بررسی نفوذ پرتابه سرعت بالا در اهداف فلزی- سرامیکی

مهدی کاظمی[1*]، سجاد اسمعیلی[2]، مهدی عسکری سده[3]

[1] دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، [2] مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، [3] مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

دکتر مهدی کاظمی، نویسنده‌ی اول مقاله، عضو هیات علمی دانشگاه ملایر

* kazemi@malayeru.ac.ir

چکیده: در این تحقیق به تحلیل اجزای محدود نفوذ پرتابه در اهداف فلزی- سرامیکی پرداخته شده است. پرتابه مورد نظر در این مقاله، پرتابه استوانه ای سر مخروطی می‌باشد. آنچه در این تحقیق دنبال می‌شود به دست آوردن سرعت پرتابه پس از عبور از هدف و همچنین میزان جذب انرژی می‌باشد. برای شبیه سازی پدیده نفوذ در تحلیل اجزای محدود، از مدل جانسون-کوک و جانسون-هولمکوئیست[1] استفاده شد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از نتایج برگرفته از مقالات، مدل رفتاری و پارامترهای آن صحت سنجی شده و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردید. پس از اطمینان از صحت نتایج تحلیل عددی، برخورد پرتابه با اهداف آلومینیومی، فولادی، سرامیکی، سرامیکی- فولادی، سرامیکی- آلومینیومی، آلومینیومی- سرامیکی و فولادی – سرامیکی با فرض مساوی بودن جرم اهداف در همه حالات ذکر شده، شبیه سازی شده و نتایج آن ارائه گردید. بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده شد که در میان کلیه حالات در نظر گرفته شده، هدف سرامیکی- آلومینیومی بیشترین جذب انرژی را دارد و میزان جذب انرژی آن ۴/۵ برابر بیشتر از هدف آلومینیومی با جرم یکسان است.

کلمات کلیدی: نفوذ؛ برخورد پرتابه؛ جذب انرژی؛ شبیه‌سازی عددی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از صفحات فلزی- سرامیکی درصنایع هوافضا، نظامی، کشتیرانی و خودروسازی گسترش زیادی داشته است. این صفحات که به خاطر سبکی و استحکام معمولا ازجنس آلیاژهای فولاد یا آلومینیوم در کنار سرامیک‌ها هستند، در بدنه تانک‌ها، هواپیما، کشتی و خودرو به کار می‌روند. از سرامیک‌ها به علت چگالی پایین و سختی بالا در صفحات استفاده می‌شود. حفظ ایمنی این صفحات در برابر شلیک پرتابه یک مسئله مهم و حائز اهمیت است. یکی از روش‌های مورد استفاده جهت بررسی ایمنی این صفحات، بررسی میزان سرعت پرتابه پس ازخروج از این اهداف است. به همین منظور تاکنون پژوهش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی زیادی در زمینه برخورد پرتابه به صفحات فلزی انجام شده است. از سرامیک‌ها به عنوان صفحه جلویی در اهداف مرکب استفاده می‌شود. ماده پشتی نیز می‌تواند فلز یا صفحه کامپوزیتی باشد. در واقع نقش اصلی سرامیک سایش پرتابه می‌باشد و بار ناشی از ضربه را روی ناحیه وسیعی از لایه پشتی توزیع می‌کند و از نفوذ پرتابه در صفحه پشتی جلوگیری می‌کند. بنابراین اهداف ترکیبی به همراه سرامیک‌ها می‌تواند به دلیل بالا بودن مدول یانگ سرامیک‌ها سبب فرسایش در پرتابه و درنهایت به تاخیر انداختن نفوذ در هدف شود. فورستال و همکارانش در سال ۱۹۹۸، نفوذ پرتابه در آلیاژ های آلومینیوم را به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. همچنین در سال ۱۹۹۹، کروز و همکارانش برخورد پرتابه به ورق فلزی نازک را به صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. این پژوهشگران همچنین به تاثیر پارامترهای مختلف برشکل ناحیه تخریب شده پرداختند [۲]. گوپتا و همکارانش در سال ۲۰۰۷، تحقیقات تجربی و عددی را ارائه کردند که در آن مکانیزم نفوذ پرتابه‌های مختلف مخروطی، سرتخت و نیم کروی در اثر برخورد به اهداف آلومینیومی با

