$$

در این رابطه C_t ، ضخامت سرامیک، \dot{X}_p ، سرعت برخورد پرتابه و t مدت‌زمان طی شده است.

مهم‌ترین بخش از برخورد پرتابه در اهداف سوراخ‌دار، محاسبه زاویه تمایل پرتابه بعد از برخورد به سوراخ است. در لحظه رسیدن هر دو قسمت پرتابه به فلز پشتیبان، زمان رسیدن پرتابه برای قسمت بدون برخورد با سرامیک و سرعت پرتابه برای قسمت در برخورد با سرامیک مشخص است؛ بنابراین جابجایی پرتابه برای قسمت در برخورد با سرامیک قابل محاسبه است. این مقدار از رابطه (۶) به‌دست‌آمده است؛ بنابراین در یک‌زمان مشخص هر دو قسمت پرتابه با سرعت‌های مختلف، جابجایی‌های متفاوتی نیز خواهند داشت. این جابجایی‌ها در شکل ۲ نشان داده‌شده است. همان‌طور که از روی این شکل مشخص است، زاویه پرتابه نسبت به فلز پشتیبان بعد از برخورد به هدف سوراخ‌دار در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان از رابطه (۷) قابل محاسبه است. با داشتن این زاویه، زاویه تمایل حرکت پرتابه داخل فلز پشتیبان از رابطه (۸) قابل محاسبه است.

جدول ۲- سطح مقطع‌های پرتابه‌های جدید و شعاع معادل پرتابه در برخورد با سرامیک

شماره	سطح مقطع برخورد پرتابه در تماس با سرامیک A_{PIA} (mm^2)	سطح مقطع برخورد پرتابه بدون تماس با سرامیک A_{PNIA} (mm^2)	شعاع معادل برای سطح مقطع برخورد پرتابه با سرامیک a (mm)
۱	$\pi(PR)^2$	0	(PR)
۲	$\frac{23}{24}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{24}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{23}{24}}(PR)$
۳	$\frac{15}{16}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{16}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{15}{16}}(PR)$
۴	$\frac{7}{8}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{8}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{7}{8}}(PR)$
۵	$\frac{5}{6}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{6}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{5}{6}}(PR)$
۶	$\frac{13}{16}\pi(PR)^2$	$\frac{3}{16}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{13}{16}}(PR)$
۷	$\frac{3}{4}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{4}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{3}{4}}(PR)$

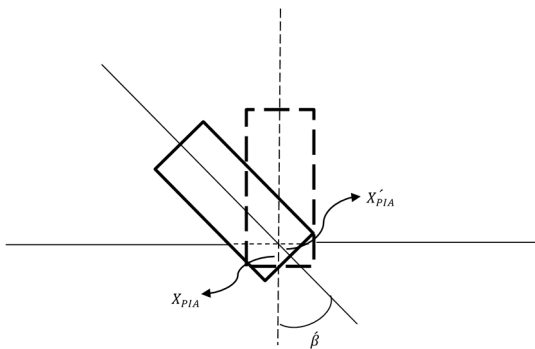
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، این مقدار از رابطه (۱۲) در راستای حرکت جدید پرتابه به دست آمده است. نفوذ اولیه قائم از نظر مقداری بزرگ‌تر از نفوذ مایل است. مشخصاً حرکت مایل پرتابه که موجب اتلاف انرژی بیشتر پرتابه می‌گردد، مقدار عمق نفوذ کمتری خواهد داشت.

$$\dot{X}_{PIA} = X_{PIA} \cos \beta \quad (12)$$

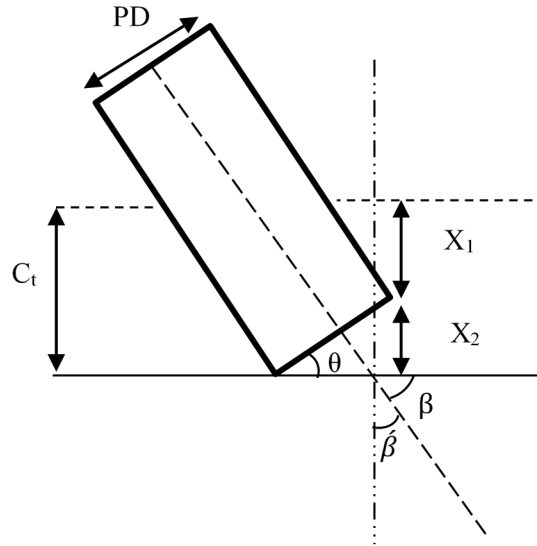
در این رابطه \dot{X}_{PIA} ، عمق مایل نفوذ اولیه پرتابه برای قسمت در برخورد با سرامیک، X_{PIA} عمق عمودی نفوذ اولیه پرتابه برای قسمت در برخورد با سرامیک و β ، زاویه انحراف پرتابه است.

انحراف پرتابه از مسیر اولیه در اثر برخورد پرتابه با سوراخ، موجب حرکت مایل پرتابه به داخل فلز پشتیبان خواهد شد. در مراحل قبل، مشخصات پرتابه تعیین شد؛ بنابراین، سه مرحله برای نفوذ مایل پرتابه در پشتیبان در نظر گرفته شده است؛ مرحله اول تغییر راستای پرتابه از مسیر اولیه با توجه به نیروهایی که بر پرتابه وارد شده است؛ مرحله دوم نفوذ پرتابه با مؤلفه موازی سرعت در راستای نفوذ و به صورت مستقیم در داخل فلز پشتیبان است؛ مرحله سوم معادل‌سازی حرکت پرتابه به داخل فلز پشتیبان با توجه به زاویه انحراف حرکت آن و مشخص نمودن عمق نفوذ نهایی داخل هدف است.

بعد از وارد شدن پرتابه در فلز پشتیبان با توجه به عدم تقارن در نیروهای وارد بر آن، پرتابه مقداری از راستای اولیه خود منحرف می‌گردد. فرض بر این است که تغییر راستا تا زمانی که سطح مقطع پرتابه به صورت کامل وارد فلز پشتیبان گردد، ادامه دارد. در شکل ۴ این تغییر راستا نشان داده شده است.



