



پاسخ ورق های فلزی تقویت شده با روکش پلیمر تحت ضربه پرتابه با سرعت بالا به روش اجزاء محدود و ارائه مدلی بر اساس رگرسیون تکاملی

رضا هوشیار^۱، توحید میرزابابای مستوفی^{۲*} و مصطفی سیاح بادخور^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

نوع مقاله، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

چکیده

در این تحقیق، به بررسی عددی و مدل سازی بی بعد پاسخ دینامیکی ورق های فولادی و آلومینیومی تقویت شده با لایه های پلیمری تحت ضربه پرتابه های صلب با هندسه های مختلف پرداخته شده است. در بخش مدل سازی عددی از نرم افزار المان محدود آباکوس و پلی بومود برای شبیه سازی فرآیند استفاده شده است. از مدل های پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک برای تعریف ماده فلزی و همچنین مدل ساختاری مونی-بولین برای ماده پلیمری استفاده شده است. جهت صحت سنجی مدل عددی، مقایسه ای بین نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی موجود در ادبیات تحقیق انجام شد. نتایج بدست آمده بیانگر دقت خوب مدل عددی در پیش بینی رفتار پلاستیک سازه و همچنین سرعت باقی مانده پرتابه بود. با استفاده از مدل عددی صحت سنجی شده، مطالعه ای پارامتریک روی رفتار ساختارهای فلز-پلیمر تحت برخورد پرتابه با هندسه های مختلف انجام شد و از نتایج بدست آمده برای ارائه یک مدل ریاضی جهت تخمین سرعت باقی مانده پرتابه استفاده شد. به منظور مدل سازی ریاضی، اعداد بی بعد جدیدی برای فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف فلز-پلیمر با استفاده از بی بعد سازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق ارائه شد.

کلمات کلیدی: پلی اوره؛ ساختار فلز-پلیمر؛ شبیه سازی عددی؛ مدل سازی ریاضی؛ نفوذ.

Response of Reinforced Metallic Plates with Polyurea Coating Subjected to High-Velocity Projectile Impact by Finite Element Method and Presenting a Model Based on Evolutionary Regression

R. Hooshyar¹, T. Mirzababaei Mostofi^{2,*}, M. Sayah Badkhor²

¹ M.Sc. Student, Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² Assistant Professor, Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

Abstract

In this study, numerical investigation and non-dimensional modeling of the dynamic response of steel and aluminum alloy plates reinforced with polymeric layers impacted by rigid projectiles with different geometries were investigated. In the numerical modeling section, the ABAQUS finite element software and PolyUMod were used to simulate the process. The Johnson-Cook plasticity and fracture models were used to define the metallic material as well as the Mooney-Rivlin model for the polymeric material. To validate the numerical model, a comparison was made between the results of numerical simulations and the experimental ones available in the open literature. The results showed good accuracy of the numerical model in predicting the plastic behavior of the structure as well as the residual velocity of the projectile. A rigorous parametric study was performed using the validated numerical model on the behavior of metal-polymer structures impacted by projectiles with different geometries and moreover, the results were used to provide a mathematical model to estimate the residual velocity of the projectile. For mathematical modeling, new dimensionless numbers were introduced for the penetration process of a rigid projectile to metal-polymer targets using the non-dimensional dynamic equilibrium equations for plates.

Keywords: Polyurea; Metal-Polymer Structure; Numerical Simulation; Mathematical Modelling; Penetration.

۱- مقدمه

امروزه پدیده ضربه و نفوذ کاربرد وسیعی در مسائل مهندسی دارد. از جمله مسائل مهم موجود در ضربه، یافتن نحوه ایجاد تغییر شکل پرتابه و هدف، جلوگیری از آسیب های به وجود آمده در اثر ضربه و برخورد به سازه ها و یافتن روشی مناسب برای دستیابی به نتایج با کمترین هزینه ها است. مدل های تحلیلی و عددی، نمونه ای از روش های دستیابی به نتایج مهم با هزینه ای کم است.

در سال ۲۰۰۶ باهی و همکاران، نتایج بررسی طراحی دو نوع ساندویچ پنل های معمولی و اصلاح شده تحت بارهای انفجاری را ارائه کردند. با توجه به اینکه در ساندویچ پنل های نوع دوم تحلیل خود، از لایه پلی اوره استفاده کرده بودند؛ بنابراین مقدار آسیب وارد شده به صفحات بسیار کمتر بود و دلیل آن وجود پلی اوره سخت شده بود که از صفحه بیرونی پشتیبانی می کرد و موجب عدم انتشار موج تنش در هسته فوم می شد [۱]. در سال ۲۰۰۶ گوپتا و همکارانش، مطالعات عددی و تجربی روی رفتار ورقه های نازک آلومینیومی توسط پرتابه های نیم کره و تخت را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی آنها تأثیر پذیری نوک دماغه بر تغییر شکل هدف را مورد بررسی قرار دادند. شبیه سازی عددی ضربه با استفاده از نرم افزار تجاری المان محدود آباکوس انجام شده بود. نتایج آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی با هم مطابقت خیلی خوبی داشتند [۲]. در سال ۲۰۰۷، باهی بررسی هایی در مورد رفتار ساندویچ پنل های معمولی و بهبود یافته تحت بار انفجاری به وسیله روش المان محدود انجام شد. بین لایه بیرونی و هسته فوم، دو ماده انتخاب کرد. در نهایت ماده ای که دارای نرخ کرنش بالاتری بود (پلی اوره) تأثیر بیشتری در جذب انرژی و ضربه گیری از خود نشان داد [۳].

در سال ۲۰۱۰ امینی و همکارانش، نتایجی از مجموعه آزمایش های انجام شده جهت ارزیابی پاسخ دینامیکی فولاد یکپارچه دایره ای شکل و همچنین به صورت لایه لایه با لایه های فولاد - پلی اوره تحت بارهای ضربه ای را ارائه کردند. در این بررسی از سیستم بالستیک معکوس استفاده گردید. آنها دریافتند که وجود خواص کششی پلی اوره باعث جلوگیری از پارگی ورق فولادی می شود [۴]. در سال ۲۰۱۰ رلند و همکارانش، بررسی های خود را در رابطه با پوشش های الاستومتری به منظور افزایش مقاومت لایه های فولادی در

مقابل حملات بالستیک در دستور کار قرار دادند. نتایج نشان داد که لایه های کامپوزیتی ساخته شده از پنل های فولادی - الاستومری مقاومت را افزایش می دهد؛ همچنین الاستومرها خود می توانند یک ساختار لمینت برای مواد نرم و سخت باشند [۵]. در سال ۲۰۱۰ لیانگ و همکاران، مطالعات عددی و تجربی راجع به ضربه و نفوذ روی صفحات زرهی توسط دو پرتابه نوک تیز و تخت انجام دادند. سه سناریو هدف در این آزمایش بکار برده شد؛ حالت اول: ورق فولادی خالی، حالت دوم: ورق فولادی با لایه پشتی پلی اوره و حالت سوم: ورق فولادی که از دو طرف با لایه پلی اوره پوشیده شده است. در نهایت مشخص گردید که پوشش پلی اوره مقاومت زیادی در جذب انرژی دارد [۶].

در سال ۲۰۱۴ موهوتی و همکاران، بررسی هایی راجع به ارتباط بین نرخ کرنش و پیش بینی مدل مواد به رفتار کرنش بالا انجام دادند. ۹ پارامتر شناخته شده تشکیل دهنده مونویبولین به عنوان پایه و اساس نتایج به دست آمده مدل مواد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که ورق های پوشش داده شده با پلی اوره بسیار از نظر جذب انرژی مفید بوده و پلی اوره تأثیر زیادی در جذب انرژی دارد [۷]. در سال ۲۰۱۵ موهوتی و همکاران، بررسی هایی راجع به تجزیه و تحلیل لایه های پلی اوره و آلومینیوم تحت ضربه سرعت بالا با پرتابه را انجام دادند. آنها ضمن ارائه یک مدل تحلیلی دریافتند که کاهش محسوس سرعت گلوله و افزایش جذب انرژی توسط پوشش پلی اوره اتفاق افتاده است [۸].

