

## مطالعه تجربی تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه آلومینیومی در برابر بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر

مجتبی ضیاء شمامی<sup>۱</sup>، هاشم بابایی<sup>۲\*</sup>، توحید میرزابابای مستوفی<sup>۳</sup> و حسین خدارحمی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

<sup>۴</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

### چکیده

در این تحقیق، تعدادی آزمایش روی ورق‌های آلومینیومی به منظور مطالعه تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر تا ۵ دفعه انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها روی سامانه آونگ بالستیک بسته شدند. در حالت کلی، نمونه‌های آزمایشی تغییر شکل بزرگ پلاستیکی به صورت گنبدی شکل همراه با نازک شدگی یا پارگی در لبه‌های مرزی به علت یکنواخت بودن بارگذاری از خود نشان دادند. نتایج تجربی نشان داد که خیز مرکزی ورق‌های تک‌لایه و چندلایه با افزایش تعداد انفجار و جرم خرج افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، خیز جلو رونده نمونه؛ یعنی، اختلاف خیز در دو مرحله متوالی انفجار، به علت آنکه نمونه بعد از هر دفعه انفجار کار سختی تحمل می‌کند، به صورت نمایی کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که ممکن است، ساختارهای سه‌لایه هم‌جنس در انفجار اول در ایمپالس پایین، عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دولایه داشته باشد، اما با بالا رفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد. این رفتار برای انفجار در ایمپالس‌های بالا دیده نشد و ساختارهای چندلایه رفتاری متفاوتی دارند.

**کلمات کلیدی:** بارگذاری یکنواخت مکرر؛ ساختار چندلایه، مقاومت انفجاری؛ ورق دایره‌ای.

## Experimental Investigation of Large Plastic Deformation of Single- and Multi-Layered Circular Aluminum Plates under Repeated Uniform Impulsive Loading

M. Ziya-Shamami<sup>1</sup>, H. Babaei<sup>2\*</sup>, T. Mirzababaie Mostofi<sup>3</sup>, H. Khodarahmi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

<sup>4</sup> Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

### Abstract

In this paper, a series of experiments were conducted aluminum plates to investigate the large plastic deformation of single, double, and triple-layered plates under repeated uniform loading up to five times. In order to perform experiments, plates were mounted onto a ballistic pendulum. Generally, the tested plates represented large plastic deformation of dome-like shape along with thinning or tearing occurring at the boundary due to the uniform impulsive loading. The experimental results showed that the maximum permanent deflection of single- and multi-layered plates increases by the increase of mass charge and number of blasts. Furthermore, the progressive deflection was decreased exponentially because the test plate material undergoes work hardening after each blast load. The results also indicated that triple-layered plates made of similar materials may have a better blast performance compared to double-layered at the first low-impulse blast but their resistance decreases as the number of blast increases. However, this trend was not observed for high-impulse blasts and multi-layered plates have a different behavior.

**Keywords:** Repeated Uniform Loading; Multi-Layered Structures; Blast Performance; Circular Plate.

## ۱- مقدمه

بررسی اثر بار انفجاری روی یک سازه به علت ایجاد شوک ناشی از انفجار در کسری از ثانیه از پدیده‌های پیچیده مهندسی است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که تمرکز بیشتر این مطالعات روی بررسی رفتار دینامیکی ساختارها تحت بار انفجاری تک‌مرحله‌ای بوده و تحقیقات بسیار اندکی روی مکرر بودن این نوع بارگذاری انجام شده است.

در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ [۱-۱۵]، تحقیقات تجربی نسبتاً گسترده‌ای توسط محققان در زمینه شکل‌دهی ورق انجام شده است که در آن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاهی آزاد می‌شود و فشار زیادی به هدف موردنظر اعمال می‌شود؛ اما بررسی انفجار مکرر روی یک سازه بسیار محدود و انگشت‌شمار است. در ادامه به نمونه‌هایی از فعالیت‌های محققان در این زمینه پرداخته شده است.

