



مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

مطالعه تجربی و عددی برخورد مرمی به صفحه فلزی با استفاده از معیار آسیب نرم هوپوترا

فرهاد حاجی ابوطالبی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۱۰/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰

چکیده

صفحات فلزی فولادی و آلومینیومی و هم‌چنین کامپوزیت‌ها کاربرد بسیار زیادی در صنایع نظامی و هوافضا داشته، حفظ ایمنی آن‌ها در برابر گلوله‌ها و مرمی‌ها و پیش‌بینی ناحیه آسیب دیده در اثر برخورد گلوله یا مرمی یکی از چالش‌های مهندسی و محققین است. در این پژوهش ابتدا، با استفاده از روش اجزاء محدود، مکانیک آسیب و معیار آسیب نرم هوپوترا موجود در نرم‌افزار آباکوس، اثر برخورد مستقیم مرمی به یک صفحه آلومینیومی مورد استفاده در صنایع نظامی شبیه‌سازی شده و نتایج به صورت عددی حاصل می‌گردد. سپس، تاثیر زاویه برخورد مرمی به صفحه بر روی مساحت و عمق ناحیه آسیب دیده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی نتایج، آزمایش شلیک مرمی به صفحه آلومینیومی تحت زوایای مربوطه به صورت عملی انجام شده و نتایج حاصله با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد. مقایسه نتایج عددی و تجربی آشکار می‌کند که شبیه‌سازی‌ها از دقت مناسبی برخوردار می‌باشند. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که معیار آسیب نرم هوپوترا به خوبی قادر است ناحیه تخریب شده و شکست را در حالت‌های تغییرشکل با نرخ کرنش بالا پیش‌بینی نماید.

کلمات کلیدی: برخورد مرمی؛ صفحه فلزی؛ شبیه‌سازی‌های عددی؛ معیار آسیب نرم هوپوترا.

Experimental and Numerical Study of Projectile Impact to Sheet Metal, using Hooputra's Ductile Damage Criterion

Farhad Haji Aboutalebi*

Assis. Prof., Mech. Eng. Dept., Univ. Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

Steel and aluminum sheet metals, and also composites have vast application in the military and aerospace industries, keeping the safety of those against balls and projectiles, and prediction of damaged zone affected by ball or projectile impact is one of the challenges of engineers and researchers. In this research, first, using the finite element method, damage mechanics, and Hooputra's ductile damage criterion existed in the ABAQUS software, effect of direct impact of projectile to an aluminum plate applied in the military industries is simulated and the results are numerically achieved. Then, the effect of oblique angle of projectile impact to the plate, on the area and depth of the damaged zone is investigated. In order to validate the results, the projectile shooting test into the aluminum plate under the corresponding angles is practically carried out and the obtained results are compared with the simulation results. Comparison of the numerical and empirical results reveals that the simulations are in good accuracy. Hence, it is concluded that the Hooputra's ductile damage criterion can well predict the failure and fracture zone in the high strain rate deformations.

Keywords: Projectile Impact; Sheet Metal; Numerical Simulations; Hooputra's Ductile Damage Criterion.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، استفاده از صفحات فلزی و هم‌چنین کامپوزیت‌ها در صنایع نظامی، هوافضا، کشتی‌رانی، خودروسازی و غیره گسترش زیادی پیدا نموده است. این صفحات که به خاطر سبکی و استحکام معمولاً از جنس آلایژهای فولاد یا آلومینیوم یا کامپوزیت هستند در بدنه تانک‌ها، هواپیماها، کشتی‌ها، خودروها و دیگر تولیدات به کار می‌روند. یکی از مهم‌ترین مسائل برای محصولات فوق، حفظ ایمنی آن‌ها در برابر شلیک گلوله‌ها و مرمی‌ها می‌باشد. یک سازوکار عملی برای سنجش ایمنی صفحات، بررسی میزان آسیب صفحه در اثر برخورد مرمی، از طریق تعیین شکل، مساحت و عمق ناحیه تخریب است. بنابراین پیش‌بینی مساحت و عمق ناحیه آسیب دیده صفحات در اثر برخورد گلوله یا مرمی به آن، همواره از چالش‌های مهندسی و محققین صنایع نظامی بوده است.

از گذشته تاکنون، پیش‌بینی آسیب یا شکست مواد بر اساس آزمایش‌های تجربی متداول و مرسوم بوده اما در برخی از موارد، انجام این آزمایش‌ها بسیار دردسرساز و پرهزینه است. امروزه با پیشرفت و توسعه سریع تکنیک‌های مکانیک محاسباتی تعیین استحکام، عمر مفید و پیش‌بینی شکست بسیار سریع‌تر و ارزان‌تر تمام خواهد شد. هم‌چنین با استفاده از این تکنیک‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان به راحتی و با هزینه کم، پارامترهای مختلف را تغییر داده و اثر آن‌ها را بررسی نمود.

تاکنون پژوهش‌های تحلیلی، عددی و عملی بسیار زیادی در زمینه برخورد ساچمه یا مرمی به صفحات یا کلاه نظامی و ایجاد حفره در آن‌ها توسط محققین انجام شده است. در تحقیقات عددی، تلاش شده اثر برخورد شبیه‌سازی گردیده و شکل، مساحت و عمق ناحیه تخریب شده پیش‌بینی شود. تعدادی از این تحقیقات در زیر آورده شده است:

در خلال جنگ جهانی دوم (سال ۱۹۴۸) و به منظور بررسی کاربردهای نظامی، تیلور^۱ برای اولین بار برخورد سریع یک استوانه لاغر تخت به یک دیواره صلب را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار داد و توانست استحکام تسلیم دینامیکی استوانه را در هنگام برخورد تعیین نماید [۱].

1. Taylor

در سال ۱۹۷۸، جوناس^۲ و همکارش به روش اجزاء محدود، برخورد یک استوانه لاغر به صفحه تقویت شده تحت زوایای مختلف را شبیه‌سازی کرده و نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه نمودند [۲]. ایشان در این تحقیق از مدل الاستیک-پلاستیک کامل^۳ برای رفتار ماده استفاده کرده و لذا نتوانستند نتایج تجربی را به خوبی شبیه‌سازی نمایند.