در سال ۲۰۱۶ بابایی و همکارانش، مدل سازی تجربی صفحات گیردار دایره ای شکل که تحت بارگذاری دفعی قرار گرفته اند را مورد بررسی قرار دادند. صفحات با منفجر شدن مخلوطی از اکسیژن و استیلن در یک محفظه احتراق با نسبت های مختلف حجم تشکیل می شوند. نتایج این معادلات تجربی با معیارهای آزمایشی مطابقت خوبی داشتند. علاوه بر این، نشان داده شده است که مدل های ارائه شده برخلاف روش های پیشنهادی قبلی خطای بسیار کمتری دارند [۹]. در سال ۲۰۱۶ مستوفی و همکاران، مطالعاتی راجع به ایجاد اعداد جدید بدون بعد بر اساس معادله تجربی برای پیش بینی تغییر شکل عرضی بزرگ انعطاف پذیر اهداف مربعی یکپارچه و چند لایه به دلیل تأثیر طبیعی یک پرتابه کروی سفت و سخت در دستور کار خود قرار دادند [۱۰].

اهداف فلزی تک و چندلایه فلزی و همچنین سازه‌های چندلایه فلز-پلیمر مشاهده نشده است؛ لذا در این تحقیق در ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود به شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه‌های چندلایه فلز - پلیمر تحت ضربه با پرتابه‌های مخروطی و تخت پرداخته می‌شود و صحنه‌گذاری مدل با استفاده از نتایج منابع انجام می‌گیرد. در ادامه این تحقیق، با بی‌بعدسازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق، اعداد بی‌بعد برای فرآیند نفوذ پرتابه با هندسه‌های مختلف در اهداف چندلایه فلز-پلیمر پیشنهاد می‌شود. استخراج مستقیم اعداد پیشنهادی از معادلات تعادل دینامیکی نشان‌دهنده آن است که این اعداد کاملاً معنای فیزیکی دارند.

۲- نحوه مدل‌سازی

در این تحقیق ابتدا برخورد پرتابه به ورق فولادی ۴۳۴۰ و سپس برخورد به ورق تقویت‌شده با پلی‌اوره در لایه پشت و برخورد با ورق تقویت‌شده با پلی‌اوره در لایه جلویی مطالعه می‌شود تا مدل المان محدود به استفاده از داده‌های موجود در ادبیات تحقیق صحت سنجی شود. قطر تمامی هدف‌ها برابر با ۱۵۲/۴ میلی‌متر است. تحلیل‌ها روی پیکربندی‌ها با ضخامت مختلف ورق انجام شده است تا بانک داده عددی تشکیل شود و تأثیر ضخامت ورق و لایه پلی‌اوره بر نتایج تحلیل عددی مشخص گردد. شکل ۱ پرتابه‌های استفاده شده در این پژوهش را به همراه ابعاد آن‌ها نشان می‌دهد. تمامی پرتابه‌ها جرم یکسان ۱۴۵ گرم و قطر ۳۶ میلی‌متر دارند، زاویه مخروط در پرتابه مخروطی ۹۰ درجه بوده است. ارتفاع پرتابه تخت ۱۵/۶ میلی‌متر و ارتفاع پرتابه مخروطی ۷/۵ میلی‌متر است.

ارائه مدل عددی به‌منظور پیش‌بینی و شبیه‌سازی حالت تغییر شکل هدف، فرآیند نفوذ پرتابه در هدف، محاسبه توانایی اهداف در جذب انرژی و بررسی تأثیرگذاری پوشش پلیمری جهت تقویت ورق‌های فلزی استفاده می‌گردد و در نهایت از مجموعه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده خواهد شد که روش انجام شده و فرآیند طی شده در این مقاله جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیک مواد فلزی و پلیمری به‌خوبی می‌تواند جایگزین تست‌های پرهزینه و خطرناک آزمایشگاهی شود.

در سال ۲۰۱۷، پاژوری^۱ و همکاران، مطالعاتی راجع به مقاومت نفوذ فولاد و پلی‌اوره در حالت‌های مختلف انجام دادند. در این تحقیق مواد استفاده شده پلی‌اوره و فولاد ۴۳۴۰ با ترکیب‌های مختلف قرارگیری ورق‌ها بود. پس از بررسی‌های به‌عمل آمده نتایج خوب و نزدیک به هم از نتایج تجربی و المان محدود به دست آمد [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ حاتمی و همکارانش، به ارائه یک مدل تحلیلی برای لوله‌های فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند [۱۲]. در همین سال جهرمی و حاتمی، به بررسی عملکرد لوله‌های فلزی چندلایه تحت ضربه پرداختند. آنها به دوروش تجربی و عددی نتایج خود را به‌دست آوردند [۱۳]. در سال ۲۰۱۸ حاتمی و فتح‌الهی، بررسی و مقایسه نظری و عددی رفتار دینامیکی یک مدل متشکل از چهار میله و چهار مفصل الاستیک-پلاستیک تحت اثرات اینرسی در دو حالت تک سلولی و دو سلولی پرداختند. آنها رابطه جذب انرژی برحسب پارامتر اینرسی روی سازه مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای را به‌دست آوردند و نیز بررسی رفتار دینامیکی پارامترهای مؤثر و ساز و کار فروریزی سازه در دو حالت تک سلولی و دو سلولی را انجام دادند [۱۴]. در همین سال جهرمی و حاتمی، به بررسی عملکرد لوله‌های فلزی مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداختند. آنها دریافته‌اند که افزایش اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن لوله‌های فلزی تأثیر قابل‌توجهی در نیروی لهیدگی بیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های فلزی مشبک دارد و چند لایه کردن لوله‌های فلزی موجب بهبود بازده لهیدگی می‌شود [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ سیاح بادخور و همکارانش به ارائه یک مدل تحلیلی اصلاحی برای نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی نیمه بی‌نهایت سرامیک - فلز پرداختند. آنها مقادیر عمق نفوذ در این اهداف را با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی کردند [۱۶]. در همین سال سیاح بادخور و همکارانش به بررسی مدل‌های تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و سرامیکی پرداختند. آنها ضمن بیان مدل‌های تحلیلی به یک دسته‌بندی جامع براساس روش نفوذ پرتابه در هدف نیز پرداختند [۱۷].

با وجود تحقیقات بسیار زیاد انجام شده روی ساختارهای تک و چندلایه تحت ضربه پرتابه با هندسه دماغه‌های متفاوت، تاکنون مطالعه‌ای روی ارائه یک مدل تحلیلی یا بی‌بعد جهت پیش‌بینی سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده پرتابه در

^۱ Pajjuri

تنش سیلان در مدل جانسون-کوک توسط رابطه (۱) بیان می شود [۱۸]:

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

که A, B, C, n, m ثابت ماده، $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک مؤثر $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنشی است که ثابت ماده A, B در آن نرخ کرنش به دست می آیند و به عنوان نرخ کرنش مرجع معرفی می شوند؛ همچنین $\hat{\theta}$ نرم شوندگی حرارتی ماده را در دماهای بالا تقریب زده و از رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & : \theta < \theta_{Tran} \\ \frac{\theta - \theta_{Tran}}{\theta_{melt} - \theta_{Tran}} & : \theta_{Tran} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1 & : \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (2)$$

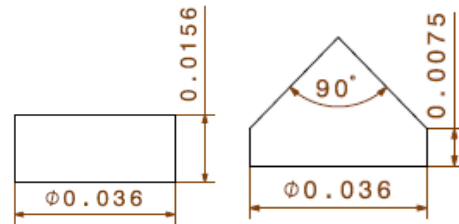
که θ دمای ماده، θ_{melt} دمای ذوب ماده و θ_{Tran} دمایی است که دماهای کمتر از آن تأثیری بر تنش سیلان فلز نخواهد داشت. معیار خسارت جانسون-کوک یک مدل از مدل های آسیب نرم است و توانایی پیش بینی شکست نرم را نیز دارا است. از آنجا که پاسخ دینامیکی در محیط های انفجاری بسیار سریع است، با فرض اتلاف کار پلاستیکی که به افزایش درجه حرارت آدیاباتیک تبدیل می شود، می توان تغییرات دمایی در زمان یک نمونه را مطابق زیر تعیین کرد [۱۸ و ۱۹]:

$$\Delta T = \int_0^{\bar{\epsilon}^{pl}} \frac{\chi}{\rho C_p} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^{pl} \quad (3)$$

که در آن چگالی ماده، C_p بیانگر ظرفیت حرارتی ماده در فشار ثابت و χ ضریب تیلور-کوینی است. معمولاً ضریب تیلور-کوینی برای مواد فلزی ۰/۹ در نظر گرفته می شود بدان معنا که ۹۰٪ کار پلاستیک به گرما تبدیل می شود و ۱۰٪ کار پلاستیک در مواد ذخیره می شود [۱۸ و ۱۹].