[1] Johnson Holmquist

[Downloaded from jicers.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.1.61.4.3]

ضخامت‌های مختلف را ارائه کردند [۳]. منز و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به بررسی و شبیه سازی رفتار آلومینیوم ۶۰۶۱ به هنگام برخورد بالستیک در ابعاد میکرو پرداختند. آنها نتایج حاصل از تحلیل خود را با مقایسه با نتایج تجربی نه تنها در ابعاد ماکرو، بلکه در ابعاد میکرو نیز مقایسه کردند [۴]. همچنین آنها از مدل آسیب جانسون- کوک استفاده کردند که از این مدل برای شبیه سازی فرآیندهای با نرخ کرنش بالا در نرم افزار استفاده می‌شود و توسط جانسون و کوک در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است [۵]. در سال۲۰۱۱، بابایی و همکاران برخورد یک پرتابه سرتخت به هدف چندلایه را به صورت سه بعدی شبیه سازی نمودند. ایشان در این تحقیق توانستند از مدل الاستیک- پلاستیک جانسون- کوک استفاده کرده و توانستند نتایج نفوذ پرتابه در صفحه را تا حد قابل قبولی بیان کنند [۶]. با توجه به این که پدیده برخورد به صفحات فلزی و سرامیکی در این پژوهش با سرعت بالا انجام می‌شود، و همچنین تاثیر شناسایی رفتار مواد در نرخ کرنش‌های بالا در دقت شبیه سازی، استفاده از مدل‌های رفتاری آسیب جهت تعیین رفتار ماده در زمان برخورد ضروری است. در این تحقیق ابتدا ضرایب مدل رفتاری جانسون کوک[1] برای آلومینیوم ۶۰۶۱ –T۶۵۱ استخراج شده، سپس نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مرجع [۷] مقایسه می‌شود.

با مرور کارهای پیشین مشخص می‌شود که تاکنون تحقیقی که به بررسی و مقایسه میزان جذب انرژی اهداف مرکب لایه‌ای فلزی- سرامیکی ارائه نشده است بنابراین در این تحقیق با در نظر گرفتن جرم یکسان برای کلیه اهداف، به بررسی و تحلیل میزان جذب انرژی سازه‌های ترکیبی پرداخته شده است.

۲- مدل رفتاری جانسون کوک

زمانی‌که سرعت تغییرشکل یا نرخ کرنش قطعه قابل توجه باشد، تنش اعمالی علاوه براینکه به مقدارکرنش بستگی دارد به نرخ کرنش نیز وابسته است. درمواقعی که دمای تغییرشکل نیز در قطعه همزمان با سرعت تغییر شکل تغییر نماید، تنش لازم برای اعمال یک مقدار مشخص کرنش، وابسته به دمای قطعه و نرخ کرنش خواهد بود. مدل جانسون-کوک، رفتار مواد را تحت کرنش‌های بزرگ، نرخ کرنش و دماهای بالا بیان می‌کند، بنابراین برای شبیه سازی مسائلی که در آنها تغییر شکل‌های بزرگ رخ می‌دهد، مانند مسائل برخورد و انفجار بسیار مناسب است. تنش جریان در مدل جانسون-کوک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}_p^*)(1 - T^{*m}) \qquad (۱$$

که در آن A، B، C، n و m از ثابت‌های ماده و ε_p کرنش پلاستیک موثر است که:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} = \dot{\varepsilon}_p^* \qquad (۲$$

که در آن $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنشی است که ثابت‌های ماده در آن نرخ کرنش به دست می‌آیند و به عنوان نرخ کرنش مرجع شناخته می‌شود. هم چنین T^* نرم شوندگی حرارتی ماده را در دماهای بالا تخمین می‌زند که رابطه آن به قرار زیر است:

$$T^{*m} = \begin{cases} 0 & \text{و} \quad T < T_r \\ \dfrac{T - T_r}{T_m - T_r} & \text{و} \quad T_r < T > T_m \\ 1 & \text{و} \quad T > T_m \end{cases} \qquad (۳$$