بلچکو^۴ و همکارش در سال ۱۹۸۷ الگوریتم جدیدی برای مدل‌سازی سه‌بعدی برخورد دو جسم ارائه نموده و توانستند برخورد یک استوانه لاغر به صفحه را شبیه‌سازی نمایند [۳]. به دلیل استفاده از مدل الاستیک-پلاستیک برای رفتار ماده، نتایج از کیفیت و دقت مناسبی برخوردار نبود.

در سال ۱۹۸۹، هولیان^۵ و همکارش به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی برخورد گلوله فلزی به یک صفحه لاغر در سرعت‌های بالا پرداختند [۴]. در تحقیق فوق، به دلیل استفاده از مدل الاستیک-پلاستیک کامل، نتایج شبیه‌سازی‌ها چندان مناسب و مطابق با نتایج تجربی ارائه نشده بود.

میر^۶ در سال ۱۹۹۰ برخورد یک ساچمه فلزی به یک صفحه کامپوزیتی را مدل‌سازی نمود [۵]. وی در این پژوهش به روش اویلری توانست سوراخ شدن صفحه را با دقت مناسب تری شبیه‌سازی نماید.

در سال ۱۹۹۱، چو^۷ و همکاران نفوذ یک میله در صفحه را به صورت تحلیلی و شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی نمودند [۶]. ایشان در این تحقیق از مدل الاستیک-پلاستیک جانسون^۸-کوک^۹ برای رفتار ماده استفاده کرده و نتوانستند تا حدودی نفوذ میله به داخل صفحه را شبیه‌سازی نمایند.

شونبرگ^{۱۰} و همکارش در سال ۱۹۹۳ برخورد یک مرمی استوانه‌ای با سرعت بالا به یک دیسک لاغر را به صورت پارامتری مورد مطالعه قرار دادند [۷]. ایشان در این مطالعه از معادله حالت مای^{۱۱}-گرونیسن^{۱۲} برای رفتار ماده استفاده

2. Jonas

3. Elastic- Perfect Plastic

4. Belytschko

5. Holian

6. Meier

7. Chou

8. Johnson

9. Cook

10. Schonberg

11. Mie

12. Gruneisen

پژوهش با بهره‌گیری از مدل شکست برشی توانستند عبور مرمی از صفحه را تا حدود زیادی شبیه‌سازی کنند.

در سال ۲۰۰۴، گو^۹ و همکاران برخورد یک مرمی مخروطی به صفحه کامپوزیتی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند [۱۴]. در تحقیق فوق، به دلیل استفاده از مدل الاستیک-پلاستیک کامل، نتایج شبیه‌سازی‌ها چندان مناسب و مطابق با نتایج تجربی ارائه نشده بود.

شفلر^{۱۰} در سال ۲۰۰۵ به روش اویلری، برخورد یک مرمی مخروطی به صفحه آلومینیومی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمود [۱۵]. وی در این شبیه‌سازی از مدل الاستیک-پلاستیک جانسون-کوک استفاده کرده و نشان داد با استفاده از روش اویلری در این نوع شبیه‌سازی نمی‌توان نتایج را به خوبی آزمایش‌های عملی به دست آورد.

در سال ۲۰۰۶، تنگ^{۱۱} و همکارانش نفوذ و عبور یک مرمی سرتخت در صفحه را به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کردند [۱۶]. ایشان در این تحقیق از شش مدل مختلف شکست برای رفتار ماده استفاده نموده و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمودند.

سونگ^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۰۸ برخورد یک مرمی به صفحات تقویت‌شده را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند [۱۷]. ایشان از کرنش شکست برای مدل‌سازی رفتار شکست ماده استفاده نموده و نواحی شکست را با دقت قابل قبولی به دست آوردند.

در سال ۲۰۰۹، رشید^{۱۳} و همکاران برخورد یک مرمی سرتخت به صفحه کامپوزیتی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند [۱۸]. در تحقیق فوق، به دلیل استفاده از یک مدل آسیب غیرمحلی، نتایج شبیه‌سازی‌ها تطابق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان داد.

اقبال^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۱۰ برخورد مرمی به صفحه نازک آلومینیومی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند [۱۹]. ایشان با استفاده از مدل الاستیک-پلاستیک

کرده و موفق شدند نفوذ مرمی به داخل دیسک را تا حدودی مطابق با نتایج تجربی شبیه‌سازی نمایند.

در سال ۱۹۹۴، جنک^۱ و همکاران برخورد یک مرمی استوانه‌ای با سر گرد به یک صفحه تخت کامپوزیتی را به روش تحلیلی بررسی نمودند [۸]. در تحقیق فوق، ایشان افت خواص ماده را در نظر گرفته و نشان دادند که بدون در نظر گرفتن افت خواص ماده نمی‌توان به نتایج مناسبی رسید.

ناندلال^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۸ برخورد یک مرمی استوانه‌ای نوک تیز به صفحه را مدل‌سازی کردند [۹]. ایشان در این مدل‌سازی با استفاده از مدل آسیب ماتزنمایر^۳ توانستند سوراخ شدن صفحه را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نمایند.

در سال ۱۹۹۹، کروز^۴ و همکاران برخورد مرمی به ورق فلزی نازک را به صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. ایشان در این تحقیق به تاثیر پارامترهای مختلف بر شکل ناحیه تخریب شده پرداختند.

لی^۵ در سال ۲۰۰۱ برخورد یک استوانه بلند به صفحه مورب ساکن و متحرک را به صورت دوبعدی شبیه‌سازی نمود [۱۱]. وی در شبیه‌سازی فوق از مدل الاستیک-پلاستیک جانسون-کوک استفاده کرده و توانست نتایج نفوذ استوانه در صفحه را تا حدودی نشان دهد.

در سال ۲۰۰۲، بورویک^۶ و همکاران برخورد یک مرمی سر تخت، نیم‌کروی و مخروطی به صفحه فلزی ضخیم را به صورت دوبعدی شبیه‌سازی نمودند [۱۲]. ایشان در این تحقیق از مدل شکست جانسون-لیندهولم^۷ استفاده کرده و موفق شدند نتایج نفوذ و عبور مرمی از صفحه را به شکل مناسب نشان دهند.