در این مدل کرنش شکست ماده به صورت تابعی از تنش سه محوره، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می شود. بر طبق این مدل مقدار کرنشی که یک ماده تا لحظه شکست می تواند تحمل نماید، مطابق رابطه (۴) محاسبه می شود.

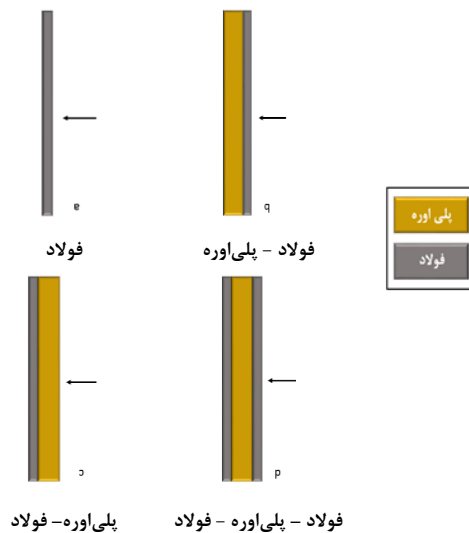
$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}})] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 \hat{\theta}] \quad (4)$$



شکل ۱- انواع پرتابه های استفاده شده با ابعاد متر

۳- شبیه سازی عددی

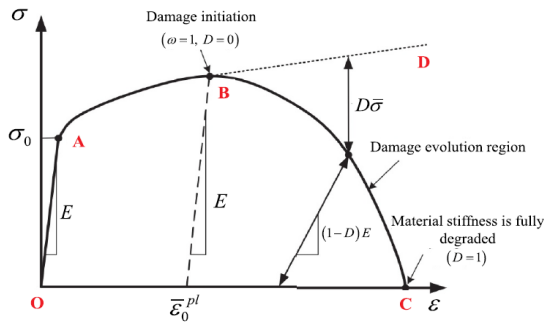
تحلیل ها به منظور صحت سنجی مدل، روی چهار پیکربندی مختلف روی ورق فولادی و پلی اوره انجام خواهد شد [۱۱]. شکل ۲ هرکدام از پیکربندی های مورد بررسی را در مقابل پرتابه مخروطی و سر تخت نشان می دهند. در شکل ۲، پیکان جهت برخورد پرتابه را نشان می دهد.



شکل ۲- حالت های مختلف هدف

۳-۱- مدل های ماده

هدف از دو جنس فولاد و پلی اوره بوده و برای مدل سازی برخورد پرتابه از دو مدل ساختاری برای این مواد استفاده شده است. مدل ماده جانسون کوک که مناسب برای مواد چکش خوار تحت بارهای با نرخ کرنش بالا است، برای شبیه سازی فولاد و مدل ساختاری مونی ریولین برای لایه پلی اوره استفاده شده است.



شکل ۳- نمودار رفتار آسیب مواد [۱۹]

جدول ۱- مشخصات فولاد استفاده شده در تحقیق [۱۸]

ضرایب ماده	معرف	فولاد ۴۳۴۰
مدول الاستیسیته	E(GPa)	۲۰۰
نسبت پواسون	ν	۰/۲۹
چگالی	ρ(kg/m³)	۷۸۳۰
تنش تسلیم و کارسختی	A(MPa)	۷۹۲
	B(MPa)	۵۱۰
نرخ کرنش	n	۰/۲۶
	ε₀(1/s)	۱
	C	۰/۰۱۴
	T₀(K)	۲۹۳
تأثیرات دما	T _{melt} (k)	۱۷۹۳
دمای ویژه	m	۱/۰۳
	C _p (J/kgk)	۴۷۷
	D ₁	۰/۰۵
	D ₂	۳/۴۴
ضرایب شکست	D ₃	۲/۱۲
	D ₄	۰/۰۰۲
	D ₅	۰/۶۱

معادله (۴) به سه قسمت تقسیم می‌شود که براکت اول نشان دهنده اثر تنش سه محوره روی آسیب ماده و دو پراگتیز بعدی به ترتیب مربوط به اثر نرخ کرنش و دما بر آسیب ماده می‌باشند. این معادله باید برای ماده مورد نظر کالیبره شود. طبق مدل آسیب جانسون-کوک هنگام بارگذاری روی یک ماده، انباشتگی آسیب برای هر نقطه ماده به صورت رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}} \right) (A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) (1 - \hat{\theta}^m) \quad (5)$$

که در رابطه $\Delta \bar{\epsilon}_{p1}$ برابر با افزایش کرنش پلاستیک معادل و $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل در لحظه شکست ماده است. با توجه به رابطه‌ی بالا برای به دست آوردن مقدار ω در کل قدم‌های حل، جمع می‌شود. با رسیدن مقدار ω به مقدار بحرانی شکست در ماده رخ خواهد داد.

$$\bar{u}^{pl} = L(\bar{\epsilon}^{pl} - \bar{\epsilon}_D^{pl}) \quad (6)$$

$$D = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (7)$$

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (8)$$

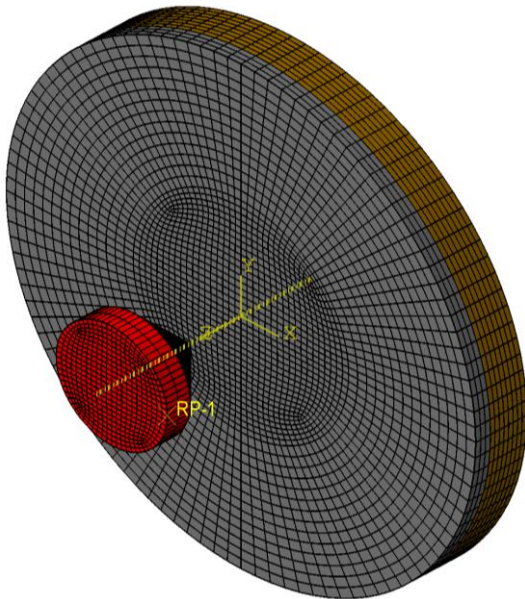
به کمک مدل آسیب جانسون - کوک می‌توان به یک ارزیابی کمی در مورد نقاط و نحوه رشد آسیب نرم با توجه به تنش‌های وارده، نرخ کرنش و دما دست یافت. شکل ۳ نمودار رفتار آسیب مواد را نشان می‌دهد. مشخصات فولاد استفاده شده نیز در جدول ۱ ارائه گردیده است.

پلی‌اوره ماده شدیداً غیرقابل تراکم بوده و به صورت ماده شبه لاستیک تلقی و توسط مدل‌های هایپر الاستیک شبیه‌سازی می‌شود. این مواد هایپر الاستیک با استفاده از پتانسیل انرژی کرنشی توصیف شده که انرژی کرنشی بر واحد حجم ذخیره شده در ماده بوده و تابعی از کرنش در آن نقطه است. فرم کلی این مدل به صورت رابطه (۹) است [۱۱].

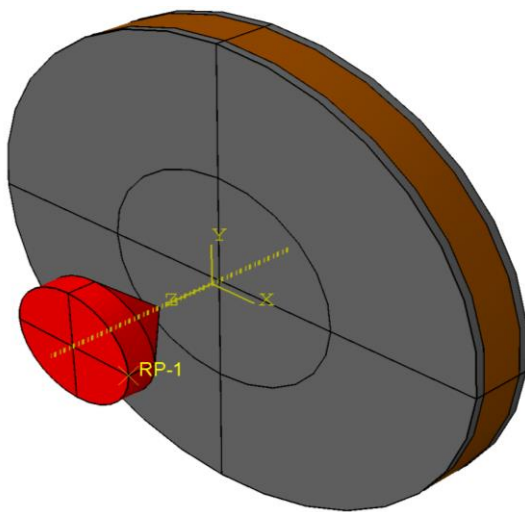
$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 \quad (9)$$

در معادله ۹، U انرژی کرنشی بر واحد حجم مرجع بوده، C_{10} ، C_{01} و D_1 ضرایب ماده بوده و J^{el} نسبت حجمی الاستیک هستند. \bar{I}_1 و \bar{I}_2 نوع اول و دوم کرنش انحرافی بوده که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱].