که در آن T، دمای ماده و T_m دمای ذوب ماده و T_r دمای مرجع است. همچنین مقدار کرنش شروع شکست طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_D^{pL} = \left[D_1 + D_2 e^{(D_3\eta)}\right]\left[1 + D_4 \times \mathrm{Ln}\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pL}}{\dot{\varepsilon}}\right)\right]\left[1 + D_5\hat{\theta}\right] \qquad (۴$$

[1] Johnson cook

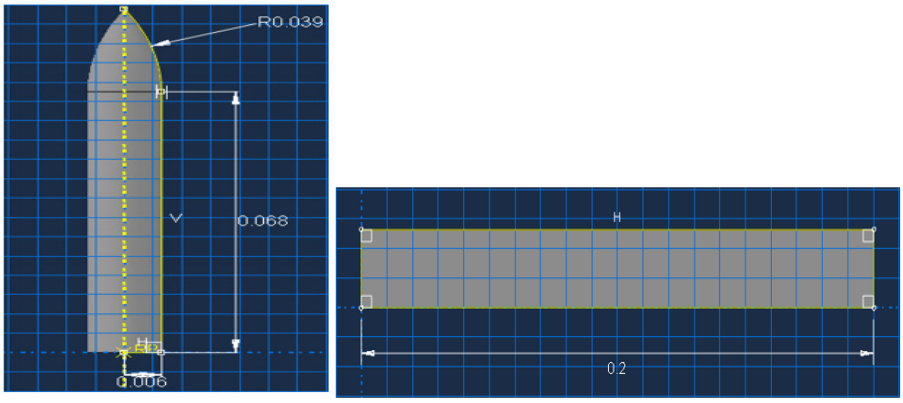
[Downloaded from jicers.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.1.61.4.3]

که در رابطه (۴)، براکت اول نشان دهنده تاثیر مقدار η بر ε_D^{pL} است، براکت دوم بیانگر تاثیر نرخ کرنش بر ε_D^{pL} است و براکت سوم نیز تاثیر دما بر ε_D^{pL} را نشان می‌دهد. ثوابت این معادله برای آلومینیوم و فولاد در جداول۱و ۲ آورده شده است.

۳- تعیین صحت تحلیل عددی با استفاده از داده‌های تجربی

همان طور که در قسمت مقدمه ذکر شد، ابتدا با استفاده از نتایج تجربی دیگر محققان، تعیین صحت نتایج تحلیل عددی پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مدل تجربی ذکر شده در مرجع [۷] در نرم افزار آباکوس شبیه سازی گردید. در مرجع [۷] سرعت قبل و بعد از نفوذ پرتابه از هدف اندازه‌گیری و ثبت شده است. در شکل ۱- الف، صفحه آلومینیومی هدف با طول و عرض ۰/۲ متر و با ضخامت ۰/۰۲۶۳ متر و شکل ۱- ب پرتابه صلب با شعاع ۰/۰۰۶ متر و با طول بخش استوانه‌ای شکل ۰/۰۶۸ متر و شعاع قسمت سر مخروطی ۰/۰۳۹ نشان داده شده است.



ب الف

شکل ۱- الف: ابعاد هندسی صفحه هدف، ب: ابعاد گلوله [۷]

مشخصات مواد و پارامترهای مدل رفتاری جانسون کوک برای صفحه آلومینیومی ۶۰۶۱ –T۶۵۱ که در آزمایش تجربی مورد استفاده قرار گرفته است در جداول ۱و ۲ آورده شده است.