گوو^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۳ برخورد یک مرمی سر تخت، نیم‌کروی و مخروطی به صفحه آلومینیومی ضخیم را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند [۱۳]. ایشان در این

1. Jenq
2. Nandlall
3. Matzenmiller
4. Kruse
5. Lee
6. Borvik
7. Lindholm
8. Guo

9. Gu
10. Scheffler
11. Teng
12. Song
13. Rashid
14. Iqbal

(۱۹۸۸) و لمتر^۶ (۱۹۹۲) انجام شده است [۲۳ و ۲۴]. امروزه مکانیک آسیب به عنوان عضو بالعی از خانواده تئوری مکانیک پیوسته که متمم تئوری پلاستیسیته و مکانیک شکست است شناخته می‌شود. آسیب، فرآیند فیزیکی پیشرونده‌ای است که در نهایت باعث شکست در ماده شده و به انواع نرم، ترد، خزشی، خستگی و غیره تقسیم‌بندی می‌گردد. مکانیک آسیب مطالعه‌ای است که کاهش تدریجی یا زوال ناگهانی مقاومت مکانیکی به واسطه بارگذاری، اثرات حرارتی یا شیمیایی را شامل می‌شود.

مفهوم اساسی موجود در همه مدل‌های آسیب پیوسته، بیان عیوب ریزساختاری توسط یک متغیر میدانی پیوسته است. این میدان پیوسته مشابه میدان‌های تنش و کرنش که بیانگر نیروها و جابجایی‌های محلی در ماده هستند می‌باشد. بر اساس ملاحظات میدان آسیب پیوسته، معادلات ساختاری موجود به گونه‌ای فرمول‌بندی و پیاده‌سازی می‌گردند که اثر آسیب پیشرونده در ماده به شکل زوال^۷ خواص مکانیکی از قبیل استحکام یا سفتی در نظر گرفته شود.

۲-۱- معیار آسیب نرم هوپوترا

معیار آسیب نرم هوپوترا مدلی برای پیش‌بینی شروع آسیب مربوط به حفره‌ها، رشد و جوانه‌زنی آن‌ها در فلزات نرم است. این مدل، کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب را به صورت تابعی از نسبت تنش سه محوره^۸ و نرخ کرنش در نظر می‌گیرد. این معیار می‌تواند هم‌زمان با معیارهای تسلیم فون میزز^۹، هیل^{۱۰}، جانسون-کوک و دراکر^{۱۱} - پراگر^{۱۲} مورد استفاده قرار گیرد. در این معیار، نسبت تنش سه محوره η به صورت معادله زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \quad (1)$$

σ_H تنش هیدرواستاتیک و σ_{eq} تنش معادل معیار پلاستیک مورد نظر (مثلاً معیار فون میزز) است. هوپوترا و

جانسون-کوک توانستند نتایج نفوذ مرمی در صفحه را در زوایای مختلف با دقت نسبتاً مناسبی نشان دهند.

در سال ۲۰۱۱، بابایی و همکاران برخورد یک مرمی سر تخت به صفحه چندلایه را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند [۲۰]. ایشان در این تحقیق از مدل الاستیک-پلاستیک جانسون-کوک استفاده کرده و توانستند نتایج نفوذ مرمی در صفحه را تا حد قابل قبولی نشان دهند.

کیدان^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ برخورد یک ساچمه فلزی به صفحه آلومینیومی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نموده و توانستند با استفاده از روش بدون المان، سوراخ شدن صفحه را با دقت مناسبی پیش‌بینی کنند [۲۱].

در تحقیقات فوق، عموماً از معیارهای پلاستیک معمولی یا شکست برای پیش‌بینی گسیختگی المان‌ها و نواحی آسیب دیده استفاده گردیده است. حال آن‌که مدل‌های فوق، برای فلزات نرم که حتی در خلال تغییرشکل‌های سریع و نرخ کرنش بالا، کرنش پلاستیک زیادی را تحمل می‌نمایند چندان دقیق نبوده و نمی‌تواند با دقت مناسب اثرات برخورد گلوله یا مرمی به صفحه فلزی نرم را پیش‌بینی کند. لذا در این پژوهش ابتدا، با استفاده از روش اجزاء محدود، مکانیک آسیب و معیار آسیب نرم هوپوترا^۲ موجود در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر برخورد مرمی به یک صفحه آلومینیومی مورد استفاده در صنایع هواپیماسازی تحت زوایای برخورد مختلف، شبیه‌سازی می‌شود. سپس به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، آزمایش شلیک مرمی به صفحه آلومینیومی تحت زوایای مربوطه به صورت عملی نیز انجام شده و نتایج حاصله با نتایج عددی مقایسه می‌گردد.

۲- مکانیک آسیب

مکانیک آسیب پیوسته^۳ ابزار جدیدی در جعبه ابزار مکانیک مهندسی است. اساس تئوری به کاجانوف^۴ (۱۹۵۸) نسبت داده می‌شود [۲۲]. البته توسعه و استخراج مکانیک آسیب از سال ۱۹۸۰ و به خصوص تحت تأثیر تحقیقات شابوش^۵

6. Lemaitre
7. Degradation
8. Stress Triaxiality
9. Von Mises
10. Hill
11. Drucker
12. Pruger

1. Kidane
2. Hooputra
3. Continuum Damage Mechanics (CDM)
4. Kachanov
5. Chaboche

معیار آسیب نرم هویپوترا تا به آنجا ادامه می‌یابد که شرط زیر ارضاء شود:

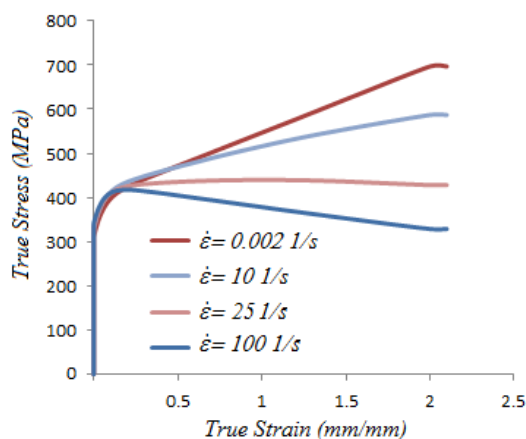
$$D = \int_0^{\varepsilon_{eq}^{**}} \frac{d\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{**}} = 1 \quad (3)$$

D متغیر آسیب نرم هویپوترا است که همراه با تغییر شکل پلاستیک به صورت یکنواخت از صفر (ماده ایده‌آل) تا یک شکست کامل) افزایش یافته و در هر مرحله از حل، تغییرات مثبت آن با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{**}} \geq 0 \quad (4)$$

جدول ۱- خواص مکانیکی و پارامترهای آسیب آلیاژ آلومینیوم ۷۱۰۸ [۲۵]