در سال ۲۰۱۴ هنشیه و همکاران [۱۶]، به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر روی ورق فولادی دایروی پرداختند. ورق دایروی مورد مطالعه آن‌ها از جنس فولاد با ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر که توسط دستگاه آونگ بالستیک در معرض ۵ مرتبه بار انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت قرار گرفت. به‌طور کلی، تغییر شکل پلاستیک ورق‌ها به‌صورت نازک شدگی در قسمت‌های گیردار و گاهی هم به‌صورت پارگی بروز پیدا می‌کرد. با افزایش میزان و تعداد بار انفجاری، انحراف بیشتری در میزان جابجایی ورق دیده می‌شد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش تعداد انفجار روی ورق، نرخ افزایش انحراف سطح ورق در نقطه میانی کاهش و سختی ویکرز ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد.

در ادامه در سال ۲۰۱۷ ترانگ و همکاران [۱۷]، به مطالعه تغییر شکل دائمی ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری دفعی مکرر ناشی از ضربه زننده پرداختند. در این تحقیق معادلات فوم بسته دقیق ساده‌ای برای پیش‌بینی تغییر شکل دائمی ناشی از بارگذاری دفعی مکرر از نتایج مطالعه پارامتریک به دست آوردند. نتایج نشان داد که تغییر شکل دائمی ورق در معرض بارگذاری دفعی مکرر افزایش می‌یابد؛ همچنین در تحقیق دیگری نیز به مطالعه جواب تیر فولادی در دمای پایین در معرض بارگذاری جانبی

تک‌مرحله‌ای و مکرر پرداختند. تغییر شکل دائمی در مدل بعد از هر ضربه، به تدریج با افزایش تعداد بارگذاری ضربه‌ای افزایش می‌یابد. با کاهش دما، تغییر شکل دائمی مدل کمی کاهش می‌یابد.

در همین راستا، در سال ۲۰۱۸ ژو و همکاران [۱۸]، به مطالعه پاسخ دینامیکی ورق‌های تقویت شده تحت بارگذاری مکرر پرداختند. در این مقاله برخی از فرمول‌های ساده بر اساس روش کاملاً صلب-پلاستیک برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های مستطیلی تقویت شده تحت بارگذاری مکرر توسط ضربه زننده در هر مکان پیشنهاد شده است. به‌منظور اعتبارسنجی روابط تحلیلی ارائه شده، از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی کمک گرفته شده است. تأثیر خواص مواد شامل، نرخ کرنش، کرنش سختی، مدول الاستیک روی دقت پیش‌بینی‌های نظری، با مقایسه با شبیه‌سازی‌های عددی، ارزیابی شد که نشان می‌دهد، هنگامی که اثر خواص مواد در تجزیه و تحلیل رفتار پلاستیک صلب در نظر گرفته می‌شود، راه‌حل‌های نظری می‌تواند پیش‌بینی خوبی از رفتار دینامیکی ساختار در معرض بارگذاری مکرر ارائه دهد.

همچنین در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۸ ژو و همکاران [۱۹]، به مطالعه تجربی رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در مقابل بارگذاری ضربه‌ای یک مرحله‌ای و مکرر در دما پایین پرداختند. در این تحقیق نیروی ضربه و تغییر شکل و همچنین جذب انرژی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در دمای اتاق و دمای پایین با استفاده از ضربه زننده در محفظه آزمایشگاهی ترموستاتیکی به دست آوردند. تأثیر انرژی ضربه و مکرر بودن بارگذاری در بررسی رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در دمای اتاق (۲۰ درجه سانتی‌گراد) و دمای پایین (۶۰- درجه سانتی‌گراد) در بیشتر آزمایش‌ها بررسی شده است. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش انرژی ضربه، اثرات بارگذاری دینامیکی در درجه حرارت کم به تدریج افزایش می‌یابد. تغییر شکل سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در دمای پایین در مقایسه با دمای اتاق کمتر است.