گلوله‌های مختلف استفاده شده فقط در جهت محور Z آزادی دارند. هدف در مرزها ثابت شده است و کاملاً گیردار هستند. نوع مش در تمامی قطعات C3D8R بوده است. این نوع المان خشتی ۸ گره‌ای با انتگرال گیری کاهش یافته بوده و در هر گره ۳ درجه آزادی انتقالی دارد. توضیحات بیشتر در مورد این نوع المان در مرجع [۲۰] موجود است. شماتیک هندسه ساخته شده و مش بندی شده به همراه پرتابه به کاررفته جهت مدل سازی، در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل المان بندی شده



شکل ۵- هدف سه لایه (پلی اوره- فولاد- پلی اوره)

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (10)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (11)$$

که بسط اجزای کرنش انحرافی با $\bar{\lambda}_i$ به صورت است [۱۱].

$$\bar{\lambda}_i = J^{\frac{1}{3}} \bar{\lambda}_i \quad (12)$$

در معادلات بالا J نسبت حجم کلی و $\bar{\lambda}_i$ بسطهای اصلی است. مدول برشی اولیه یا μ_0 و مدول بالک یا K_0 به صورت زیر داده شده است [۱۱].

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (13)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (14)$$

برای پلی اوره رفتار شکست ماده با استفاده از مدل شکست ساده شبیه سازی شده است. خواص پلی اوره در جدول ۲ ارائه شده است. کرنش شکست $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ به مدل معرفی شده و هنگامی که کرنش پلاستیک معادل $\bar{\epsilon}^{pl}$ به میزان مشخص شده انباشته شود، شکست در المان مورد نظر اتفاق خواهد افتاد. در این پژوهش تأثیرات حرارت بر پلی اوره در نظر گرفته نشده است. هنگامی شکست اتفاق خواهد افتاد که معادله (۱۵) ارضا شود [۱۱].

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}(\eta\bar{\epsilon}^{pl})} = 1 \quad (15)$$

جدول ۲- مشخصات ماده استفاده شده برای پلی اوره [۶]

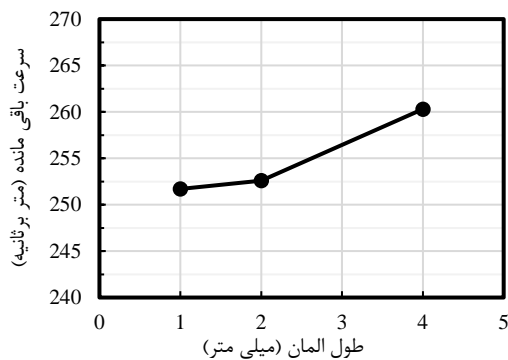
چگالی (kg/m ³)	نسبت پواسون	K (GPa)	C ₀₁ (MPa)	C ₁₀ (MPa)	ε _f
۱۲۵۰	۰/۴۸۶	۵۰۰	۰/۲۲۸	۰/۰۴۱	۱/۵

۳-۲ شبیه سازی عددی

با توجه به ماهیت دینامیکی مسئله نفوذ و وجود سرعت های بالا و وابستگی شدید به زمان در معادلات، در این پژوهش از نرم افزار آباکوس جهت انجام شبیه سازی استفاده شده است [۲۰]. در مدل سازی هدف (ورق) به عنوان یک قطعه تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شده و پرتابه ها (گلوله ها) به صورت صلب مدل سازی شده است. برای مدل سازی پدیده نفوذ می بایست تماس سطوحی تعریف شود که در حین نفوذ باهم برخورد دارند. بدین منظور تماس با ضریب اصطکاک ۰/۳ تعریف شده است. البته ذکر این نکته ضروری است که به علت سرعت بالای گلوله اصطکاک قابل صرف نظر است [۲۱].

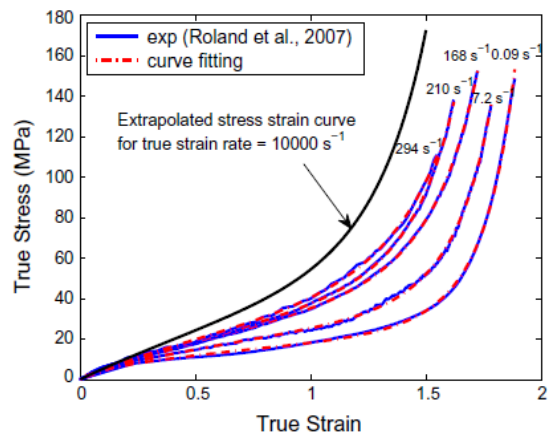
نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی همان مقاله، برای پرتابه‌ها با شکل‌های هندسی مختلف مقایسه شده است تا صحت آن‌ها ثابت شود. زاویه برخورد پرتابه باهدف به‌طور مستقیم بر حالت شکست، سرعت بالستیک و عمق نفوذ تأثیرگذار است. به منظور صحت سنجی حالت شکست اهداف دو حالت شکست که غالباً در برخورد سرعت‌بالای پرتابه به هدف اتفاق می‌افتد بررسی شده است که شامل پلاگینگ و پتالینگ است. در شکل ۸ و شکل ۹ دو حالت شکست مطرح شده در بالا با نتایج آزمایشگاهی موجود در منبع [۶] مقایسه شده‌اند. از نتایج مشخص است که مدل عددی توسعه داده شده به‌خوبی توانایی پیش‌بینی حالت شکست ورق را دارد.

همان‌طور که در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است، حالت شکست برای هر پرتابه استفاده شده در تطابق با مشاهدات آزمایشگاهی است. برای پرتابه‌های تخت بعد از چند میکروثانیه، شروع یک نوار برش آدیاباتیک به‌سرعت پدیدار می‌شود و در اینجا این نوار سینگولاریتی هندسی پرتابه است. این نوار برش آدیاباتیک در نهایت منتهی به پرش پلاگ در شکست نهایی خواهد شد. منحنی‌های سرعت اولیه نسبت به‌سرعت باقیمانده برای پرتابه با سر تخت و مخروطی در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ارائه شده‌اند که در آن‌ها نتایج عددی با نتایج موجود در ادبیات تحقیق برای هر نوع پرتابه مقایسه شده است. کمی اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی برای سرعت‌های برخورد نزدیک به‌سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود، ولی نتایج عددی سرعت حد بالستیک برای این دو پرتابه را با دقت ۵ درصد پیش‌بینی می‌کند. اولین مشاهدات به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده وابستگی حالت شکست، به شکل دماغه پرتابه استفاده شده است.



شکل ۷- آنالیز حساسیت مش

پلی‌یومود کتابخانه‌ای از مدل‌های ماده پیشرفته بوده که با اتصال به حل‌گرهای المان محدود نظیر آباکوس، انسیس یا ال‌اس داینما امکان تحلیل‌های پیچیده‌تر را فراهم می‌سازد. در پژوهش اخیر به دلیل ضعف نرم‌افزار آباکوس در شبیه‌سازی مواد هایپر الاستیک نظیر پلی‌اوره، از این کتابخانه جهت ایجاد مدل ماده مونی‌ریولین استفاده شده است. در شکل ۶ نتایج تنش کرنش ماده نشان داده شده است.



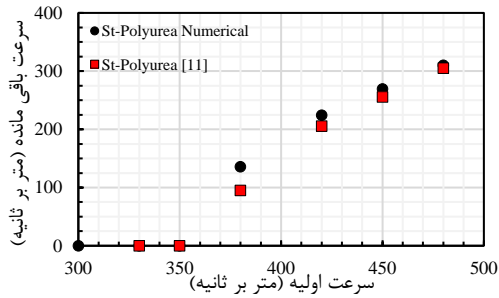
شکل ۶- نتایج تنش-کرنش ماده پلی‌اوره [۶]

۳-۳- آنالیز حساسیت اندازه دانه‌بندی

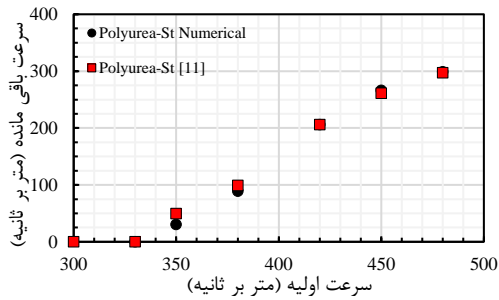
شبیه‌سازی عددی برای هر یک از مدل‌ها با استفاده از مش ساختاری انجام شده است. مش بهینه با استفاده از متد همگرایی جواب انتخاب شده است؛ به‌طوری‌که جواب پایدار بوده و با کوچک‌تر شدن مش جواب تغییر نمی‌کند. از طرف دیگر با توجه به وابستگی حذف المان در مدل خسارت جانسون کوک اندازه مش مهم بوده و تأثیر مستقیم روی حذف المان در جابجایی شکست می‌گذارد. تحلیل انجام شده برای آنالیز حساسیت مش به طول المان در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳-۴- صحت سنجی مدل عددی