$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	2700
$E(GPa)$	70
ν	0.33
ε_T^+ (Static)	0.26
ε_T^- (Static)	193
k_0 (Static)	1.759
ε_T^+ (Dynamic)	0.44
ε_T^- (Dynamic)	1494
k_0 (Dynamic)	2.876



شکل ۱- منحنی تنش- کرنش واقعی آلیاژ آلومینیوم ۷۱۰۸ در نرخ کرنش‌های متفاوت [۲۵]

همکاران در سال ۲۰۰۴ عبارت ساده‌ای برای معیار آسیب نرم ارائه کردند که فقط نیاز به تعداد محدودی آزمایش دارد [۲۵]. بر طبق این مدل، کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب ε_{eq}^{**} برابر است با:

$$\varepsilon_{eq}^{**} = \frac{\varepsilon_T^+ \text{ Sinh}[k_0(\eta^- - \eta)] + \varepsilon_T^- \text{ Sinh}[k_0(\eta - \eta^+)]}{\text{ Sinh}[k_0(\eta^- - \eta^+)]} \quad (2)$$

ε_T^- و ε_T^+ کرنش‌های پلاستیک معادل در شروع آسیب نرم برای حالت کشش دومیوری یکسان^۱ و فشار دومیوری یکسان^۲ می‌باشند. برای مواد همسان‌گرد، نسبت تنش سه محوره در حالت کشش دومیوری یکسان $\eta^+ = 0.666$ و در حالت فشار دومیوری یکسان $\eta^- = -0.666$ است. در معیار آسیب نرم هویپوترا، سه پارامتر ε_T^+ ، ε_T^- و k_0 وجود دارد که باید به صورت تجربی به دست آیند. این پارامترها تابع جنس ماده، نرخ کرنش و درجه حرارت هستند. ε_T^+ می‌تواند مستقیماً از آزمایش اریکسن^۳ ($\eta = \eta^+$) حاصل گردد. دو آزمایش دیگر برای تعیین ε_T^- و k_0 ، آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای^۴ (با نسبت عرض به ضخامت بیشتر از ۴) تحت شرایط کرنش صفحه‌ای ($\eta = 0.577$) و آزمایش کشش ساده نمونه شیاردار^۵ ($\eta = 0.333$) می‌باشند.

در آزمایش‌های فوق، کرنش شکست محلی با درج نقاط مشبک بر روی سطح نمونه قابل استخراج است. همچنین در آزمایش کشش نمونه شیاردار، کرنش شکست می‌تواند توسط تغییرات ضخامت ورق در صفحه شکست محاسبه گردد. برای هر نرخ کرنش مورد نظر، لازم است آزمایش‌های فوق انجام گرفته و پارامترهای مربوط به آسیب نرم تعیین شوند. هویپوترا و همکاران پارامترهای فوق را برای آلیاژ آلومینیوم ۷۱۰۸، در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تعیین نمودند [۲۵]. این پارامترها به همراه خواص مکانیکی آلیاژ فوق در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین منحنی تنش- کرنش واقعی آلیاژ آلومینیوم ۷۱۰۸ در نرخ کرنش‌های متفاوت در شکل ۱ ارائه شده است [۲۵].

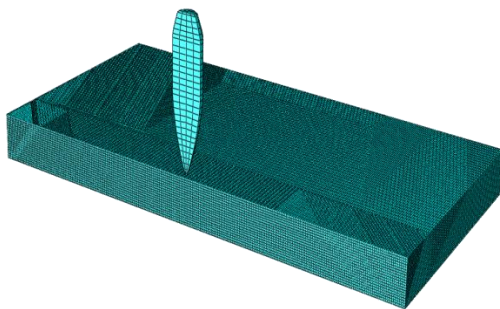
1. Equibiaxial Tensile
2. Equibiaxial Compressive
3. Erichsen
4. Three Point Bending
5. Notched

۳- شبیه‌سازی‌های عددی

در این بخش، مراحل انجام شبیه‌سازی عددی برخورد مرمی به صفحه فلزی و نتایج حاصل از آن ارائه می‌گردد. به عنوان حالت مینا، ابتدا زاویه برخورد^۱ مرمی به صفحه، صفر درجه (حالت عمودی) و جنس صفحه آلیاژ آلومینیوم در نظر گرفته می‌شود. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و حصول نتایج، به منظور بررسی شرایط مختلف، تاثیر پارامتر زاویه برخورد مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور، شبیه‌سازی‌ها برای زوایای برخورد ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ تکرار شده و نتایج تغییر شکل صفحه فلزی، سوراخ شدن آن و شکل حفره ایجاد شده حاصل می‌گردد. در انتها، نتایج عددی تغییر شکل‌ها با نتایج عملی حاصل از آزمایش شلیک مقایسه شده و دقت آن مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. هم‌چنین نمودار تغییرات سرعت مرمی و افت آن بر حسب زمان در هر یک از حالات فوق به دست می‌آید. لازم به ذکر است که با توجه به کاربرد صفحات فلزی در تجهیزات و کلاه‌های نظامی، یکی از مهمترین مسایل افت بیشتر سرعت مرمی، کاهش صدمات جانی و مالی می‌باشد.

صفحه فلزی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۱۰۸ به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ و ضخامت ۸ میلیمتر با مشخصات جنس مطابق جدول ۱ و معادله ساختاری میز با رفتار تنش-کرنش در نرخ کرنش‌های متفاوت (مطابق شکل ۲) و هم‌چنین مرمی سربی استاندارد به قطر ۹ میلیمتر با مشخصات جنس ارائه شده در جدول ۲ برای برخورد به صفحه انتخاب گردید. به علت تقارن نصف هندسه شبیه‌سازی شده و شرایط تقارن بر روی صفحه تقارن اعمال گردید. مرمی در نزدیکی مرکز صفحه و با زاویه انحراف صفر درجه از حالت عمودی (عمود بر آن) قرار داده شد. صفحات جانبی جسم به صورت کاملاً گیردار و هم‌چنین سرعت اولیه مرمی در هنگام برخورد به صفحه ۹۰۰ متر بر ثانیه تعریف گردید. شکل ۲ نصف مدل اجزاء محدود برخورد مرمی به صفحه آلومینیومی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، به منظور حصول دقت بیشتر، اطراف ناحیه برخورد از المان‌های ریزتر در مقایسه با نواحی دیگر صفحه استفاده شد.