در سال ۲۰۱۸ جوو و همکاران [۲۰]، به مطالعه تجربی تغییر شکل و آسیب پوسته استوانه فولادی تحت بارگذاری

آزمایشگاهی روی ساختارهای دایره‌ای آلومینیومی به منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند، میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری و بررسی اثرگذاری آن‌ها روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی، بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای آلومینیومی تک‌لایه تحت بار دفعی یکنواخت منفرد و مکرر و مقایسه عملکرد آن‌ها با ساختارهای چندلایه است.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

آنچه در مطالعات تجربی فرآیند شکل‌دهی تحت بار دفعی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارها و همچنین مقاومت انفجاری آن‌ها تحت آزمایش نسبت به بار دفعی اعمالی است؛ لذا در این تحقیق، هدف از مطالعات آزمایشگاهی آن است تا بتوان رفتار دینامیکی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر را مورد بررسی قرار داد که تاکنون در پیشینه تحقیق در این زمینه مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

شکل‌دهی آزاد یا بدون قالب ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر در یک سامانه آزمایشی آونگ بالستیک انجام گرفته است که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- سامانه آونگ بالستیک آزمایشگاه ضربه و انفجار

سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به صورت افقی و تراز آویزان است. یک سمت پاندول قلم و کاغذ جهت ثبت حرکت پاندول نصب شده که دامنه حرکت رفت و برگشت پاندول توسط قلم، روی کاغذی ثبت می‌شود که در سطح زمین قرار داده

انفجاری دومرحله‌ای پرداختند. پوسته‌های فلزی استوانه‌ای با ضخامت دیواره‌های مختلف در معرض دو بار بارگذاری انفجاری، با فاصله بارگذاری متفاوت نسبت به سازه قرار گرفتند. برای مقایسه، آزمایش‌های تک انفجاری نیز تحت شرایط مشابه با آزمایش‌های تحت دو انفجار انجام شدند. در این تحقیق، توزیع انرژی حالت‌های شکست مختلف مورد بحث قرار گرفته است. تأثیر دومرحله‌ای بار انفجاری، فاصله خرج تا سازه و ضخامت دیواره پوسته استوانه‌ای بر تغییر شکل و آسیب پوسته‌های استوانه‌ای فلزی، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای در معرض یک بارگذاری انفجاری قرار گرفته‌اند، انرژی بیشتری را با توجه به نظریه جذب انرژی نشان می‌دهد. آزمایش‌های سختی ویکرز نشان می‌دهد که در منطقه لولای پلاستیکی و منطقه مرکزی با افزایش تعداد بارگذاری انفجاری سختی نیز افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۸، گائو و همکاران [۲۱]، به مطالعه تجربی رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت تأثیر بارگذاری مکرر پرداختند. ساختارهای مهندسی بکار گرفته شده در دریا و وسایل نقلیه اغلب در معرض بارگذاری‌های مکرر قرار می‌گیرند. آسیب به وجود آمده حاصل از تغییر شکل ناشی از انفجار مکرر را نمی‌توان نادیده گرفت. در این تحقیق، رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت بارگذاری مکرر توسط دستگاه سقوط وزنه مورد بررسی قرار گرفته است. اثر نفوذ در ورق جلویی و عقبی مقایسه شده است. در همین حال، روابط بین تغییر شکل ورق‌های رویی با تعداد بارگذاری و همچنین روند فرآیند بارگذاری و باربرداری در طول بارگذاری مکرر، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تغییر شکل دائمی ورق جلویی و عقبی به تدریج افزایش می‌یابد، در حالی که این روند، زمانی کاهش می‌یابد که ترک در ورق جلویی رخ دهد.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه شکل‌دهی سازه‌ها تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر مربوط به ساختارهای تک‌لایه فولادی یا کامپوزیتی بوده [۱۶-۲۱] و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی با توزیع یکنواخت انجام نشده است؛ لذا انجام مطالعات

و با ۷ عدد پیچ M8 به ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌های انفجاری، توسط کولیس ارتفاع سنج اندازه‌گیری شده است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس آلیاژ آلومینیوم (Al-1050) در ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد  $250 \times 250$  میلی‌متر مربع برش زده شدند. نمونه‌های آزمایشی دارای سطح شکل‌گیری یا مواجهه دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر هستند. با توجه به توضیحات ارائه شده و مطابق با جدول ۱، ۶۷ ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه آلومینیومی در سه گروه‌بندی D، S