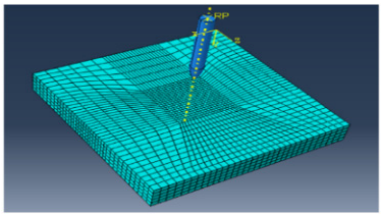
جدول ۱- مشخصات آلومینیوم و ثوابت معادله جانسون-کوک

ρ	E	ϑ	A	B	n	m	$\theta_{melting}$	$\theta_{Transition}$	C	$\dot{\varepsilon}$
۲۷۵۰	۶۹۰۰۰	۰/۳	۳۲۴	۱۱۴	۰/۴۲	۱/۶۴	۶۰۰	۵۰	۰/۰۰۲	۱

جدول ۲-ثوابت خرابی رابطه جانسون- کوک برای آلومینیوم AL6061-T6

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	Reference strain rate	Expansion coefficient	Specific heat	Conductivity
-۰/۷۷	۱/۴۵	۰/۴۷	۰	۱/۶	۱	$۲۱e^{-۶}$	۹۰۰	۱۹۰

مدل شبیه سازی شده پرتابه و هدف در شکل ۲ آورده شده، که پرتابه به صورت صلب در نظر گرفته شده است و هدف به صورت مدل سه بعدی انعطاف پذیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- مدل شبیه‌سازی شده پرتابه و هدف

[Downloaded from jicers.ir on 2026-01-29]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.1.61.4.3]

۴- نتایج تحلیل برخورد پرتابه به صفحه هدف آلومینیومی

در جدول۳ به مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی پژوهش حاضر پرداخته شده است. همانطور که از نتایج می‌توان یافت شبیه‌سازی مورد نظر با دقت بسیار خوبی انجام شده است و دارای خطای ناچیزی می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه نتایج تجربی و پژوهش حاضر

ردیف	سرعت برخورد	سرعت خروجی		درصد خطا
		عددی	تجربی	
۱	۶۳۰	۵۷۸/۴	۵۵۵	۴/۲
۲	۶۳۳	۵۸۲/۷	۵۶۱	۳/۸
۳	۷۳۰	۶۸۵/۷	۶۶۵	۳/۱
۴	۸۶۳	۸۲۴/۵	۸۰۲	۲/۸

تحلیل برخورد پرتابه به اهداف مختلف

پس از بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، به شبیه سازی اهداف مختلف در نظر گرفته شده، پرداخته شده است. در جدول ۴ جنس و ابعاد اهداف در نظرگرفته شده آورده شده است. در مجموع ۷ نوع هدف متفاوت با چینش‌های لایه‌ای مختلف در نظر گرفته شد و با ثابت نگهداشتن پارامتر جرم در کلیه حالت‌ها ضخامت صفحات مورد استفاده محاسبه و در نظر گرفته شد.

جدول ۴- ابعاد صفحات هدف

ردیف	جنس صفحه	ضخامت (m)		طول (m)	عرض (m)
۱	آلومینیوم	۰/۰۱		۰/۲	۰/۲
۲	سرامیک	۰/۰۰۸۵۵۳		۰/۲	۰/۲
۳	فولاد	۰/۰۰۳۵۱۲		۰/۲	۰/۲
۴	سرامیک-آلومینیوم	سرامیک ۰/۰۰۴۲	آلومینیوم ۰/۰۰۵	۰/۲	۰/۲
۵	سرامیک - فولاد	سرامیک ۰/۰۰۴۲	فولاد ۰/۰۰۱۷	۰/۲	۰/۲
۶	فولاد - سرامیک	فولاد ۰/۰۰۱۷	سرامیک ۰/۰۰۴۲	۰/۲	۰/۲
۷	آلومینیوم- سرامیک	آلومینیم ۰/۰۰۵	سرامیک ۰/۰۰۴۲	۰/۲	۰/۲

در ادامه پارامترهای مختلف اهداف در نظر گرفته شده متناسب با جنس در نظر گرفته شده برای هریک از صفحات آورده شده است و در نرم‌افزار مورد نظر اعمال شده است. در نهایت با انجام شبیه‌سازی‌های مورد نظر سرعت‌های ورودی و خروجی ثبت گردید و با استفاده از رابطه ۵ مقدار جذب انرژی برای هر حالت به دست آمده است که در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که جرم در نظر گرفته شده برای گلوله نیز برابر ۰/۰۴ کیلوگرم است.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times \left(V_2^2 - V_1^2\right) \qquad (۵$$