مقایسه نتایج بین نتایج عددی و آزمایشگاهی بر اساس تغییر شکل و حالت شکست اهداف و سرعت باقی‌مانده انجام می‌گیرد. تمرکز اصلی روی سرعت باقی‌مانده و جذب انرژی ورق‌های کامپوزیتی مورد مطالعه است. شبیه‌سازی‌های عددی جهت صحت سنجی مدل‌ها بر اساس پیکربندی آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط پازوری و همکاران [۱۱] انجام شده است و

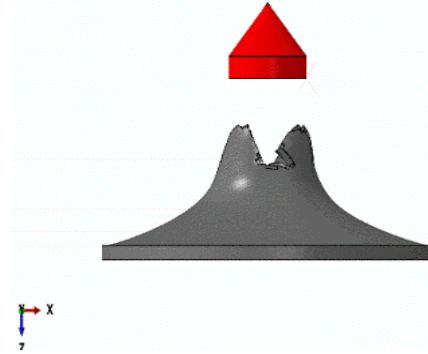


(الف)

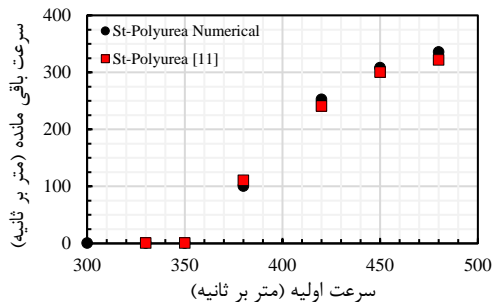


(ب)

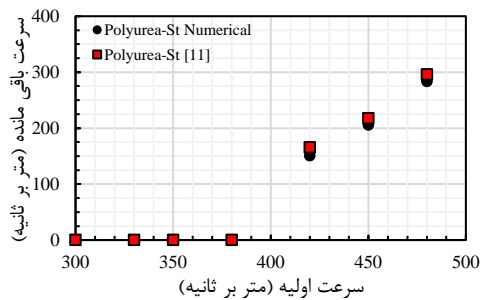
شکل ۱۰- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای پرتابه مخروطی: الف) فولاد - پلی اوره و ب) پلی اوره - فولاد



شکل ۸- مقایسه حالت شکست پتالینگ در ورق با نتایج آزمایشگاهی [۶] در مقابل پرتابه مخروطی با سرعت ۳۳۵ متر بر ثانیه

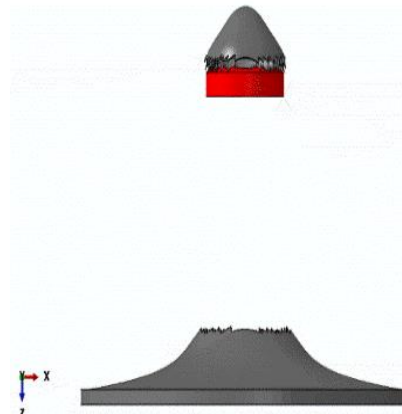


(الف)



(ب)

شکل ۱۱- مقایسه نتایج عددی و نتایج تجربی برای پرتابه تخت: الف) فولاد - پلی اوره و ب) پلی اوره - فولاد



شکل ۹- مقایسه حالت شکست پلاگینگ در ورق با نتایج آزمایشگاهی [۶] در مقابل پرتابه مخروطی با سرعت ۳۳۵ متر بر ثانیه

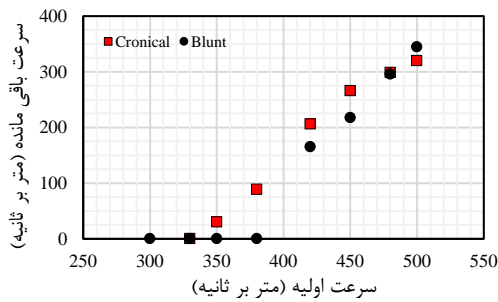
در جدول ۳ و ۴ نتایج مربوط به سرعت باقی مانده برای پیکربندی‌های تقویت شده با پلی‌اوره ارائه شده است. نتایج با داده‌های موجود در ادبیات موضوع مقایسه شده و میزان خطای مدل‌سازی در جدول ارائه گردیده است. همان‌طور که انتظار

جدول ۳- مقایسه نتایج عددی و نتایج موجود در ادبیات تحقیق برای پرتابه مخروطی و تخت در ورق‌های دولایه

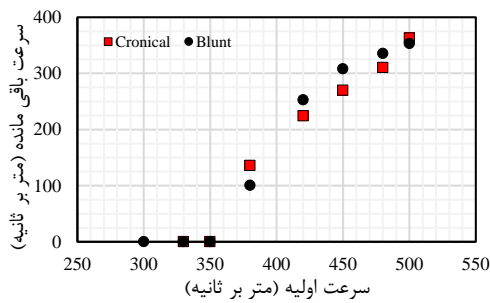
هندسه هدف براساس جنس	ضخامت لایه جلو (mm)	ضخامت لایه پشت (mm)	نوع پرتابه	سرعت اولیه (m/s)	سرعت باقی مانده مرجع [۱۱] (m/s)	سرعت باقی مانده عددی (m/s)	خطا (%)
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	مخروطی	۳۵۰	۰	۰	-
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	مخروطی	۳۸۰	۹۵/۲	۱۳۵/۸	۲۹/۹
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	مخروطی	۴۲۰	۲۰۵/۳	۲۲۴/۱	۸/۴
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	مخروطی	۵۰۰	-	۳۶۲/۸	-
پلی‌اوره - فولاد	۱۱/۷۶	۴/۷۶۲۵	مخروطی	۳۰۰	۰	۰	-
پلی‌اوره - فولاد	۱۱/۷۶	۴/۷۶۲۵	مخروطی	۳۵۰	۴۹/۳	۳۰	۶۴/۳
پلی‌اوره - فولاد	۱۱/۷۶	۴/۷۶۲۵	مخروطی	۴۲۰	۲۰۵/۶	۲۰۵/۷	۰
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	تخت	۳۵۰	۰	۰	-
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	تخت	۳۸۰	۱۱۰/۲	۱۰۰/۲	۱۰
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	تخت	۴۲۰	۲۴۰/۵	۲۵۲/۶	۴/۸
فولاد - پلی‌اوره	۴/۷۶۲۵	۱۱/۷۶	تخت	۵۰۰	-	۳۵۳	-
پلی‌اوره - فولاد	۱۱/۷۶	۴/۷۶۲۵	تخت	۳۸۰	۰	۰	-
پلی‌اوره - فولاد	۱۱/۷۶	۴/۷۶۲۵	تخت	۴۲۰	۱۵۰/۳	۱۶۵/۲	۹
پلی‌اوره - فولاد	۱۱/۷۶	۴/۷۶۲۵	تخت	۵۰۰	-	۳۴۴/۷	-

جدول ۴- مقایسه نتایج عددی و نتایج موجود در ادبیات تحقیق برای هدف ساندویچی در مقابل پرتابه تخت و مخروطی

نوع پرتابه	سرعت اولیه (m/s)	سرعت باقی مانده مرجع [۱۱] (m/s)	سرعت باقی مانده عددی (m/s)	خطا (%)
	۳۰۰	۱۴۲/۷	۱۰۴/۲	۳۶/۹
مخروطی	۴۰۰	۲۶۵/۳	۲۶۴/۵	۰/۳
	۵۰۰	-	۳۴۹/۲	-
	۳۰۰	۰	۰	-
تخت	۴۰۰	۲۲۰/۸	۲۴۱/۹	۸/۷
	۵۰۰	-	۳۵۳/۲	-



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- مقایسه سرعت باقی مانده اهداف در برابر

ضربه پرتابه های مختلف: الف) پلی اوره- فولاد و

ب) فولاد- پلی اوره

در مقابل دو پرتابه مخروطی و تخت در شکل ۱۲ ارائه شده است. اختلاف حدود ۶ درصدی بین سرعت حد بالستیک دو پیکربندی مشاهده می شود؛ ولی این روند در مقابل پرتابه تخت تغییر کرده و قرارگیری پوشش پلی اوره در جلوی ورق نتیجه بهتری داده است. در شکل ۱۳ مقایسه ای بین نتایج سرعت باقی مانده در مقابل پرتابه های مختلف در ساختارها انجام می دهد. مشخص است زمانی که تقویت در جلو ورق انجام شود، مقاومت نفوذ پرتابه تخت در ورق نسبت به پرتابه مخروطی بهبود بهتری می یابد؛ ولی هنگامی که تقویت در پشت ورق انجام شد و نتایج سرعت حد بالستیک دو پیکربندی مشابه هم است.