شکل ۳- نفوذ اولیه پرتابه در فلز پشتیبان



شکل ۲- شرایط پرتابه در لحظه رسیدن به پشتیبان فلزی

$$\dot{X}_{PB} = \frac{1}{\pi(PR)^2} (A_{PIA}\dot{X}_{PIB} + A_{PNIA}\dot{X}_P) \quad (9)$$

در این رابطه \dot{X}_{PB} ، سرعت پرتابه در جلوی پشتیبان است. به همین ترتیب، طول پرتابه نیز در لحظه ورود به فلز پشتیبان از رابطه (۱۰) به دست آمده است.

$$L_{PB} = \frac{1}{\pi(PR)^2} (A_{PIA}L_{PIE} + A_{PNIA}L_{PNI}) \quad (10)$$

در این رابطه، L_{PB} ، طول پرتابه در جلوی پشتیبان، L_{PIE} ، طول پرتابه در قسمت در برخورد با سرامیک و سائیده شده، L_{PNI} ، طول پرتابه در قسمت بدون برخورد با سرامیک است. سطح مقطع پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان با توجه به سایش یکسان سطح مقطع در قسمت برخورد با سرامیک، از رابطه (۱۱) به دست آمده است:

$$A_{PB} = A_{PIA} + A_{PNIA} \quad (11)$$

در این رابطه A_{PB} ، سطح مقطع پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان است.

برای محاسبه نفوذ اولیه باید قسمتی از پرتابه در نظر گرفته شود که در برخورد با سرامیک است. این قسمت بعد از خرد کردن سرامیک و حذف آن، مقداری داخل پشتیبان نفوذ خواهد کرد (X_{PIA}). این مقدار نفوذ با حل انجام شده برای تعیین سرعت و طول پرتابه در قسمت برخورد با سرامیک با مدل اصلاح شده فلوز از مرجع [۱۳]، تعیین خواهد شد؛ بنابراین، قبل از شروع نفوذ مایل پرتابه به داخل فلز پشتیبان، باید این نفوذ در راستای حرکت پرتابه محاسبه گردد.

در این رابطه، X_δ ، جابجایی پرتابه در جهت عمود بر مسیر حرکت به اندازه کمان δ است. تغییرات نیروی مقاوم جانبی نسبت به زمان به صورت خطی فرض شده است. بنابراین نیروی مقاوم جانبی متوسط وارد بر پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ از رابطه (۱۶) به دست آمده است.

$$F_{Per} = \frac{1}{2} F_0 \sin \beta \quad (16)$$

در این رابطه، F_{Per} ، نیروی مقاوم جانبی متوسط وارد بر پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ و F_0 ، نیروی اولیه وارد بر پرتابه است. نیروی اولیه وارد بر پرتابه با استفاده از تئوری انبساط حفره دینامیکی از رابطه (۱۷) به دست آمده است.

$$F_0 = \pi (PR)^2 (AN_1 \sigma_y + BN_2 \rho (\dot{X}_{PB})^2) \quad (17)$$

در این رابطه، A و B ، ثابت‌های تجربی مربوط به جنس هدف، N_1 و N_2 ، ضرایب شکل مربوط به هندسه دماغه پرتابه، σ_y ، تنش تسلیم دینامیکی هدف و ρ ، چگالی هدف است. حال مقدار کار انجام شده در این مسیر بانرژی جنبشی مصرف شده برابر است. از مساوی قرار دادن آنها که در رابطه (۱۸) آمده است، مقدار δ ، طبق رابطه (۱۹) بدست آمده است.

$$F_{Per} X_\delta = \frac{1}{2} M_{PB} (\dot{X}_{Per})^2 \quad (18)$$

$$\sin^2 \delta = \delta (\sin \beta) \frac{\pi}{4} [\tan(\beta + \delta)] \left(\frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \quad (19)$$

در این رابطه‌ها، M_{PB} ، جرم پرتابه در لحظه رسیدن به پشتیبان و I و N ، کمیت‌های بدون بعد هستند. با یک ساده‌سازی می‌توان رابطه (۱۹) را در فرم رابطه (۲۰) نوشت.

$$\delta = (\sin \beta) \frac{\pi}{4} [\tan(\beta)] \left(\frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \quad (20)$$

I و N ، کمیت‌های بدون بعد به‌عنوان تابع برخورد و تابع هندسی هستند که با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲) تعریف شده است.

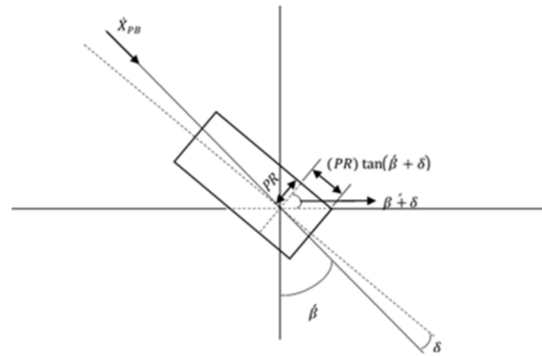
$$I = \frac{\lambda \phi_J}{AN_1} \quad (21)$$

$$N = \frac{\lambda}{BN_2} \quad (22)$$

در این رابطه‌ها، ϕ_J ، عدد تخریب جانسون است که از رابطه (۲۳) و λ ، جرم بی‌بعد شده پرتابه است که از رابطه (۲۴)، به دست آمده است.

$$\phi_J = \frac{\rho (\dot{X}_{PB})^2}{\sigma_y} \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{M_{PB}}{\rho (PD)^3} \quad (24)$$



شکل ۴- تغییر راستای پرتابه بعد از وارد شدن در فلز پشتیبان

برای محاسبه مقدار δ ، باید عاملی مشخص گردد که باعث این تغییر در راستای حرکت پرتابه شده است. سرعت اولیه پرتابه بعد از وارد شدن کامل سطح مقطع پرتابه و تغییر راستای آن به دو مؤلفه تجزیه شده است. یک مؤلفه در راستای حرکت (\dot{X}_{Par}) و یک مؤلفه عمود بر راستای حرکت (\dot{X}_{Per}) است. در روابط (۱۳) و (۱۴) این دو مؤلفه مشخص شده است.