[Downloaded from jicers.ir on 2026-01-29]

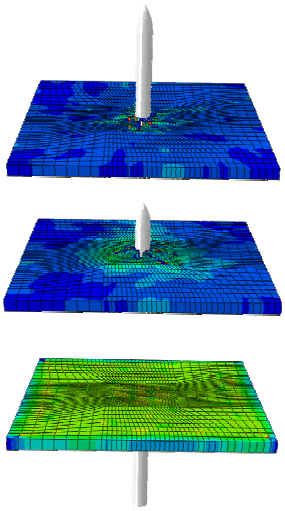
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.1.61.4.3]

جدول ۵- نتایج شبیه سازی برای انواع صفحات هدف

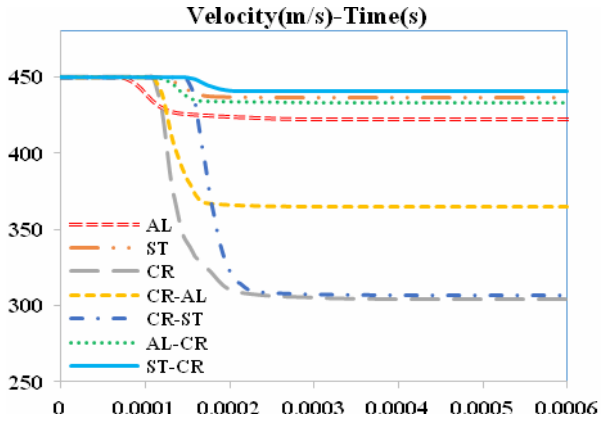
ردیف	نوع هدف	سرعت ورودی (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	جذب انرژی (j)	درصد جذب انرژی
۱	آلومینیوم	۴۵۰	۴۲۲/۴۱۳	۹۶۲/۶۹	۱۹
۲	سرامیک	۴۵۰	۴۶۳/۳۰۴	۴۳۹۲/۰۷	۸۶/۷۵
۳	فولاد	۴۵۰	۸۷۳/۴۳۶	۴۶۵/۷۴	۹/۲
۴	سرامیک- فولاد	۴۵۰	۳۶۵/۱۷۴	۲۷۶۵/۸۰	۵۴/۶۴
۵	سرامیک- آلومینیوم	۴۵۰	۳۰۷/۰۵۱	۴۳۲۸/۷۲	۸۵/۵
۶	فولاد – سرامیک	۴۵۰	۴۴۰/۳۴۱	۳۴۳/۹۲	۶/۷۹
۷	آلومینیوم-سرامیک	۴۵۰	۴۳۲/۷۸۱	۶۰۸/۰۲	۱۲

در جدول ۵، درصد جذب انرژی به ازای سرعت ورودی یکسان برای پنل‌های متفاوت بررسی شده و نتایج حاکی از آن است که کمترین و بیشترین جذب، به ترتیب مربوط به حالت ششم و دوم است.

در شکل ۳ مراحل قبل، حین و بعد از برخورد پرتابه به هدف نشان داده شده است و در شکل ۴ نمودارهای مربوط به سرعت پرتابه از لحظه قبل از برخورد تا لحظه خروج پرتابه از هدف آورده شده است. همچنین جهت مقایسه بهتر نتایج بدست آمده در شکل ۵ نمودار میله‌ای مربوط به جذب انرژی اهداف مختلف ترسیم شده است.



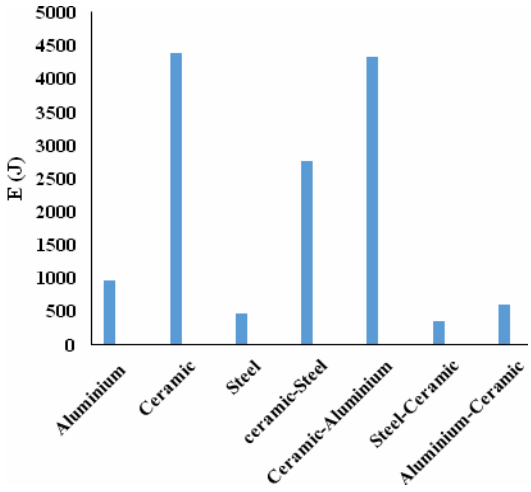
شکل ۳- مراحل نفوذ پرتابه در هدف



شکل ۴- نمودار سرعت - زمان برای صفحه هدف های مختلف

[Downloaded from jicers.ir on 2026-01-29]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.1.61.4.3]