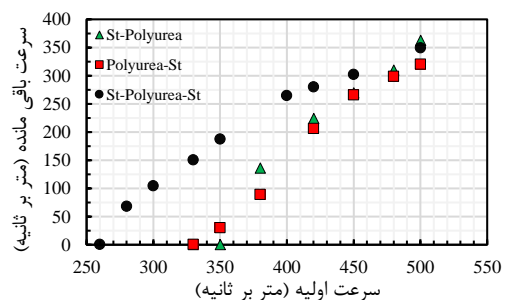
۵- مدل سازی

با توجه به تحلیل نیرویی نشان داده شده در شکل ۱۴ و ۱۵ برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به صورت رابطه ۱۶ ارائه می شود [۱۰].

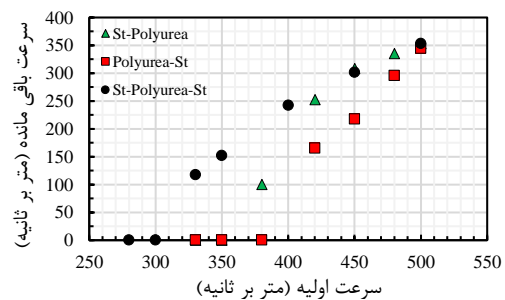
می رود و مطابق با نتایج شبیه سازی های انجام شده روی سرعت حد بالستیک اهداف چندلایه [۱۱]، میزان خطای مدل سازی در سرعت های نزدیک به سرعت حرکت حد بالستیک بیشتر بوده است، ولی با این حال مدل سرعت حد بالستیک پیکربندی را به خوبی پیش بینی می کند.

۴- مطالعه پارامتریک

به منظور ارائه رابطه برای سرعت باقی مانده در پیکربندی های مختلف نیاز به وجود بانک داده عددی وجود دارد تا به عنوان ورودی مدل بی بعد استفاده شود. بدین منظور تحلیل روی پیکربندی هایی با ضخامت های مختلف فولاد و تقویت پلی اوره انجام شده است. این پیکربندی ها در مقابل پرتابه با سرعت های مختلف قرار گرفته است. در جدول ۵ نتایج تحلیل پارامتریک برای پرتابه مخروطی و تخت در مقابل هدف با سناریوهای مختلف با ضخامت های مختلف ارائه شده است. نمودار سرعت باقی مانده به سرعت اولیه برای سه پیکربندی مختلف ورق با تقویت پلی اوره در جلو، پشت و ورق ساندویچی



(الف)



(ب)

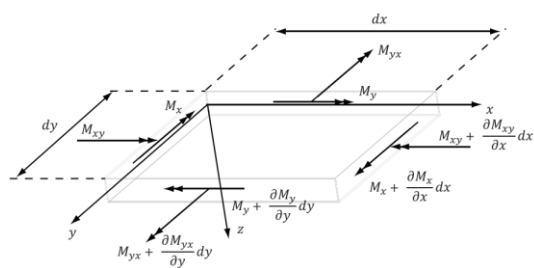
شکل ۱۴- نمودار سرعت اولیه سرعت باقی مانده برای

پیکربندی های مختلف: الف) پرتابه مخروطی و

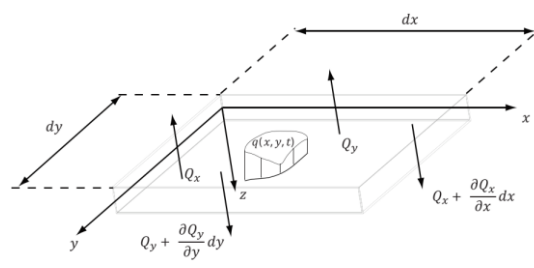
ب) پرتابه تخت

جدول ۵- نتایج تحلیل پارامتریک برای پرتابه‌های تخت و مخروطی در هدف با حالت‌های مختلف

جذب انرژی (J)	سرعت باقی‌مانده (m/s)	سرعت اولیه (m/s)	نوع پرتابه	جنس و ضخامت لایه پشت (mm)	جنس و ضخامت لایه جلو (mm)	هندسه هدف براساس جنس
۹۰۰۰	۰	۳۵۰	مخروطی	۱۲	۵	فولاد - پلی‌اوره
۹۷۱۰	۲۶۵/۴	۴۵۰	مخروطی	۱۲	۵	فولاد - پلی‌اوره
۱۶۱۰۰	۲۸۸/۳	۵۵۰	مخروطی	۱۲	۵	فولاد - پلی‌اوره
۱۰۶۰۰	۰	۳۸۰	مخروطی	۵	۱۲	پلی‌اوره - فولاد
۱۰۸۰۰	۲۴۲/۸	۴۵۰	مخروطی	۵	۱۲	پلی‌اوره - فولاد
۱۲۴۰۰	۳۶۵/۹	۵۵۰	مخروطی	۵	۱۲	پلی‌اوره - فولاد
۱۰۲۰۰	۷۰/۸	۳۸۰	مخروطی	۷	۵	فولاد - پلی‌اوره
۹۸۷۰	۳۴۰/۱	۵۰۰	مخروطی	۷	۵	فولاد - پلی‌اوره
۱۰۶۰۰	۰	۳۸۰	مخروطی	۵	۷	پلی‌اوره - فولاد
۱۰۹۰۰	۳۱۷/۹	۵۰۰	مخروطی	۵	۷	پلی‌اوره - فولاد
۹۰۰۰	۰	۳۵۰	تخت	۱۲	۵	فولاد - پلی‌اوره
۸۱۳۰	۳۰۳/۲	۴۵۰	تخت	۱۲	۵	فولاد - پلی‌اوره
۱۰۷۰۰	۳۹۵/۶	۵۵۰	تخت	۱۲	۵	فولاد - پلی‌اوره
۱۲۲۰۰	۰	۳۸۰	تخت	۵	۱۲	پلی‌اوره - فولاد
۱۲۶۰۰	۱۷۷/۹	۴۵۰	تخت	۵	۱۲	پلی‌اوره - فولاد
۱۲۱۰۰	۳۷۱/۴	۵۵۰	تخت	۵	۱۲	پلی‌اوره - فولاد
۱۰۶۰۰	۰	۳۸۰	تخت	۷	۵	فولاد - پلی‌اوره
۸۶۷۰	۳۶۳/۴	۵۰۰	تخت	۷	۵	فولاد - پلی‌اوره
۱۰۶۰۰	۰	۳۸۰	تخت	۵	۷	پلی‌اوره - فولاد
۹۷۸۰	۳۴۱/۹	۵۰۰	تخت	۵	۷	پلی‌اوره - فولاد



(ب) گشتاورهای خمشی



(الف) نیروهای برشی

شکل ۱۴- دیاگرام آزاد در یک المان از ورق [۱۰]

همان طور که از معادله ۱۸ برمی آید، سه عبارت در آن وجود دارد: هندسه ساختار L/H ، توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک $1/\sigma_d$ و نسبت بار دینامیکی به مقاومت ماده P/σ_d که فشار دینامیکی متناسب است با ρV_0^2 . اکنون با به کارگیری معادله ساختاری کوپر-سیموندز (q و D ثابت های ماده هستند) و استفاده از تقریب جونز [۱۰]، برای محاسبه مقدار نرخ کرنش متوسط $\dot{\epsilon}_m$ ، عدد بی بعد اثر نرخ کرنش ξ به صورت معادله ۲۰ تعریف می شود [۱۰].

$$\sigma_d = \sigma_0 \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_m}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \right) = \sigma_0 \left(1 + \xi \left(\frac{W_0}{H} \right)^{\frac{1}{q}} \right) \quad (۱۹)$$

$$\xi = \left(\frac{V_0 H}{3\sqrt{2}abD} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (۲۰)$$