$$\dot{X}_{Par} = \dot{X}_{PB} \cos \delta \quad (13)$$

$$\dot{X}_{Per} = \dot{X}_{PB} \sin \delta \quad (14)$$

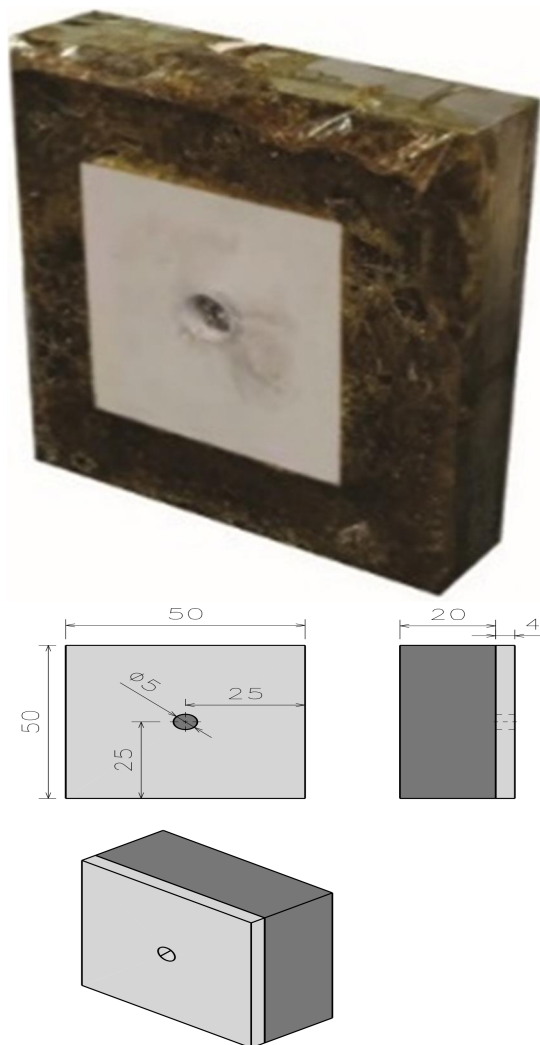
در این رابطه‌ها، δ ، تغییر راستای پرتابه بعد از نفوذ به داخل پشتیبان فلزی است.

مؤلفه سرعت عمود بر مسیر حرکت باعث چرخش پرتابه و مؤلفه موازی مسیر حرکت باعث نفوذ پرتابه می‌گردد. بعد از وارد شدن کامل سطح مقطع پرتابه، دیگر تغییر راستای پرتابه اتفاق نمی‌افتد؛ بنابراین مؤلفه عمودی سرعت صفر است. به عبارت دیگر، انرژی جنبشی پرتابه در اثر مؤلفه سرعت عمودی تبدیل به چرخش پرتابه به اندازه δ شده است؛ بنابراین از مساوی قرار دادن این انرژی جنبشی با مقدار کار مصرفی در این مسیر، میزان چرخش پرتابه بدست می‌آید [۱۵]. کار انجام شده توسط پرتابه در مسیر چرخش از رابطه (۱۵) بدست می‌آید. با توجه به کوچک بودن زاویه از یک تقریب نیز استفاده شده است. باید توجه داشت که مقدار نفوذ اولیه که پیش از چرخش و تغییر راستا است، از مقدار فرض شده برای نفوذ تا لحظه چرخش کم شود.

$$X_\delta = [(PR) \tan(\beta + \delta) - X_{PIA} \cos \delta] \delta \quad (15)$$

۳- آزمایش تجربی

هدف مورد آزمایش در این مقاله از دو بخش سرامیک سوراخدار و آلومینیوم تشکیل شده است. برای ساخت سرامیک، مواد اولیه به صورت پرس شده و خام از شرکت آلومین سرام نگین در شهر یزد تهیه شده است. بعد از ایجاد هندسه مورد نظر روی این مواد، مجدد آنها برای پخت به شرکت ارسال شده است. سرامیک برگشت داده شده از جنس آلومینا ۸۵٪ بوده است. برای ساخت پشتیبان از آلومینیوم Al (Hardness: 76 RB) 7039 استفاده شده است. این آلومینیوم با توجه به نرم بودن و در دسترس بودن انتخاب شده است. در شکل ۶ نمایی از هدف ساخته شده نشان داده شده است. برای



شکل ۶- نمایی از هدف مونتاژ شده و ابعاد آن به میلی‌متر

بدین ترتیب مقدار انحراف پرتابه از راستای اولیه نفوذ محاسبه می‌شود. چن و همکاران در سال ۲۰۰۳ به محاسبه ضرایب N_1 و N_2 برای پرتابه‌ها با شکل‌های دماغه متفاوت پرداختند. آنها برای پرتابه تخت این ضرایب را برابر یک در نظر گرفتند [۱۶].

با مشخص شدن مقدار انحراف پرتابه در بخش قبل، مؤلفه سرعت موازی مسیر حرکت نیز تعیین می‌گردد. با داشتن سرعت پرتابه و سایر مشخصات آن از جمله سطح مقطع، جرم و طول، از طریق مدل فلوز اصلاح شده [۱۳]، مقدار عمق نفوذ مستقیم بدست می‌آید. برای استفاده از این مدل باید از آنجایی شروع به محاسبه کرد که سرامیک به طور کامل سائیده شده است.

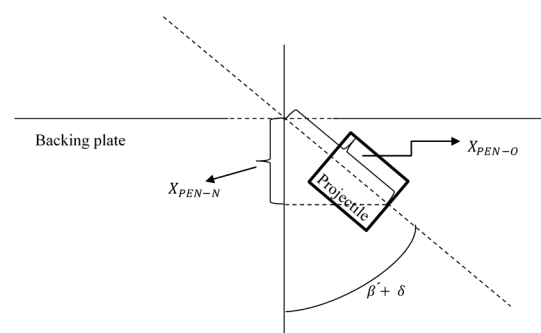
عمق نفوذ به دست آمده از مدل اصلاح شده فلوز (X_{OP}) ، برای نفوذ مستقیم پرتابه داخل فلز پشتیبان است. برای تعیین عمق نفوذ نهایی باید این عمق نفوذ به راستای اولیه پرتابه قبل از برخورد تبدیل گردد. عمق نفوذ اولیه در راستای جدید از رابطه (۲۵) بدست می‌آید. عمق نفوذ نهایی مایل از رابطه (۲۶) و عمق نفوذ عمودی از رابطه (۲۷) به دست آمده است. در شکل ۵ مقادیر عمق عمودی و مایل نفوذ نهایی نشان داده شده است.

$$X_{PIA}'' = X_{PIA} \cos(\beta + \delta) \quad (25)$$

$$X_{PEN-O} = X_{PIA}'' + X_{OP} \quad (26)$$

$$X_{PEN-N} = X_{PEN-O} \cos(\beta + \delta) \quad (27)$$

در این رابطه‌ها، X_{OP} نفوذ مایل پرتابه در پشتیبان فلزی بعد از نفوذ اولیه، X_{PIA}'' نفوذ اولیه در جهت انحراف نهایی پرتابه، X_{PEN-N} عمق عمودی نفوذ نهایی و X_{PEN-O} عمق مایل نفوذ نهایی است.