$\rho(\frac{kg}{m^3})$	11340
$E(GPa)$	20
ν	0.44
$\sigma_y(MPa)$	30
$\sigma_u(MPa)$	50



شکل ۲- نصف مدل اجزاء محدود برخورد مرمی به صفحه آلومینیومی

برای المان‌بندی صفحه و مرمی به ترتیب از تعداد ۳۲۵۰۰۰ و ۳۶۴ المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای کاهش یافته و با کنترل پدیده ساعت شنی^۲ استفاده گردید. کلیه شبیه‌سازی‌ها برای زوایای برخورد ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ نیز انجام شده و نتایج تغییر شکل صفحه فلزی، سوراخ شدن آن و شکل حفره ایجاد گردیده حاصل شد. تحلیل‌ها از نوع صریح دینامیکی^۳ انتخاب گردیده و تا آن جا ادامه داده شد که مقدار متغیر آسیب نرم در المان‌ها به عدد یک (شکست کامل) برسد. در این صورت المان‌های بحرانی از تنش آزاد گردیده و قادر به تحمل تنش نخواهند بود. با استفاده از تکنیک حذف المان‌های بحرانی در داخل نرم‌افزار، وقوع شکست و ایجاد حفره در صفحه قابل دیدن خواهد بود.

۳-۱- آزمایش‌های عملی

به منظور انجام آزمایش‌های عملی، تعدادی صفحه فلزی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۱۰۸ به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ و ضخامت

2. C3D8R
3. Dynamic Explicit

1. Oblique Angle

تحت زاویه‌های انحراف صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و مقایسه آن با نتایج عملی را نشان می‌دهد.

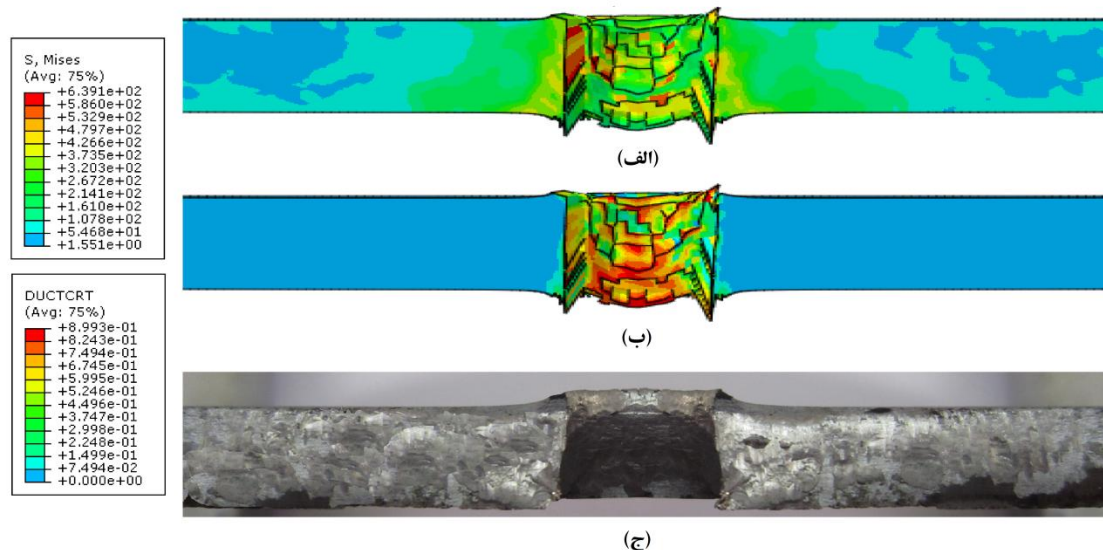
مقایسه نتایج آشکار می‌کند که مدل آسیب نرم هویپوترا قادر است فرآیند برخورد مرمی به صفحه فلزی، ایجاد حفره و عبور از آن را با دقت مناسب شبیه‌سازی نماید. البته بین نتایج شبیه‌سازی‌ها و نتایج عملی تفاوت اندکی مشاهده می‌گردد که علت آن می‌تواند مربوط به مشکل بودن تنظیم دقیق زاویه برخورد، عدم تطابق کامل فشنگ‌های مورد استفاده با دستورالعمل و همچنین عدم اطلاع از سرعت دقیق مرمی در لحظه برخورد باشد.

با دقت در نتایج، مشخص می‌گردد که وضعیت برخورد تحت زاویه ۷۵ درجه حالت خاصی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها آشکار می‌کند که با توجه به زاویه انحراف زیاد یا قدرت نفوذ کم مرمی در این وضعیت و سخت بودن صفحه، مرمی نمی‌تواند صفحه را سوراخ کرده و از آن عبور نماید. همان گونه که شکل ۸ نشان می‌دهد نتایج آزمایش عملی نیز این موضوع را تایید می‌کند. در این وضعیت، مولفه عمودی سرعت که نقش به‌سزایی در نفوذ دارد به شدت کاهش یافته، مولفه مماسی سرعت افزایش یافته و باعث می‌گردد که مرمی مماس بر صفحه حرکت نماید. لذا در این حالت، صفحه می‌تواند مانع نفوذ مرمی شده، خسارات مالی و صدمات جانی را به حداقل برساند.