با جایگذاری معادلات ۱۹ و ۲۰ در معادله ۱۸، تحلیل ابعادی برای معادله بی بعد حاکم بر ورق منجر می شود به:

$$\frac{W_0}{H} = f \left(\frac{L}{H}, \frac{P}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi} \right) \quad (۲۱)$$

در نهایت، رابطه بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق های چهارگوش تحت بارگذاری دینامیکی برابر است با:

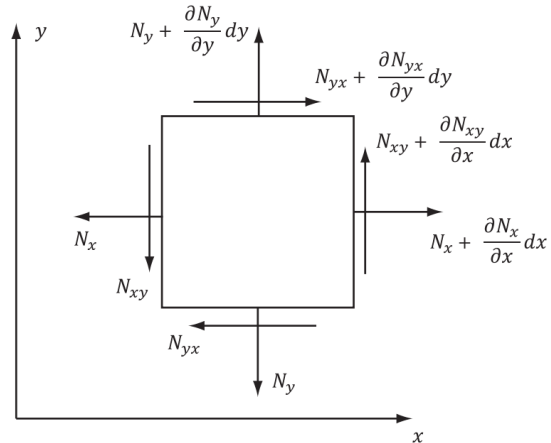
$$\frac{W_0}{H} = C_0 \cdot \psi_q \quad (۲۲)$$

که در آن

$$\psi_q = \left(\frac{L}{H} \right)^{C_1} \cdot \left(\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0} \right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi} \right)^{C_3} \quad (۲۳)$$

شایان توجه است که در تحلیل ابعادی ساختارهای مستطیلی دولایه تحت بارگذاری دینامیکی نسبت به تحلیل ابعادی ورق های تک لایه، کمیت های فیزیکی بیشتری وارد می شود. این کمیت ها شامل، خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر دولایه عقبی و جلویی است که باید در تحلیل رفتار پلاستیک ساختارهای دولایه در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، معادله ۲۳ برای ساختارهای مربعی دولایه تحت بار دینامیکی به صورت زیر بیان می شود:

$$\psi_q = \left(\frac{L}{H_f} \cdot \frac{r}{H_b} \right)^{C_1} \cdot \left(\frac{\rho_f V_0^2}{\sigma_{0,f}} \right)^{C_2} \cdot \left(\frac{\rho_b V_0^2}{\sigma_{0,b}} \right)^{C_3} \cdot \left(\frac{1}{\xi_f} \right)^{C_4} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b} \right)^{C_5} \quad (۲۴)$$



شکل ۱۵- دیاگرام آزاد نیروهای غشایی در یک المان از ورق [۱۰]

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \quad (۱۶)$$

با تعریف پارامترهای بی بعد $Y = y/L$ ، $X = x/L$ ، $m_x = M_x/M_0$ ، $T = C_s t/H$ ، $W = w/H$ ، $n_x = N_x/N_0$ ، $m_{xy} = M_{xy}/M_0$ ، $m_y = M_y/M_0$ ، $n_{xy} = N_{xy}/N_0$ ، $n_y = N_y/N_0$ معادله حاکم بر ورق مربعی به فرم بی بعد تبدیل می شود (معادله ۱۷) [۱۰].

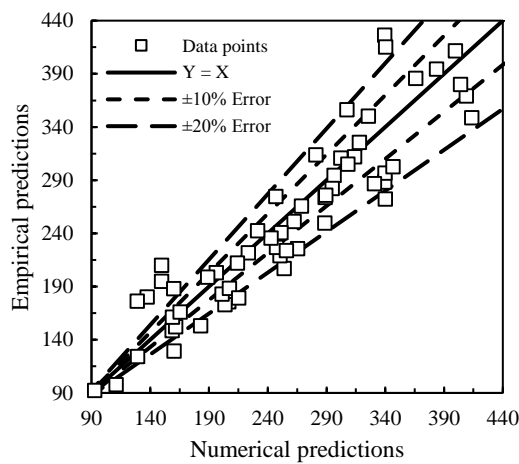
$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left(n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \left(\frac{\rho C_s^2}{\sigma_0} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_0} \right) \quad (۱۷)$$

در تعاریف بالا، L نصف طول ورق مربعی، M_0 گشتار خمشی کاملاً پلاستیک، N_0 نیروی غشایی کاملاً پلاستیک، C_s سرعت صوت در محیط، X و Y مختصات بی بعد، T زمان بی بعد و W خیز بی بعد هستند؛ همچنین، m_x ، m_y و m_{xy} ، گشتاورهای خمشی بی بعد و n_x ، n_y و n_{xy} ، نیروهای غشایی بی بعد هستند. جهت افزودن اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش، رابطه ۱۷ به صورت معادله ۱۸ تغییر می کند [۱۰].

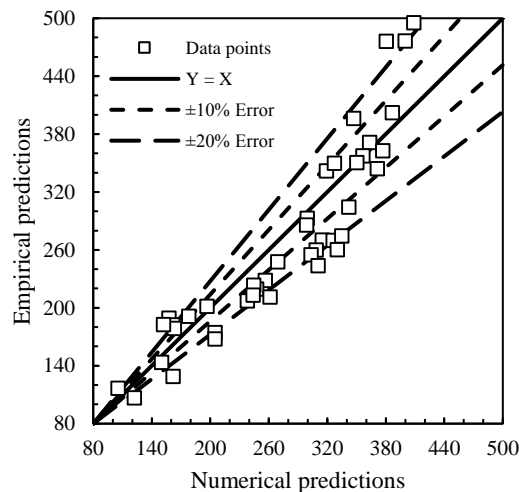
$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left(n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \left(\frac{\rho C_s^2}{\sigma_d} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_d} \right) \quad (۱۸)$$

$$\frac{V_r}{V_0} = 3.92 \times 10^{-6} \times \left(\frac{R}{H_f} \cdot \frac{r}{H_b} \right)^{2.34} \left(\frac{\rho_f V_0^2}{\sigma_{0,f}} \right)^{-0.399} \left(\frac{\rho_b V_0^2}{\sigma_{0,b}} \right)^{-0.595} \left(\frac{1}{\xi_f} \right)^{-5.46} \left(\frac{1}{\xi_b} \right)^{-0.689} \quad (28)$$

$$\frac{V_r}{V_0} = 4.92 \times 10^{-6} \times \left(\frac{R}{H_f} \cdot \frac{r}{H_b} \right)^{2.22} \left(\frac{\rho_f V_0^2}{\sigma_{0,f}} \right)^{-0.248} \left(\frac{\rho_b V_0^2}{\sigma_{0,b}} \right)^{-0.274} \left(\frac{1}{\xi_f} \right)^{-4.75} \left(\frac{1}{\xi_b} \right)^{-0.445} \quad (29)$$



شکل ۱۶- مقایسه بین پیش‌بینی مدل تجربی مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت باقی‌مانده برای پرتابه مخروطی



شکل ۱۷- مقایسه بین پیش‌بینی مدل تجربی و مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت باقی‌مانده برای پرتابه سر تخت

که در آن r شعاع هندسی پرتابه است. با توجه به توضیحات ارائه شده رابطه بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن و همچنین نسبت سرعت باقیمانده به سرعت اولیه پرتابه برای ورق‌های دولایه دایروی تحت نفوذ پرتابه سر تخت و مخروطی برابر است با:

$$\frac{W_0}{H} = \hat{C}_0 \cdot \psi_c \quad (25)$$

$$\frac{V_r}{V_0} = \hat{C}_1 \cdot \psi_c \quad (26)$$

که در آن

$$\psi_c = \left(\frac{R}{H_f} \cdot \frac{r}{H_b} \right)^{C_1} \cdot \left(\frac{\rho_f V_0^2}{\sigma_{0,f}} \right)^{C_2} \cdot \left(\frac{\rho_b V_0^2}{\sigma_{0,b}} \right)^{C_3} \cdot \left(\frac{1}{\xi_f} \right)^{C_4} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b} \right)^{C_5} \quad (27)$$

که در آن R شعاع هندسی ورق است؛ همچنین رابطه بی‌بعد نرخ کرنش برای ورق دایره‌ای از رابطه $\xi = \left(\frac{V_0 H}{3\sqrt{2} R^2 D} \right)^{\frac{1}{q}}$ محاسبه است.