شکل ۵- عمق عمودی و مایل نفوذ نهایی پرتابه

هدف اصلی این مقاله دستیابی به یک مدل تحلیلی مناسب بوده است و نتایج تجربی به منظور مقایسه استفاده شده است. در ادامه از این نتایج برای اعتبارسنجی داده‌های عددی استفاده شده است. نتایج تجربی در جدول ۳ آمده است.

۴- شبیه‌سازی عددی

در این بخش به شبیه‌سازی عددی، آزمایش‌های تجربی انجام شده در بخش قبل پرداخته شده است. به طوری کلی نتایجی که در این بخش به دست آمده است، در جهت صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج تجربی بکار رفته است تا در بخش توسعه شبیه‌سازی عددی، سایر نتایج لازم برای بررسی اعتبار مدل‌های تحلیلی استخراج گردد. فرآیند شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است.

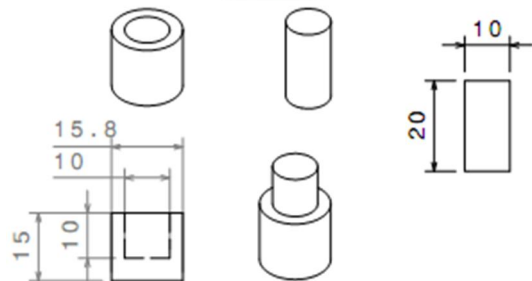


شکل ۸- نمایی از دستگاه تفنگ گازی



شکل ۹- نمایی از هدف پس از برخورد پرتابه با سرعت ۲۴۱ متر بر ثانیه

ساخت پرتابه از فولاد AISI 4340 (Hardness: 30 RC) استفاده شده است. به منظور استفاده از این پرتابه‌ها در دستگاه تفنگ گازی با توجه به ابعاد لوله آن، نیاز بوده است تا یک سابوت^۱ در اطراف پرتابه قرار داده شود. در شکل ۷، ابعاد سابوت و نحوه قرارگیری پرتابه در آن نشان داده شده است. آزمایش تجربی در آزمایشگاه بالستیک و انفجار دانشگاه امام حسین (ع) انجام شد. در شکل ۸ نمایی از دستگاه تفنگ گازی در این آزمایشگاه نشان داده شده است. حداکثر سرعت برخورد پرتابه در حدود ۲۵۰ متر بر ثانیه بود. در شکل ۹ نمایی از هدف بعد از برخورد پرتابه نشان داده شده است.

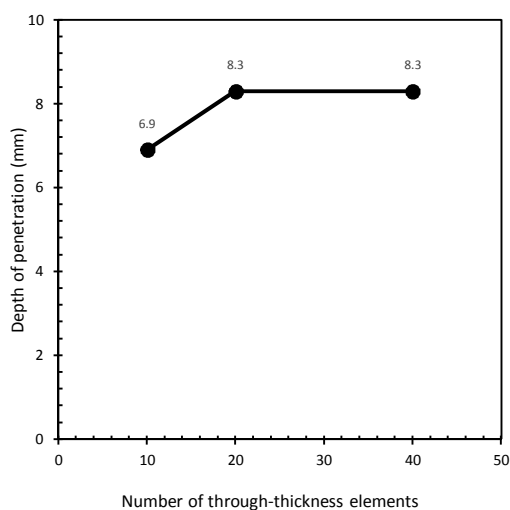


شکل ۷- نمای کلی از پرتابه تخت و سابوت و ابعاد آنها به میلی‌متر

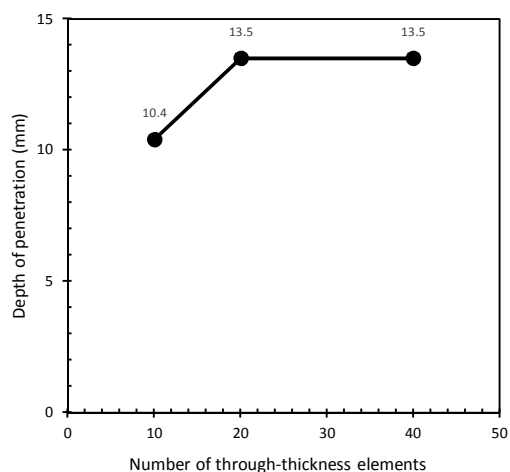
^۱ Sabot

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های تجربی و تعیین عمق نفوذ

ردیف	نوع هدف	محل برخورد	ضخامت سرامیک (mm)	ضخامت آلومینیوم (mm)	جرم پرتابه (gr)	جرم سابوت (gr)	سرعت برخورد (m/s)	عمق نفوذ در پشتیبان (mm)
۱	بدون سوراخ	وسط هدف	۴	۲۰	۱۲	۲/۰۱	۲۳۵	۰/۹
۲	بدون سوراخ	وسط هدف	۴	۲۰	۱۲/۰۲	۲/۰۲	۲۴۱	۱/۰۵
۳	بدون سوراخ	وسط هدف	۴	۲۰	۱۲	۲/۰۱	۲۵۱	۱/۰۹
۴	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۱۲/۰۴	۱/۹۸	۲۳۰	۱/۰۲
۵	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۱۲/۰۱	۲/۰۳	۲۵۸	۱/۲۵



شکل ۱۰- بررسی همگرایی برای هدف بدون سوراخ



شکل ۱۱- بررسی همگرایی برای هدف سوراخ‌دار

۴-۱- هندسه، شرایط مرزی و حساسیت به مش

هندسه مربوط به پرتابه و هدف با توجه به آزمایش‌ها انجام شده، به دو نمونه تقسیم شده است. ضخامت سرامیک در این نمونه‌ها ۴ میلی‌متر و ضخامت آلومینیوم ۲۰ میلی‌متر است. اطراف هدف کاملاً بدون حرکت و مقید شده است. پرتابه نیز با آزادی حرکت در تمامی جهات در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن موجود در مدل هندسی و نیز شرایط مرزی، از شرایط تقارن برای مدل‌سازی استفاده شده است.