با توجه به شکل ۴، می‌توان دریافت سریع‌ترین زمان وقوع نفوذ مربوط به آلومینیوم خالص است.



شکل ۵- نمودار جذب انرژی برای صفحه هدف‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا برخورد پرتابه به صفحه آلومینومی مورد بررسی قرار گرفت و سپس برخورد پرتابه به اهداف ترکیبی فلزی و سرامیکی در حالت‌های مختلفی چون سرامیکی، فولادی، سرامیکی- فولادی، سرامیکی- آلومینیومی، فولادی- سرامیکی و آلومینیومی- سرامیکی با ثابت نگهداشتن پارامتر جرم بررسی شد. نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- همانطور که از نتایج مشخص است با استفاده از اهداف ترکیبی سرامیک- فلز و با ثابت نگهداشتن جرم می‌توان به بازدهی بسیار مناسبی از این اهداف در مقابل نفوذ رسید.
- در هدف های ترکیبی دو لایه، هدف ترکیبی سرامیک- فولاد (۵۴/۶۳ درصد جذب انرژی) و سرامیک- آلومینیوم (۸۵/۵ درصد جذب انرژی) بعد از سرامیک خالص، جذب انرژی مطلوبی داشته‌اند.
- هدف فولادی خالص (۹/۲ درصد جذب انرژی)، جذب انرژی کمتری نسبت به حالت آلومینیوم خالص داشته است.
- با توجه به نتایج بدست آمده درست است که صفحه هدف سرامیک با ۸۶/۷ درصد جذب انرژی نسبت به هدف آلومینیومی در بالاترین سطح قرار دارد با این وجود همانطور که اشاره شد از موارد ضعف سرامیک‌ها به عنوان هدف، رفتار شکنندگی سرامیک‌ها است. تردی سرامیک انتشار ترک را تسهیل می‌کند و ممکن است در اثر ضربه اولیه موجب تخریب و خرد شدن آن شود بنابراین به کاربردن سرامیک خالص توجیهی نخواهد داشت.

مراجع

[1] Forrestal, M.J., Okajima, K., Luk, V.K. (1988). “Penetration of 6061-T651 aluminum targets with rigid long rods”. Applied Mechanics, Vol. 55, pp. 755-760.Author, A., 1986. *Book Name*. Publisher Name, Address.

[2] G. R. Kruse, W. R. Mendes, W . J . Sommers, R. A. Weed, K. D. Nash, D. V. Mayo, “Testing and Simulation of microderbris from impact with Complex targets,” International Journal of Impact Engineering, Vol. 23, pp. 489-500, 1999.

[3] N.k.gupta M.A.eqbal. (2007) Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates.

[4] Manesa, D. Lumassia, G. Magrassia, M.Bordegonia, M.Giglioa, “Micro-Scale Analysis and Simulation on the behavior of a component in Al-6061during ballistic impact: 3D acquisition and FE model”, Procedia Engineering, Vol. 10, pp 3435–3440, 2011.

[5] Johnson G. R., Cook W. H., “A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures”, Seventh International Symposium on Ballistics, Hague, 1983.

[6] B. Babaei,M. Shokrieh, K. Daneshjou, “ The Ballistic resistance of Multi-Layerd targets impacted by rigid projectiles,” Material Science and Engineering. Vol-530,pp.208-217 , 2011.

[7] A.J.Piekutowski,M.J.Forrestal,K.L.Poormon,T.L. Warren.“performation of aluminum plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impactcs”,(int J impact Eng 1996; 18:877-887).

[Downloaded from jicers.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.1.61.4.3]