اکنون، هدف به دست آوردن ضرایب مجهول در معادلات ۲۵ و ۲۶ برای ساختارهای فلزی تقویت شده با روکش پلیمری است که برای این کار از روش جدیدی بر اساس رگرسیون تکاملی چند جمله‌ای (EPR) استفاده شده است [۲۲-۴۱]. روش EPR یکی از انواع روش‌های هوش مصنوعی است که با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک (GA) و روش کمترین مربعات (LS) عمل می‌کند. در این روش ورودی‌های مساله مستقیماً از داده‌های میدانی به نرم افزار داده شده و با آنها آموزش و آزمایش می‌شود. نتایج خروجی این برنامه به صورت رابطه‌های ریاضی است.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در ابتدا تمامی نتایج عددی بر اساس عدد بی‌بعد ψ_c برای ورق‌های دایره‌ای دولایه تحت نفوذ پرتابه سر تخت و مخروطی به دست می‌آیند. اکنون، با استفاده از روش ریاضی پیشنهادی، ضرایب مجهول به صورت معادلات ۲۸ و ۲۹ درمی‌آیند. مقایسه بین مقادیر به‌دست‌آمده از روابط ۲۸ و ۲۹ برای سرعت باقی‌مانده و مقادیر محاسبه شده متناظر را می‌توان در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ مشاهده نمود، تطابق خوبی بین مدل و مقادیر محاسبه شده مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که به ترتیب برای پرتابه مخروطی و سر تخت ۵۸٪، ۵۵٪، از نقاط محاسبه شده در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا مدل المان محدود جدیدی از نفوذ پرتابه- های مختلف در ورق های فلزی تقویت شده با پلی اوره توسعه و صحت سنجی شد. صحت سنجی مدل عددی با در نظرگیری حالت شکست هدف، سرعت باقی مانده و سرعت حد بالستیک صورت گرفت. نتایج مدل المان محدود به طور خلاصه عبارت اند از:

- در مدل المان محدود توسعه داده شده، از رابط پلی یومود برای مدل سازی نفوذ در ورق تقویت شده استفاده شد و توانایی این حل گر در شبیه سازی پلی اوره نشان داده شد.
- در سرعت های پایین تر در ورق فلزی شکست از نوع پتالینگ مشاهده شده است و با بالا رفتن سرعت، حالت شکست پلاگینگ در هدف مشاهده می شود.
- با تغییر مکان پوشش پلی اوره از جلوی ورق به پشت آن بهبودی چشمگیر در سرعت حد بالستیک اهداف مشاهده شده است که خود نشان می دهد، استفاده از این پوشش در پشت ورق انتخاب بهتری است و دلیل این امر را می توان در جذب بیشتر انرژی پوشش پلی اوره زمانی جستجو کرد که در پشت هدف استفاده شود.
- چندانایه کردن ورق فولادی و استفاده از لایه پلی اوره در مرکز آن ها یا به عبارت دیگر ورق ساندویچی، مزیت خاصی روی سرعت حد بالستیک و سرعت باقی مانده در پیکربندی های بررسی شده در این مقاله نداشته است. به عبارت دیگر ورق فولادی تکی لایه باروکش پلی اوره نسبت به ورق ساندویچی با ضخامت کلی فولاد و پلی اوره یکسان عملکردی بهتری در مقابل پرتابه داشته است و سرعت حد بالستیک بالاتری را نشان داده است.
- بانک داده عددی از پدیده نفوذ پرتابه مخروطی و سر تخت با در نظرگیری متغیرهایی نظیر سرعت پرتابه، ضخامت ورق و نوع لایه چینی ایجاد گردید.

در ادامه نیز با استفاده از روش جدیدی بر اساس رگرسیون تکاملی چند جمله ای (EPR) بهینه شده برای استخراج ضرایب مجهول معادلات، مدلی بی بعد ارائه گردید که به خوبی توانایی پیش بینی سرعت باقی مانده در ورق های تقویت شده را دارد. این مدل پارامترهایی نظیر، ضخامت لایه ها، سرعت پرتابه، تنش تسلیم لایه ها، چگالی لایه ها، نوع لایه چینی و قطر ورق را در محاسبه سرعت باقی مانده در نظر گرفته که در نوع خود بی نظیر است.

۷- مراجع

- [1] Bahei-El-Din Y, George J.D, Olivia J.F (2006) A blast-tolerant sandwich plate design with a polyurea interlayer. *Int J Solids Struct* 43(25-26): 7644-7658.
- [2] Gupta N, Iqbal M, Sekhon G (2006) Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt-and hemispherical-nosed projectiles. *Int J Impact Eng* 32(12): 1921-1944.
- [3] Bahei-El-Din YA, Dvorak GJ (2007) Behavior of sandwich plates reinforced with polyurethane/ polyurea interlayers under blast loads. *J Sandwich Struct Mater* 9(3): 261-281.
- [4] Amini MR, Isaacs JB, Nemat-Nasser S (2010) Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. *Int J Impact Eng* 37: 82-89.
- [5] Roland CM, Fragiadakis D, Gamache RM (2010) Elastomer-steel laminate armor. *Compos Struct* 92(5): 1059-1064.
- [6] Xue L, Mock W, Belytschko T (2010) Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating. *Mech Mater* 42(11): 981-1003.
- [7] Mohotti D, Ali M, Ngo T, Lu J, Mendis P (2014) Strain rate dependent constitutive model for predicting the material behaviour of polyurea under high strain rate tensile loading. *Mater Des* 2013(53): 830-837.
- [8] Mohott D, Ngo T, Raman SN, Mendis P (2015) Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. *Mater Design* 82(2015): 1-17.
- [9] Babaei H, Mostofi T.M, Alitavoli M, Darvizeh A (2016) Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Exp Tech* 40 (6): 1485-1494.
- [10] 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

- layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *Int J Impact Eng* 125: 93-106.
- [24] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2017) The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin Walled Struct* 118: 1-11.
- [25] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain* 53(4): e12235.
- [26] Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K (2017) Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Tech* 315: 171-81.
- [27] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E J Process MechEng* 231(5): 939-950.
- [28] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2016) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420716654195.
- [29] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Saeidinejad A (2017) Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading. *J Appl Mech Tech Phys* 58(1): 139-147.
- [30] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2016) Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420716660875.
- [31] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 233(7): 1449-1471.
- [32] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH (2015) Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Struct Eng Mech* 56(4): 535-548.
- [33] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2015) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci* 0954406215614336.
- normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Struct* 112: 118-124.
- [11] Pajjuri VVK, Tabarraei A, Smelser R (2017) Penetration resistance of 4340 steel/polyurea laminate. The University of North Carolina at Charlotte.
- [12] Hatami H, Rad MS, Jahromi AG (2017) A theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads. *Int J Impact Eng* 109: 224-239.
- [13] Jahromi AG, Hatami H (2017) Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact. *Thin Wall Struct* 116: 1-11.
- [14] Hatami H, Fathollahi AB (2018) Theoretical and numerical study and comparison of the inertia effects on the collapse behavior of expanded metal tube absorber with single and double cell under impact loading. *AUT J Mech Eng* 50: 999-1014.
- [15] Jahromi AG, Hatami H (2018) Numerical behavior study of expanded metal tube absorbers and effect of cross section size and multi-layer under low axial velocity impact loading. *AUT J Mech Eng* 49: 685-696.
- [16] Badkhor MS, Vahedi K, Oskouei AN (2019) Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic - metal semi-infinite targets. *J Solid Fluid Mech* 9(2): 31-45.
- [17] Badkhor MS, Oskouei AN, Vahedi K (2019) Evaluation of the projectile penetration models in the metal and ceramic targets. *J Solid Fluid Mech* 9(4): 77-92.
- [18] Johnson GR, Cook WH (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng Fract Mech* 21(1): 31-48.
- [19] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin Wall Struct* 144: 106332.
- [20] Manual AUs (2009) Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, Rhode Island, USA.
- [21] Arias A, Rodríguez-Martínez J, Rusinek A (2008) Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. *Eng Fract Mech* 75(6): 1635-1656.
- [22] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Struct* 107: 257-265.
- [23] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-

- hammer shock loading. Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng 231(3): 490-496.
- [38] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. Geomech Eng 9(2): 207-218.
- [39] Mostofi TM, Badkhor MS, Ghasemi E (2019) Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates. J Solid Fluid Mech 9(3) 65-80.
- [40] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. J Solid Fluid Mech 9(1): 71-83.
- [41] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. J Solid Fluid Mech 9(2): 15-29.
- [34] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates. Thin-Walled Struct 109: 367-376.
- [35] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. Thin-Walled Struct 123: 48-56.
- [36] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. Modares Mechanical Engineering 15(4): 361-368. (In Persian)
- [37] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water