المان‌های استفاده شده در این تحلیل از نوع جامد سه‌بعدی، ۸ گره‌ای و با حل انتگرال کاهش یافته (C3D8R) است. با توجه به شرایط هدف که دو نمونه سوراخ‌دار و بدون سوراخ است، در دو نمودار جداگانه این بررسی‌ها انجام شده است. برای هر دو نمونه، المان‌ها به سه نوع تقسیم شده است. در نمونه اول که هدف بدون سوراخ است، حجم المان‌ها در این سه نوع به صورت $2 \times 2 \times 0.4$ (مش درشت)، $1 \times 1 \times 0.2$ (مش متوسط) و $0.5 \times 0.5 \times 0.1$ (مش ریز) است. در نمونه دوم که هدف سوراخ‌دار است، با تغییر در نوع آرایش المان‌ها، ابتدا دایره‌های هم‌مرکزی با سوراخ روی سرامیک تا انتهای ایجاد شد. سپس از المان‌های گوه‌ای برای هر ربع دایره استفاده شد. در این حالت نیز با تغییر تعداد المان‌ها در راستای ضخامت، همگرایی مش بررسی شده است. برای بررسی همگرایی مش، مقدار عمق نفوذ در سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. تعداد المان‌ها برای هر دو نمونه در راستای ضخامت برای این سه نوع المان به ترتیب برابر ۱۰، ۲۰ و ۴۰ بوده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نتیجه

ϵ_{pl}^D کرنش مربوط به شروع تخریب، D_1 تا D_5 ضرایب ثابت مربوط به آزمایش، η نسبت سه محوره بودن تنش^۲، ϵ_{pl}^D نرخ کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش مربوط به اندازه‌گیری ثابت‌های آزمایش و $\hat{\theta}$ دمای فلز است. در رابطه (۳-۵)، برکت اول نشان‌دهنده تأثیر مقدار η بر ϵ_{pl}^D است. برکت دوم نشان‌دهنده تأثیر نرخ کرنش بر ϵ_{pl}^D است. برکت سوم نیز تأثیر دما بر ϵ_{pl}^D را نشان می‌دهد. در جداول ۴، ۵، ۶ و ۷ مقادیر معادله جانسون - کوک، ثابت‌های خواص مواد و ثابت‌های پارگی جانسون - کوک وارد شده در نرم‌افزار برای فلز پشتیبان و پرتابه، آورده شده است.

صفحه جلوی هدف از جنس سرامیک است، این ماده بسیار سخت و ترد است. استحکام ماده برحسب تنش فون مایسز معادل بی‌بعد شده به‌صورت رابطه (۳۱) توسط جانسون هالمکوئیست بیان شده است [۱۸ و ۱۹].

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (31)$$

در آن σ_i^* ، تنش معادل بقای بی‌بعد، σ_f^* ، تنش معادل شکست بی‌بعد و D متغیر آسیب است. این تنش‌های گفته‌شده دارای فرم کلی، $\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL}$ هستند که در آن σ تنش معادل فون مایسز واقعی و σ_{HEL} ، تنش معادل در حد الاستیک است. جدول ۸ ثوابت مدل جانسون - هالمکوئیست برای ماده آلومینا ۸۵٪ را نشان می‌دهد. در جدول ۹ پارامترهای ماده مربوط به مدل پلاستیسیته دراگر - پراگر و معادله حالت مای گرونایزن فرم خطی برای ماده آلومینا ۸۵٪ آمده است.

۳-۴ صحت سنجی مدل شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج فرآیند شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در هدف نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز با نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده، مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. در شکل ۱۲ میزان اختلاف نتایج عددی با نتایج تجربی نشان داده شده است. در شکل ۱۳ مراحل نفوذ پرتابه در هدف سوراخ‌دار برای حالت ۴ در سرعت ۹۰۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. به‌منظور مقایسه در جدول ۱۰، نتایج مدل تحلیلی جدید با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است.

بررسی‌های حساسیت به مش برای این دو نمونه نشان داده شده است. مش استفاده با توجه به نتایج به دست آمده، مش متوسط بوده است.

۴-۲- مدل‌سازی رفتار هدف و پرتابه

رفتار پرتابه و هدف به‌صورت تغییر شکل‌پذیر مدل شده است. در این مدل‌سازی از معادله جانسون - کوک برای مدل کردن رفتار پرتابه و پشتیبان فلزی و معادله پلاستیسیته دراگر - پراگر و معادله حالت مای - گرونایزن برای مدل کردن رفتار سرامیک استفاده شده است. رفتار پرتابه و هدف به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که المان‌ها در صورت افزایش مقدار انرژی آنها، از سطح ماده حذف شوند. مدل جانسون - کوک برای پرتابه و پشتیبان از روابط (۲۸) و (۲۹) بدست می‌آیند [۱۷].

$$\sigma^{pl} = [A + B(\epsilon^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 - \hat{\theta}^m] \quad (28)$$

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & : \theta < \theta_{Tran} \\ \frac{\theta - \theta_{Tran}}{\theta_{melt} - \theta_{Tran}} & : \theta_{Tran} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & : \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (29)$$

در این رابطه θ دمای فلز، θ_{melt} دمای ذوب فلز و θ_{Tran} دمایی است که دماهای کمتر از آن تأثیری بر تنش سیلان فلز نخواهد داشت. $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنشی است که مقادیر A ، B و n در آن نرخ، اندازه‌گیری می‌شوند. این سه ثابت با آزمون کشش استاتیکی تعیین می‌شوند و به همین دلیل به آنها ثوابت شبه استاتیکی می‌گویند. C و m نیز توسط آزمون‌های پیچش در نرخ کرنش‌های و دماهای متفاوت و آزمون فشار میله هاپکینسون^۱ تعیین می‌شوند. مقدار کرنش شروع شکست از رابطه (۳۰) محاسبه می‌گردد.

$$\epsilon_{pl}^D = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}} \right) \right] [1 + D_5 \hat{\theta}] \quad (30)$$

² Triaxiality

¹ Hopkinson Bar

جدول ۴- ثوابت مدل جانسون - کوک برای آلومینیوم [۲۰ و ۲۱]

ρ (kg/m ³)	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	m	C	n	B (MPa)	A (MPa)
۲۷۰۰	۱	۱/۳۴	۰/۰۰۲	۰/۴۲	۱۱۴	۳۲۴

جدول ۵- ثابت‌های گسیختگی ماده برای آلومینیوم [۲۰ و ۲۱]

σ_{BES} (MPa)	ν	E (GPa)	G (GPa)	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
۴۰۰	۰/۳۳	۶۸	۲۶	-۰/۷۷	۱/۴۵	-۰/۴۷	۰	۱/۶

جدول ۶- ثوابت مدل جانسون - کوک برای تانتالیوم [۲۲]

ρ (kg/m ³)	$\dot{\epsilon}$	m	C	n	B (MPa)	A (MPa)
۱۶۶۵۰	۳۵۰۰	۰/۴۲۵	۰/۱	۰/۷۸	۲۰۵/۳	۶۸۴/۵

جدول ۷- ثابت‌های گسیختگی ماده برای تانتالیوم [۲۲]

σ_{PES} (MPa)	ν	E (GPa)	G (GPa)	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
۹۰۰	۰/۳۵	۱۸۶	۶۹	۰/۷	۰/۳۲	-۱/۵	۰	۰