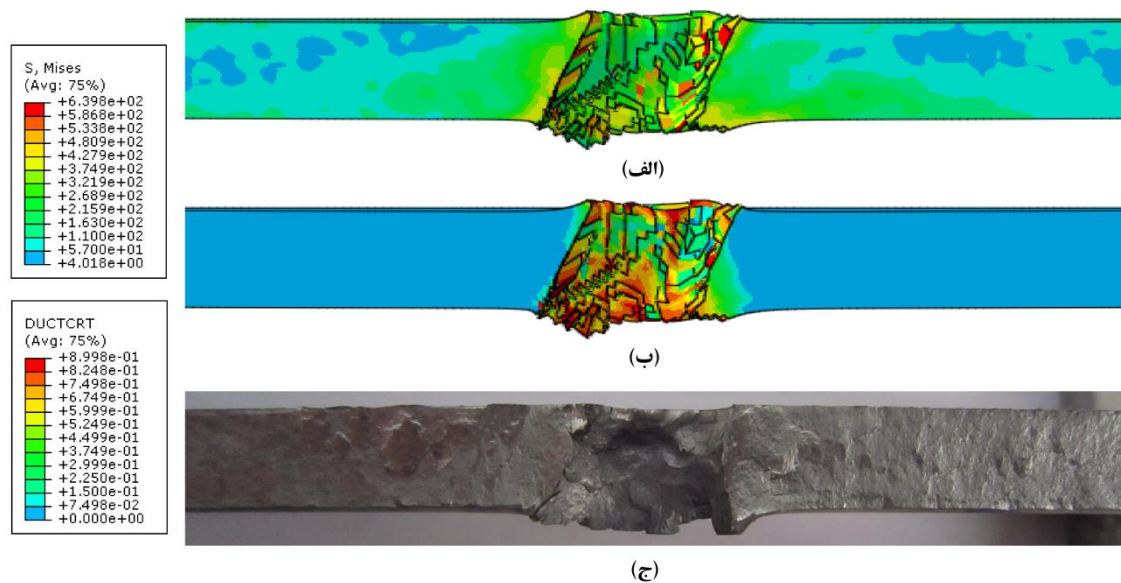
۸ میلیمتر و همچنین فشنگ شکاری با مرمی سربی استاندارد به قطر ۹ میلیمتر تهیه گردید. برای تسهیل در تنظیم زاویه برخورد مرمی به صفحه، شلیک به صورت کاملاً افقی انجام گرفت و زاویه مورد نظر برخورد به صفحه آلومینیومی اعمال شد. برای این منظور، در هر آزمایش صفحات جانبی صفحه آلومینیومی در داخل یک قاب فلزی قرار داده شد. سپس، قاب فلزی بر روی زاویه مورد نظر و به صورت یک سطح شیب‌دار تنظیم و توسط اتصال نقطه‌جوش کاملاً مقید گردید. شلیک از فاصله ۲۵ متری صفحه انجام شد، زیرا مطابق با دستورالعمل سلاح‌های شکاری، مرمی یک منحنی سهمی شکل را طی کرده، در این فاصله هم‌تراز با افق قرار گرفته و به سرعت نامی خود یعنی ۹۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد. برای افزایش دقت، هر شلیک سه مرتبه انجام گردید و بهترین نتایج در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمایش‌های تجربی شلیک، به منظور مقایسه راحت‌تر نتایج حاصله با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، صفحات فلزی از روی صفحه تقارن بریده شده و توسط دوربین عکاسی با زاویه عمود بر مقطع تصویربرداری گردید.

۳-۲- نتایج و اعتبارسنجی

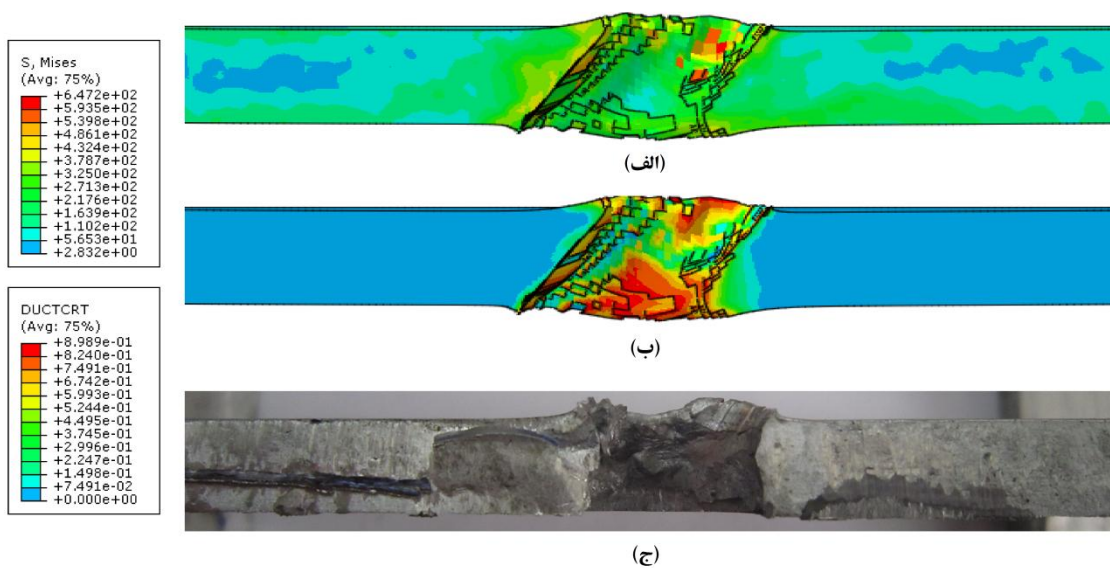
شکل‌های ۳-۸، نتایج عددی کانتورهای تنش و آسیب حاصل از شبیه‌سازی برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی



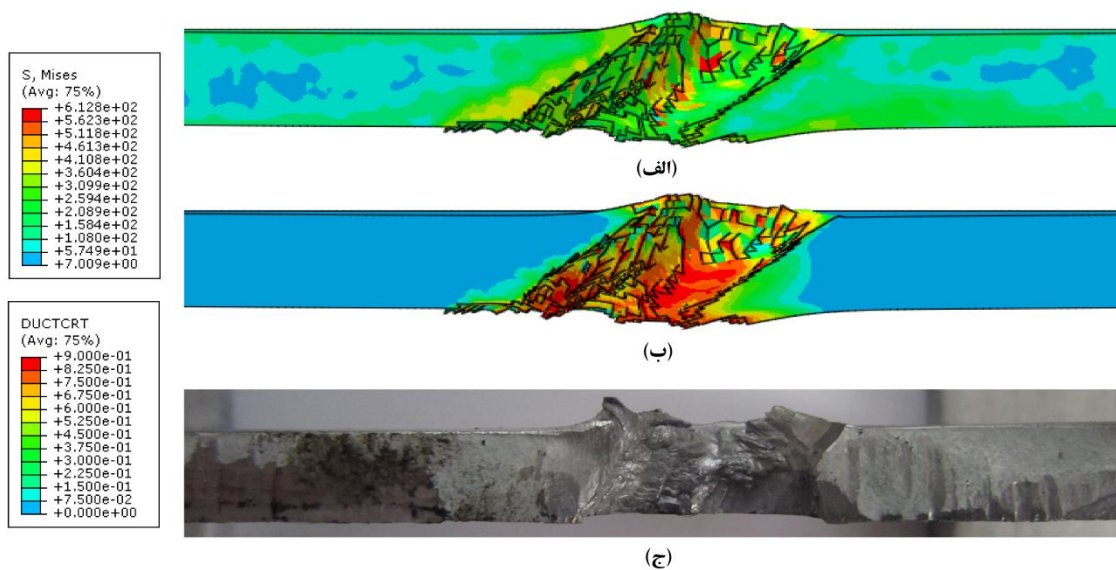
شکل ۳- نتایج برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف صفر درجه، الف) تنش، ب) آسیب و ج) عملی