شده است. سمت دیگر پاندول یک صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر متصل است. روی این صفحه چهار میله فولادی به قطر ۱۵ میلی‌متر نصب شده که به صورت نر و ماده به گیره ورق متصل می‌شود. گیره ورق از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل شده است. وسط هر دو صفحه برحسب نوع تغییر شکل ورق منفذی جهت اعمال بار و خروج صفحه تعبیه شده است؛ همچنین در صفحه جلویی گیره ورق رزوه‌هایی جهت نصب لوله‌های استقرار خرج در نظر گرفته شده است. در برخی از موارد با بکار بردن لوله‌های بلند استقرار خرج، پاندول از حالت تعادل خارج می‌شود. برای رفع این مسئله در سمت دیگر آن از وزنه‌هایی جهت برقراری تعادل استفاده می‌شود.

جدول ۱- گروه‌های آزمایشی

جرم خرج (g)	گروه آزمایشی	شماتیک ساختار
۳ و ۲،۱/۵	S2	
۷/۵ و ۵	S3	
۱۰، ۷/۵، ۵ و ۱۲/۵	D22	
۱۰، ۷/۵، ۵ و ۱۲/۵	T222	

در تحقیق حاضر از دو لوله به قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۲۰ میلی‌متر و طول‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه و همچنین یکنواخت کردن توزیع بار است. طول‌های مختلف برای لوله این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر فاصله خرج روی میزان تغییر شکل پلاستیک سازه را بررسی کرد. شایان توجه است که با توجه به پیشینه [۳-۵]، در صورتی که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از شعاع باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد.

سامانه آزمایشی آونگ بالستیک شامل چهار بخش است: (۱) واحد اعمال بار انفجاری جایگذاری خرج، (۲) سیستم تحریک خرج انفجار با قابلیت کنترل از راه دور، (۳) واحد اندازه‌گیری دامنه نوسان و (۴) واحد شکل‌دهی و نگه‌دارنده‌ها. در بخش اعمال بار، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده می‌شود. در تحقیق حاضر ماده منفجره بکار گرفته شده برای انجام آزمایش‌های تجربی C4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری شکل بودن آن با دست به صورت دیسکی به قطر ۳۵ میلی‌متر درآورده شده و روی صفحه پلی‌استری پهن شده است. در بخش دوم، برای تحریک ماده منفجره از چاشنی نمره ۸ نائل و به همراه دستگاه تحریک نائل استفاده می‌شود. در واحد شکل‌دهی، ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای بین دو صفحه فولادی ضخیم با ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده شده

B بیانگر شماره بارگذاری از تعداد کل دفعات بارگذاری و حرف H، بیانگر فاصله خرج انفجاری تا ورق یا همان فاصله

جدول ۲- نتایج تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۲ میلی‌متری

W <sub>0</sub> /H	(mm) W <sub>0</sub>	(g) m	B	R	کد آزمایش
۳/۳	۶/۶	۱/۵	۱	۵	S2R5M1.5B1H300
۴/۱	۸/۱	۱/۵	۲		S2R5M1.5B2H300
۴/۶	۹/۲	۱/۵	۳		S2R5M1.5B3H300
۵/۰	۹/۹	۱/۵	۴		S2R5M1.5B4H300
۵/۳	۱۰/۵	۱/۵	۵		S2R5M1.5B5H300
۴/۰	۸/۰	۲	۱	۵	S2R5M2B1H300
۴/۹	۹/۷	۲	۲		S2R5M2B2H300
۵/۶	۱۱/۲	۲	۳		S2R5M2B3H300
۶/۳	۱۲/۵	۲	۴		S2R5M2B4H300
-	پارگی	۲	۵		S2R5M2B5H300
۵/۸	۱۱/۵	۳	۱	۲	S2R2M3B1H300
-	پارگی	۳	۲		S2R2M3B2H300