جدول ۸- ثابت‌های مدل جانسون - هالمکوئیست برای آلومینا ۸۵٪ [۲۳]

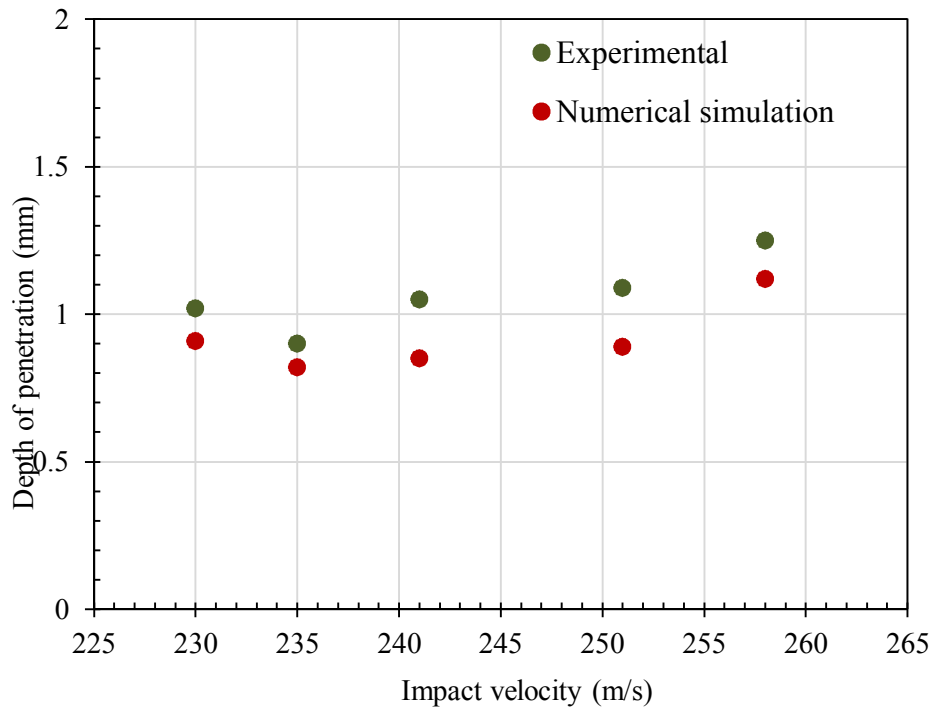
ρ (kg/m ³)	T (GPa)	P_{HEL} (GPa)	G (GPa)	D1	D2	K ₁	K ₂	K ₃
۳۴۲۰	۰/۱۵۵	۱/۹۳	۹۰	۰/۰۵	۱	۱۳۸	۰	۰

ادامه جدول ۸

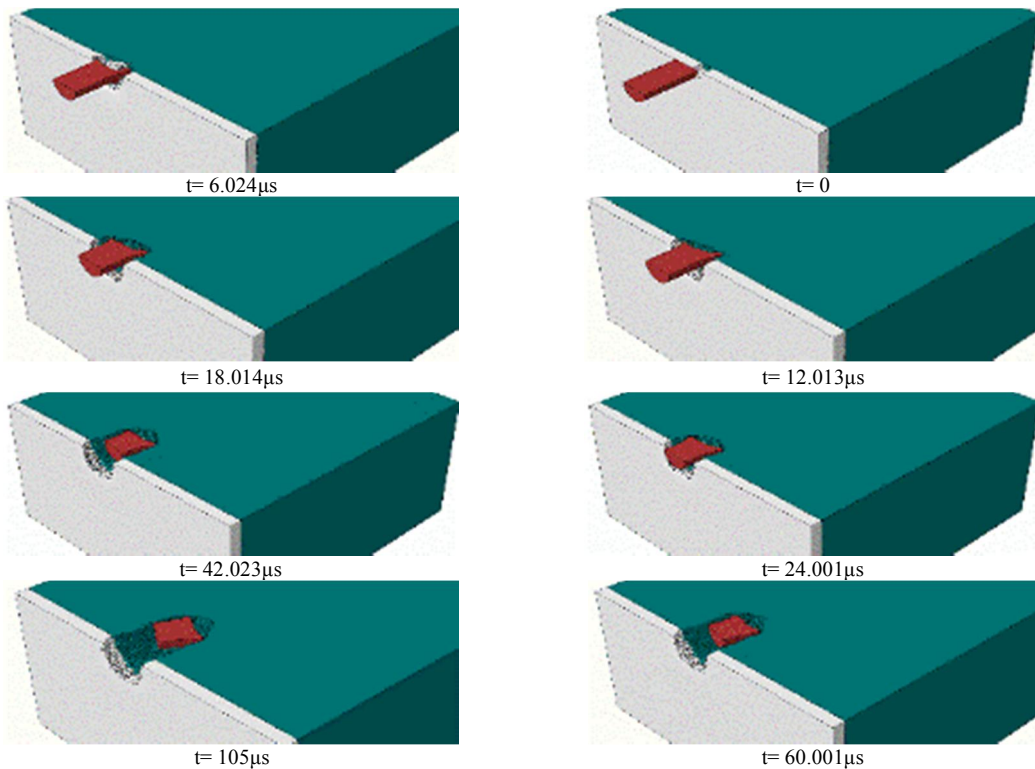
HEL (GPa)	$\dot{\epsilon}$	M	C	N	B	A
۶	۱	۰/۶	۰	۰/۶۴	۰/۲۸	۰/۸۸