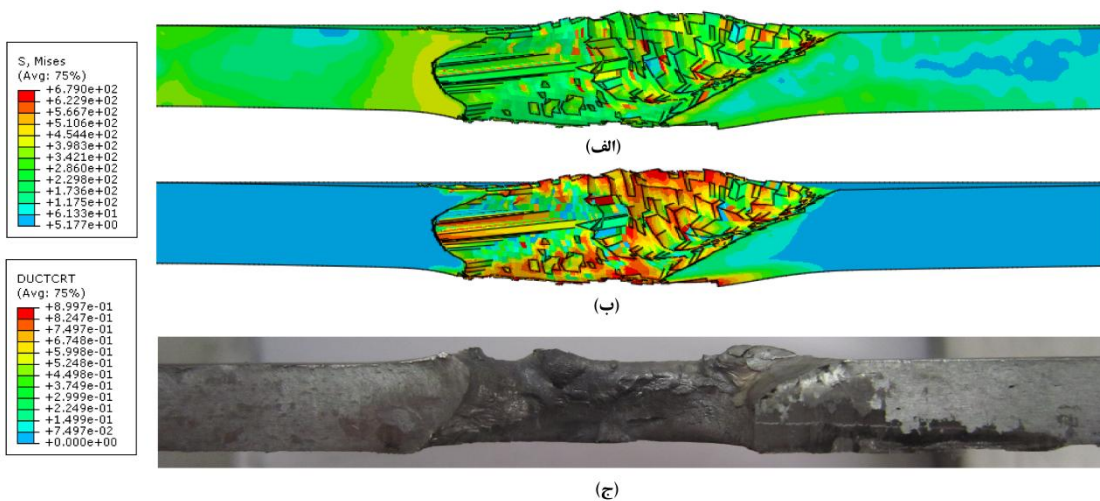
شکل ۴- نتایج برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف ۱۵ درجه، الف) تنش، ب) آسیب و ج) عملی



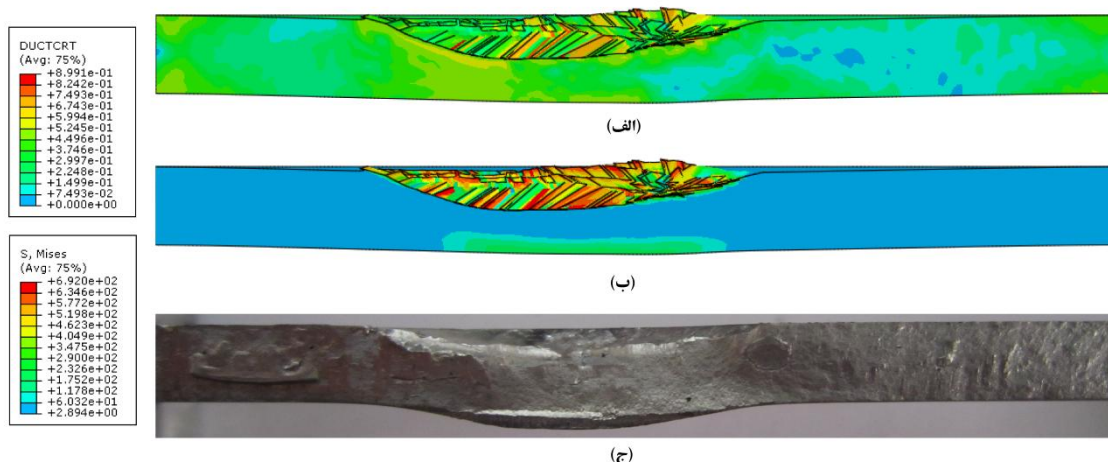
شکل ۵- نتایج برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف ۳۰ درجه، الف) تنش، ب) آسیب و ج) عملی



شکل ۶- نتایج برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف ۴۵ درجه، الف) تنش، ب) آسیب و ج) عملی



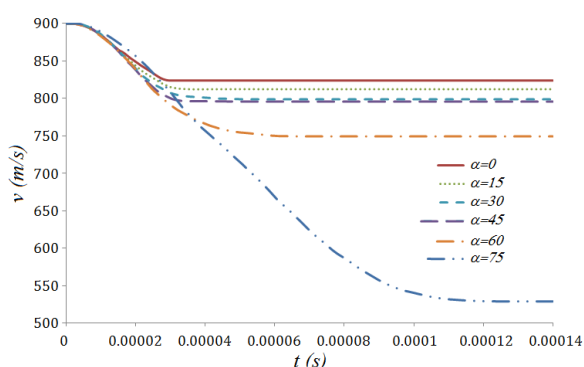
شکل ۷- نتایج برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف ۶۰ درجه، الف) تنش، ب) آسیب و ج) عملی



شکل ۸- نتایج برخورد مرمی سربی به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف ۷۵ درجه، (الف) تنش، (ب) آسیب و (ج) عملی

۳-۳- افت سرعت

شکل ۹، نمودار تغییرات سرعت مرمی بر حسب زمان، در اثر برخورد به صفحه تحت زوایای انحراف مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل بیان می‌کند در اثر برخورد، سرعت مرمی در زوایای انحراف صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه از مقدار اولیه ۹۰۰ متر بر ثانیه کاهش یافته و در هنگام خروج از صفحه به ترتیب به مقدار نهایی ۸۲۴، ۸۱۲، ۷۹۹، ۷۹۶، ۷۴۹ و ۵۲۹ متر بر ثانیه می‌رسد. واضح است که هرچه زاویه انحراف بیشتر گردد، مرمی برای خروج از صفحه باید فاصله بیشتری را طی کرده و المان‌های زیادتری از صفحه را از پیش‌رو بردارد. بنابراین بر المان‌های بیشتری غلبه کرده، باعث تغییر شکل زیادتر صفحه شده و در نتیجه سرعت آن بیشتر افت می‌کند.