جدول ۳- نتایج تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۳ میلی‌متری

W <sub>0</sub> /H	(mm) W <sub>0</sub>	(g) m	B	R	کد آزمایش
۳/۰	۹/۰	۵	۱	۵	S3R5M5B1H300
۳/۵	۱۰/۴	۵	۲		S3R5M5B2H300
۳/۸	۱۱/۷	۵	۳		S3R5M5B3H300
۴/۲	۱۲/۵	۵	۴		S3R5M5B4H300
۴/۴	۱۳/۲	۵	۵		S3R5M5B5H300
۴/۱	۱۲/۳	۷/۵	۱	۳	S3R3M7.5B1H300
۵/۰	۱۵/۰	۷/۵	۲		S3R3M7.5B2H300
-	پارگی	۷/۵	۳		S3R3M7.5B3H300

T به منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر و مقایسه نتایج طراحی و ساخته شده‌اند.

هر گروه آزمایشی تحت چندین بارگذاری با جرم خرج‌های ۱/۵، ۲، ۳، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم مورد بررسی قرار گرفته است. شایان توجه است که در تحلیل نتایج بخش تجربی جرم یک گرمی نائل لحاظ نشده و نتایج تنها بر اساس میزان خرج انفجاری مصرفی روی نمونه آنالیز شده‌اند؛ همچنین، در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته بر میزان اثر بارگذاری دفعی مکرر روی مقاومت انفجاری ساختارها است.

### ۳- نتایج کار تجربی

در جدول ۲ تا ۵، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی یکنواخت مکرر تا ۵ دفعه ارائه شده است. در این جدول مقادیر جرم خرج انفجاری، تعداد کل دفعات بارگذاری، شماره هر انفجار، بیشترین خیز دائمی نمونه و همچنین نسبت بی‌بعد خیز دائمی به ضخامت نمونه ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تحت دفعی یکنواخت مکرر است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق آلومینیومی در ساختارهای تک‌لایه، تعداد لایه‌ها در اهداف چندلایه و تعداد بارگذاری بررسی شده است؛ همچنین، تغییرات شدت نیروی واردشده به نمونه یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل نیز با تغییر جرم خرج انفجاری مورد مطالعه قرار است. شایان توجه است که یکی دیگر از اهداف انجام این سری از آزمایش‌ها، بررسی اثر فاصله خرج از نمونه آزمایشی در چندین دفعه بارگذاری دفعی با توزیع یکنواخت بوده است. لازم به توضیح است که در جداول ۵ و ۶، مقادیر بیشترین خیز برای لایه عقبی ارائه شده است.

در جداول ارائه شده، در ستون کد آزمایش حرف S بیانگر ساختار تک‌لایه، حرف D بیانگر ساختار دولایه، حرف T، نشان‌دهنده سه‌لایه بودن ساختار و اعداد بعد از آن به ترتیب ضخامت هر لایه است؛ همچنین حرف R بیانگر تعداد کل دفعات بارگذاری، حرف M بیانگر میزان جرم خرج، حرف

جدول ۵- نتایج تجربی برای ساختارهای سه‌لایه

W <sub>0</sub> /H	(mm) W <sub>0</sub>	(g) m	B	R	کد آزمایش
۱/۵	۹/۰	۵	۱	۵	T222R5M5B1H200
۱/۸	۱۰/۸	۵	۲		T222R5M5B2H200
۲/۰	۱۱/۹	۵	۳		T222R5M5B3H200
۲/۲	۱۲/۹	۵	۴		T222R5M5B4H200
۲/۳	۱۳/۶	۵	۵		T222R5M5B5H200
۲/۰	۱۱/۷	۷/۵	۱	۵	T222R5M7.5B1H200
۲/۵	۱۴/۹	۷/۵	۲		T222R5M7.5B2H200
۲/۸	۱۶/۶	۷/۵	۳		T222R5M7.5B3H200
۳/۰	۱۷/۸	۷/۵	۴		T222R5M7.5B4H200
-	پارگی	۷/۵	۵		T222R5M7.5B5H200
۲/۴	۱۴/۴	۱۰	۱	۴	T222R4M10B1H200
۳/۱	۱۸/۸	۱۰	۲		T222R4M10B2H200
۳/۴	۲۰/۶	۱۰	۳		T222R4M10B3H200
-	پارگی	۱۰	۴		T222R4M10B4H200
۳/۰	۱۸/۰	۱۲/۵	۱	۲	T222R2M12.5B1H200
-	پارگی	۱۲/۵	۲		T222R2M12.5B2H200