جدول ۹- ثوابت معادله حالت و مدل پلاستیسیته آلومینا ۸۵٪

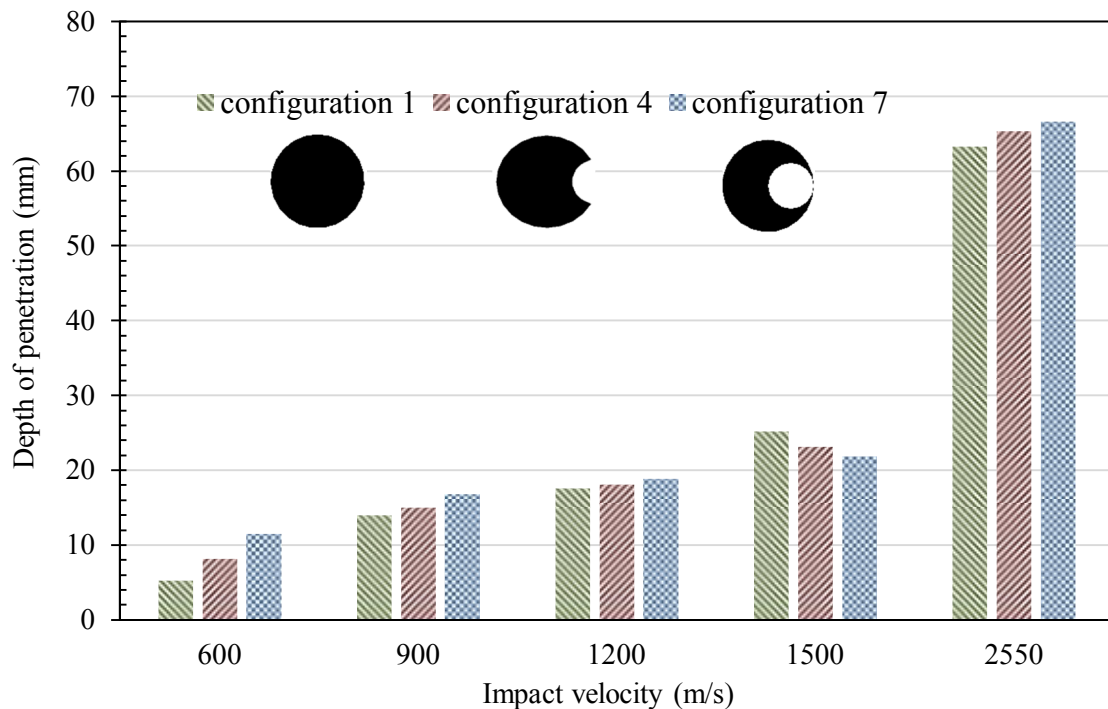
Fracturen Energy	σ_c (MPa)	Γ_0	c_0 (m/s)	s	b	a
۰	۵۴۴۱/۱۵	۰	۶۳۵۲/۲۳۴۰۳۲	۰/۵	۱/۵۶۲۵	$۱/۲۰۸۲۸۴ \times ۱۰^{-۶}$



شکل ۱۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی



شکل ۱۳- مراحل نفوذ پرتابه در هدف سوراخ‌دار برای حالت ۴ در سرعت ۹۰۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۴- مقایسه عمق نفوذ در برخورد پرتابه به هدف سوراخ‌دار سرامیک - آلومینیوم در ۳ حالت مختلف با شبیه‌سازی عددی

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت ترکیبی سرامیک - فلز پرداخته شد. در ادامه نتایج مهم حاصل از این پژوهش آمده است.

در بخش شبیه‌سازی عددی در مرحله دوم به اعتبارسنجی داده‌ها با نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده، پرداخته شد. نتایج مدل عددی نیز مانند نتایج تجربی از یک الگو مشخص و مشابه، مقدار عمق نفوذ را در سرعت‌های مختلف محاسبه کرده است و اختلاف کمی بین نتایج وجود دارد.

در شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در هدف سوراخ‌دار، در سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه، حالت ۱، کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۹۰۰ متر بر ثانیه، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۱۲۰۰ متر بر ثانیه مقادیر عمق نفوذ تقریباً برابر بودند با این حال، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، حالت ۷ کمترین عمق نفوذ و حالت ۱ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۲۵۵۰ متر بر ثانیه، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند.

عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۲۵۵۰ متر بر ثانیه، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند.

- با تقسیم سرعت‌های برخورد پرتابه به هدف در سه بخش سرعت‌پایین (۶۰۰ متر بر ثانیه)، سرعت متوسط (۱۵۰۰ متر بر ثانیه) و سرعت‌بالا (۲۵۵۰ متر بر ثانیه) مشاهده می‌گردد که کمترین عمق نفوذ در سرعت‌های پایین مربوط به حالت ۱ است و با افزایش همپوشانی پرتابه با سوراخ، این عمق نفوذ افزایش پیدا کرده است. به طوری که حالت ۷، بیشترین عمق نفوذ را در این سرعت دارد. با افزایش سرعت و رسیدن به سرعت‌های متوسط، تقریباً مقادیر عمق نفوذ برابر شده است. با این حال، کمترین عمق نفوذ مربوط به حالت ۷ و بیشترین عمق نفوذ مربوط به حالت ۱ است؛ بنابراین با افزایش سرعت از سرعت‌های پایین تا سرعت‌های متوسط، با افزایش همپوشانی پرتابه با سوراخ، مقدار عمق نفوذ با شدت کمتری افزایش پیدا می‌کند که موجب شده تا حالت ۷ کمترین عمق نفوذ را داشته باشد. با افزایش سرعت و رسیدن به سرعت‌های بالا، مقادیر عمق نفوذ مانند سرعت‌های پایین شده است. بدین ترتیب که حالت ۱، کمترین عمق نفوذ و حالت ۷، بیشترین عمق نفوذ دارد.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت ترکیبی سرامیک - فلز پرداخته شد. در ادامه نتایج مهم حاصل از این پژوهش آمده است.

در بخش شبیه‌سازی عددی در مرحله دوم به اعتبارسنجی داده‌ها با نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده، پرداخته شد. نتایج مدل عددی نیز مانند نتایج تجربی از یک الگو مشخص و مشابه، مقدار عمق نفوذ را در سرعت‌های مختلف محاسبه کرده است و اختلاف کمی بین نتایج وجود دارد.

در شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه در هدف سوراخ‌دار، در سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه، حالت ۱، کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۹۰۰ متر بر ثانیه، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۱۲۰۰ متر بر ثانیه مقادیر عمق نفوذ تقریباً برابر بودند با این حال، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، حالت ۷ کمترین عمق نفوذ و حالت ۱ بیشترین عمق نفوذ را داشتند. در سرعت ۲۵۵۰ متر بر ثانیه، حالت ۱ کمترین عمق نفوذ و حالت ۷ بیشترین عمق نفوذ را داشتند.