شکل ۹- نمودار تغییرات سرعت مرمی سربی در اثر برخورد به صفحه آلومینیومی با زاویه انحراف صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه

اما در زاویه برخورد ۷۵ درجه، با توجه به زاویه انحراف زیاد یا قدرت نفوذ کم مرمی در این وضعیت و سخت بودن صفحه، مرمی پس از غلبه بر تعدادی از المان‌ها و نفوذ کم در صفحه، برای خروج با مسیری طولانی و تعداد زیادی از المان‌ها مواجه می‌گردد. با تحت تاثیر قرار دادن این المان‌ها (همان‌گونه که در ناحیه سبز رنگ پایین شکل ۸-ب آشکار شده است)، سرعت آن دچار افت زیادتری گردیده و عملاً نمی‌تواند به راه خود ادامه دهد. لذا، به تدریج چرخیده، تغییر مسیر داده و بدون نفوذ، مماس بر صفحه خارج می‌شود. آزمایش‌های عملی نیز این موضوع را تایید کرده و مطابق شکل ۸-ج، بخشی از المان‌های بالایی صفحه تخریب شده، المان‌های زیری دچار تغییر شکل زیادی گردیده و ناحیه زیر دارای انحنای قابل توجه‌ای شده است. انحناء فوق در شکل ۸-ب نیز قابل مشاهده است.

۴- فهرست علائم

- D متغیر آسیب
- E مدول الاستیسیته
- k_0 پارامتر آسیب نرم هوپویترا
- علائم یونانی**
- ρ چگالی
- ν ضریب پواسون
- σ_y تنش تسلیم
- σ_T تنش سیلان

- stationary and moving oblique plates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 399-407, 2001.
- [12] T. Borvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, M. Langseth, perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part II: numerical simulations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, pp. 37-64, 2002.
- [13] J. Guo, G. Shi, Y. Wang, C. Lu, Efficient modeling of panel-like structures in perforation simulations, *Computers and Structures*, Vol. 81, pp. 1-8, 2003.
- [14] J. Gu, J. Xu, Finite element calculation of 4-step 3-dimensional braided composite under ballistic perforation, *Composites: Part B Engineering*, Vol. 35, pp. 291-297, 2004.
- [15] D. R. Scheffler, Modeling non-eroding perforation of an oblique aluminum target using the eulerian CTH hydrocode, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 461-472, 2005.
- [16] X. Teng, T. Wierzbicki, Evaluation of six fracture models in high velocity perforation, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 1653-1678, 2006.
- [17] W. Song, J. Ning, J. Wang, Normal impact of truncated oval-nosed projectiles on stiffened plates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1022-1034, 2008.
- [18] K. Rashid, A. R. Abu, M. K. Sun, Predicting mesh-independent ballistic limits for heterogeneous targets by a non-local damage computational framework, *Composites: Part B*, Vol. 40, pp. 495-510, 2009.
- [19] M. A. Iqbal, G. Gupta, N. K. Gupta, 3D numerical simulations of ductile targets subjected to oblique impact by sharp nosed projectiles, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, pp. 224-237, 2010.
- [20] B. Babaei, M. Shokrieh, K. Daneshjou, The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid projectiles, *Material Science and Engineering*, Vol. 530, pp. 208-217, 2011.
- [21] B. L. A. Kidane, G. Ravichandran, M. Ortiz, Verification and validation of the optimal transportation meshfree(OTM) simulation of terminal ballistics, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 42, pp. 25-36, 2012.
- [22] L. Kachanov, Time of the rupture process under creep conditions, *Izv. Akad. Nauk. SSR.*, Vol. 8, pp. 26-311, 1958.
- [23] J. Chaboche, P. Lesne, A non-linear continuous fatigue damage model, *Fatigue Fracture Engineering Material Structures*, Vol. 11, pp. 1-17, 1988.
- [24] J. Lemaitre, A course on damage mechanics, First Edition, Berlin: Springer Verlag, 1992.
- [25] H. Hooputra, H. Gese, H. Dell, H. Werner, A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 9, pp. 449-463, 2004.
- [26] Q. Wang, W. F. Gail, R. W. Johnson, Mechanical properties and microstructural investigation of lead free solder, Auburn University, 2005.

 σ_u تنش نهایی ε_T^+ پارامتر آسیب نرم هوپوترا ε_T^- پارامتر آسیب نرم هوپوترا ε_{eq}^{**} کرنش معادل پلاستیک در شروع آسیب η نسبت تنش سه محوره σ_H تنش هیدرواستاتیک σ_{eq} تنش معادل

۵- تقدیر و تشکر

نویسنده از کمک‌ها و حمایت‌های مالی و معنوی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه اصفهان در قالب انجام طرح‌های پژوهشی با شماره طرح ۹۱۰۳۰۳ خالصانه تشکر و قدردانی می‌نماید.

۶- مراجع

- [1] G. I. Taylor, The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress I. Theoretical considerations, *Proceedings of Royal Society of London*, England, Vol. 194, pp. 289-299, 1948.
- [2] G. H. Jonas, J. A. Zukas, Mechanics of penetration: analysis and experiment, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 16, pp. 879-903, 1978.
- [3] T. Belytschko, J. I. Lin, A three-dimensional impact-penetration algorithm with erosion, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 5, pp. 111-127, 1987.
- [4] K. S. Holian, B. L. Holian, Hydrodynamic simulations of hypervelocity impacts, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, pp. 115-132, 1989.
- [5] R. W. Meier, Effect of parametric variations of complex target on damage from projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 10, pp. 375-387, 1990.
- [6] P. C. Chou, J. Hashemi, A. Chou, H. C. Rogers, Experimentation and finite element simulation of adiabatic shear bands in controlled penetration impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, pp. 305-321, 1991.
- [7] W. P. Schonberg, J. A. Peck, Parametric study of multi-wall structural response to hypervelocity impact by non-spherical projectile, *Computers and Structures*, Vol. 49, pp. 719-745, 1993.
- [8] S. T. Jenq, H. S. Jing, C. Chung, Predicting the ballistic limit for plan woven glass-epoxy composite laminate, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 15, pp. 451-464, 1994.
- [9] D. Nandlall, K. Williams, R. Vaziri, Numerical simulation of the ballistic response of grp plates, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1463-1469, 1998.
- [10] 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.
- [11] M. Lee, A numerical comparison of the ballistic performance of unitary rod and segmented-rods against