جدول ۱۰- مقایسه نتایج مدل تحلیلی جدید و شبیه‌سازی‌های عددی

ردیف	نوع هدف	محل برخورد	ضخامت		سرعت برخورد (m/s)	عمق نفوذ در پشتیبان (mm)	
			سرامیک (mm)	آلومینیوم (mm)		تحلیلی	عددی
۱	سوراخ‌دار	حالت ۱	۴	۲۰	۶۰۰	۸/۲۴۵	۵/۳۳۱
۲	سوراخ‌دار	حالت ۱	۴	۲۰	۹۰۰	۱۷/۳۶۱	۱۴/۰۸۲
۳	سوراخ‌دار	حالت ۱	۴	۲۰	۱۲۰۰	۲۱/۶۵۷	۱۷/۶۴۵
۴	سوراخ‌دار	حالت ۱	۴	۲۰	۱۵۰۰	۲۹/۸۴۲	۲۵/۲۲۴
۵	سوراخ‌دار	حالت ۱	۴	۲۰	۲۵۵۰	۵۵/۹۲۴	۶۳/۳۴۰
۶	سوراخ‌دار	حالت ۴	۴	۲۰	۶۰۰	۱۴/۵۸۳	۸/۲۶۶
۷	سوراخ‌دار	حالت ۴	۴	۲۰	۹۰۰	۱۹/۷۴۹	۱۵/۱۰۲
۸	سوراخ‌دار	حالت ۴	۴	۲۰	۱۲۰۰	۲۳/۴۲۶	۱۸/۱۷۳
۹	سوراخ‌دار	حالت ۴	۴	۲۰	۱۵۰۰	۲۶/۹۲۰	۲۳/۱۹۸
۱۰	سوراخ‌دار	حالت ۴	۴	۲۰	۲۵۵۰	۵۷/۶۰۳	۶۵/۴۴۰
۱۱	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۶۰۰	۱۶/۰۰۵	۱۱/۵۷۸
۱۲	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۹۰۰	۲۱/۱۴۲	۱۶/۸۴۲
۱۳	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۱۲۰۰	۲۳/۸۶۳	۱۸/۹۲۰
۱۴	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۱۵۰۰	۲۵/۰۲۳	۲۱/۹۰۸
۱۵	سوراخ‌دار	حالت ۷	۴	۲۰	۲۵۵۰	۵۹/۰۸۳	۶۶/۶۷۸

موجب می‌گردد که پرتابه در یک مسیر مستقیم نفوذ کند و ایجاد سوراخ موجب انحراف کم‌تر آن گردد؛ بنابراین در این حالت وجود سرامیک اهمیت پیدا می‌کند.

- بررسی زاویه تمایل پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان در دو روش تحلیلی و عددی انجام شد.

- در برخورد پرتابه به هدف سوراخ‌دار، با افزایش سرعت برخورد پرتابه به سرامیک در حالت‌های همپوشانی پرتابه با سوراخ، مقدار زاویه تمایل کاهش می‌یابد.

- با افزایش سرعت از مقادیر پایین تا متوسط، زاویه تمایل اهمیت بیشتری دارد و با افزایش همپوشانی پرتابه با سوراخ، موجب کاهش عمق نفوذ می‌گردد. با افزایش سرعت از مقادیر متوسط تا بالا، همپوشانی پرتابه با سرامیک اهمیت دارد و با افزایش این همپوشانی، مقدار عمق نفوذ کاهش می‌یابد.

- با افزایش سرعت برخورد پرتابه به هدف (مقادیر بالا)، مقاومت سرامیک در مقابل نفوذ پرتابه کاهش می‌یابد و این

- layered pyramidal lattice truss structures filed with ceramic insertions. *J Thermoplast Compos Mater* 30(8): 1136-1156.
- [11] Kılıç N, Ekici B, Bedir S (2017) Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods. *Mech Adv Mater Struc* 24: 615-624.
- [12] Fras T, Faderl N (2018) Influence of Add-On Perforated Plates on the Protective Performance of Light-Weight Armour Systems. *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa* 9.
- [13] Badkhor MS, vahedi k, Oskouei AN (2019) Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic - metal semi-infinite targets. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(2): 31-45.
- [14] Badkhor MS, vahedi k, Oskouei AN (2019) Evaluation of the projectile penetration models in the metal and ceramic targets. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(4):77-92.
- [15] Chen X, Li Q, Fan S (2006) Oblique perforation of thick metallic plates by rigid projectiles. *Acta Mech Sinica* 22: 367-376.
- [16] Chen X, Li Q (2003) Perforation of a thick plate by rigid projectiles. *Int J Impact* 28: 743-759.
- [17] Johnson GR (1983) A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc 7th Inf Sympo Ballistics* 541-547.
- [18] Nordendale N A (2013) Modeling and simulation of brittle armors under impact and blast effects. Vanderbilt University.
- [19] Johnson GR, Holmquist TJ (1994) An improved computational constitutive model for brittle materials. *AIP Conference Proceedings* 981-984.
- [20] Johnson GR (1983) A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc 7th Inf Sympo Ballistics* 541-547.
- [21] Johnson GR, Holmquist TJ (1989) Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, Report No. LA-11463-MS.
- [22] List G, Sutter G, Arnoux JJ (2013) Analysis of the high speed sliding interaction between titanium alloy and tantalum. *Wear* 301: 663-670.
- [23] Holmquist T, Templeton D, Bishnoi K (1999) A ceramic armor material database. Tacom Research Development And Engineering Center Warren Mi.
- در اهداف سوراخ‌دار با افزایش همپوشانی پرتابه با سوراخ، مقدار زاویه تمایل افزایش می‌یابد. این افزایش در سرعت‌های پایین بیشتر نیز است.
- در اهداف سوراخ‌دار با افزایش ضخامت سرامیک، مقدار زاویه تمایل نیز افزایش می‌یابد. در واقع قسمت در تماس با سرامیک پرتابه، برای رسیدن به فلز پشتیبان باید مسافت بیشتری را در حال کاهش سرعت طی کند؛ بنابراین در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان تمایل بیشتر در پرتابه ایجاد می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] Florence AL, Ahrens T (1967) Interaction of projectiles and composite armor. *Stanford Res Inst Menlo Park Ca* 111-124.
- [2] Tate A (1967) A theory for the deceleration of long rods after impact. *J Mech Phys Solids* 15: 387-399.
- [3] Woodward RL (1990) A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *Int J Impact Eng.* 9: 455-474.
- [4] Den Reijer PC (1991) Impact on ceramic faced armour. TU Delft, Delft University of Technology.
- [5] Zaera R, Sánchez-Gálvez V (1998) Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *Int J Impact Eng* 21: 133-148.
- [6] Fellows N, Barton P (1999) Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour. *Int J Impact Eng* 22: 793-811.
- [7] Kılıç N, Bedir S, Erdik A, Ekici B, Taşdemirci A, Güden M (2014) Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Mater Design* 63: 427-438.
- [8] Tahmaseiabdar M, Liaghat G, Shanazari H, Khodadadi A, Hadavinia H, Abotorabi A (2015) Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting a modified theory. *Modares Mech Eng* 15: 353-359. (In Persian)
- [9] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Wall Struc* 112: 118-124.
- [10] Ni C, Hou R, Han B, Jin F, Ma G, Lu T (2017) Normal and oblique projectile impact of double-