جدول ۴- نتایج تجربی برای ساختارهای دولایه

W <sub>0</sub> /H	(mm) W <sub>0</sub>	(g) m	B	R	کد آزمایش
۱/۴	۸/۲	۵	۱	۵	D33R5M5B1H200
۱/۶	۹/۸	۵	۲		D33R5M5B2H200
۱/۸	۱۱	۵	۳		D33R5M5B3H200
۱/۹	۱۱/۳	۵	۴		D33R5M5B4H200
۲/۰	۱۱/۸	۵	۵		D33R5M5B5H200
۱/۸	۱۱/۰	۷/۵	۱	۵	D33R5M7.5B1H200
۲/۳	۱۳/۹	۷/۵	۲		D33R5M7.5B2H200
۲/۷	۱۵/۹	۷/۵	۳		D33R5M7.5B3H200
۲/۹	۱۷/۱	۷/۵	۴		D33R5M7.5B4H200
۳/۰	۱۸/۲	۷/۵	۵		D33R5M7.5B5H200
۲/۳	۱۳/۸	۱۰	۱	۵	D33R5M10B1H200
۲/۹	۱۸/۱	۱۰	۲		D33R5M10B2H200
۳/۲	۱۹/۹	۱۰	۳		D33R5M10B3H200
۳/۶	۲۱/۵	۱۰	۴		D33R5M10B4H200
-	پارگی	۱۰	۵		D33R5M10B5H200
۲/۸	۱۷/۰	۱۲/۵	۱	۳	D33R5M12.5B1H200
۳/۷	۲۲/۳	۱۲/۵	۲		D33R5M12.5B2H200
-	پارگی	۱۲/۵	۳		D33R5M12.5B3H200

می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند، افزایش جرم خرج انفجاری، افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، نوع لایه‌بندی و افزایش تعداد لایه‌ها و تعداد بارگذاری انفجاری بر بیشترین خیز دائمی ساختار تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- گستره تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی

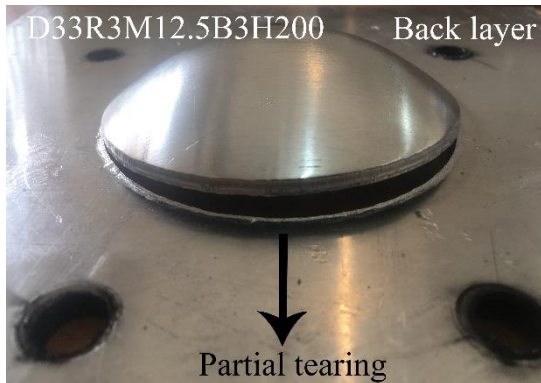
مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی یکنواخت مکرر نشان می‌دهد که در طول ۶۷ آزمایش، تمامی ساختارها به‌غیر از ۱۱ نمونه، سطوح مختلفی از تغییر

استقرار خرج است. در ادامه، تأثیر عوامل مختلف از جمله میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴- تحلیل نتایج

در این قسمت از تحقیق، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته

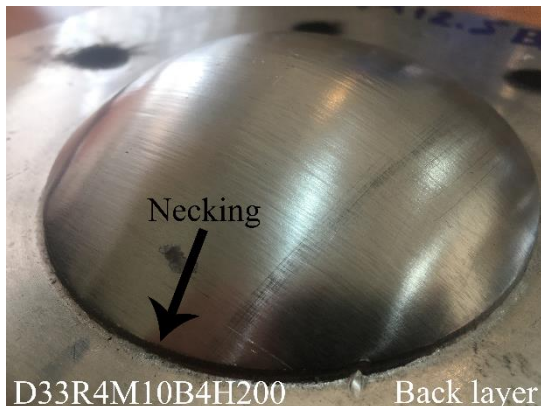
جنبشی منتقل شده بر سطح لایه عقبی، موجب تغییر شکل دائمی آن می‌شود. به‌طور کلی شکل‌های ۲ تا ۴ نشان می‌دهند: (۱) ناحیه دومی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای گیردار حرکت می‌کنند (۲) سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار



D33R3M12.5B3H200 ساختار عقبی (الف)



D33R3M12.5B3H200 ساختار جلویی (ب)

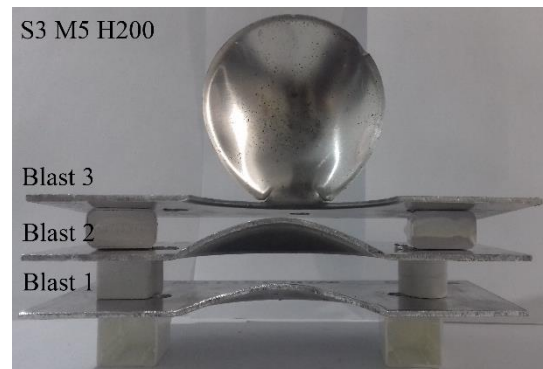


D33R4M10B4H200 ساختار عقبی (ج)

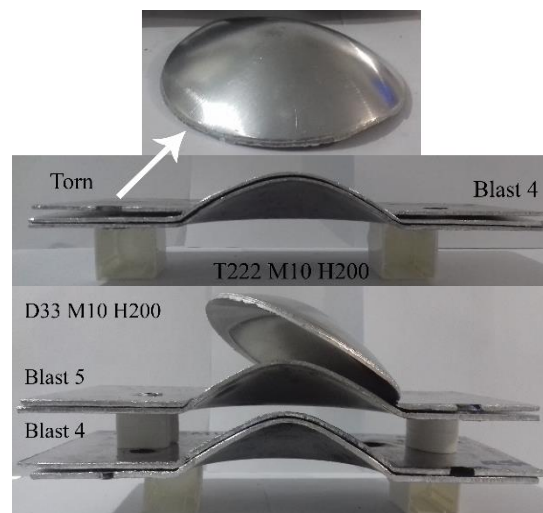
شکل ۴- نمونه‌ای از ساختارهای پاره شده

شکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به‌صورت دومی شکل یا محدب (مد اول تغییر شکل [۲۲]) بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولید شده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود. شایان ذکر است که تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ لایه جلویی، انرژی قابل توجهی از انفجار ماده منفجره را جذب می‌کند و انرژی

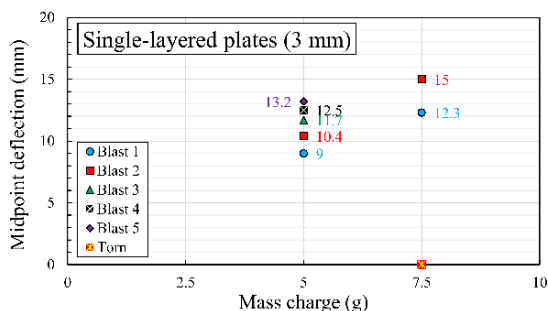


شکل ۲- نمونه‌ای از ساختارهای تک‌لایه آلومینیومی تغییر شکل یافته



شکل ۳- نمونه‌ای از ساختارهای چندلایه آلومینیومی تغییر شکل یافته





شکل ۶- تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق تک‌لایه ۳ میلی‌متری برحسب جرم خرج

در حالت کلی، در شکل ۵ و ۶، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی با بالا رفتن میزان خرج انفجاری و به تبع آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد؛ به طوری که مطابق با نمودارها، جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به صورت تک‌مرحله‌ای دارند.

علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های تک‌لایه با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۲۱٪ و ۷۴٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۲ گرم و ۳ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای جرم خرج‌های ۲ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم در انفجار دوم، سوم و چهارم به ترتیب منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۱۹٪، ۲۱٪ و ۲۶٪ می‌شود و ورق قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای جرم خرج‌های بیشتر از ۳ گرم را ندارد.

علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های تک‌لایه با ضخامت ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش یک میلی‌متری ضخامت ورق، منجر به تحمل بار انفجاری مکرر در محدوده بزرگ‌تری می‌شود و آستانه تحمل ورق تا جرم خرج ۷/۵ گرم بالا می‌رود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۶٪ در جرم خرج ۷/۵ گرم می‌شود؛ هرچند ورق قابلیت تحمل بار انفجاری حاصل از انفجار جرم خرج ۱۰ گرمی را ندارد؛ همچنین این مقدار برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم منجر به افزایش خیز ورق به

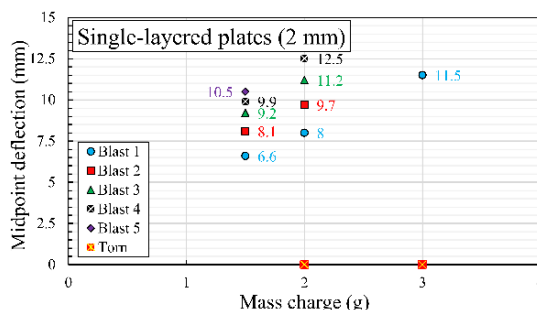
دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند (۳ نازک شدگی در طول مرزهای گیردار، نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است).

علاوه بر موارد بالا، برای مواردی که در آن نمونه آزمایشی در معرض بار انفجاری مکرر قرار دارد یا شدت نیروی انفجاری افزایش یافته است، نازک شدگی و همچنین پاره شدن در لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مد از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام شده توسط تیلینگ‌اسمیت و نوریک [۲۲] است. پارگی در مرزها هنگامی که ورق تحت بار انفجاری مکرر قرار دارد، مشابه با حالت گسیختگی برشی است. شایان توجه است که گسیختگی برشی مشاهده شده در این سری از آزمایش‌ها از نظر ماهیت کاملاً متفاوت با حالت گسیختگی برشی (مد تغییر شکل سوم) است که قبلاً توسط تیلینگ‌اسمیت و نوریک [۲۲] تعریف شده است. این به دلیل آن است که نمونه پاره شده با کاهش تدریجی جابجایی در منطقه مرکزی همراه بوده است؛ همچنین در این آزمایش‌ها، مد تغییر شکل برش کششی مشاهده نشد که به طور معمول ایمپالس‌های پایین در بارگذاری انفجاری منفرد رخ می‌دهد [۲۳-۲۷].

#### ۲-۴- رابطه بین خیز دائمی و جرم خرج

##### ۱-۲-۴- ساختار تک‌لایه

اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارها به تحلیل نتایج تجربی کمی به دست آمده پرداخته می‌شود. به همین منظور در شکل ۵ و ۶، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری، نمایش داده شده است.



شکل ۵- تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق تک‌لایه ۲ میلی‌متری برحسب جرم خرج



خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به صورت تک‌مرحله‌ای دارند.

علاوه بر این، در شکل ۷، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۴/۱٪، ۶۸/۳٪ و ۱۰۷/۳٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم به ترتیب برابر با ۴۱/۸٪، ۸۴/۷٪ و ۱۲۷/۶٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم؛ در انفجار سوم برابر با ۴۴/۵٪ و ۸۰/۹٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار چهارم برابر با ۵۱/۳٪ و ۹۰/۳٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار پنجم برابر با ۵۴/۲٪ در جرم خرج‌های ۷/۵ گرم می‌شود.

در شکل ۸، مقایسه نتایج به دست آمده برای ورق‌های سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۳۰/۰٪، ۶۰/۰٪ و ۱۰۰/۰٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم به ترتیب برابر با ۳۷/۹٪ و ۷۴/۱٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار سوم برابر با ۳۹/۵٪ و ۷۳/۱٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار چهارم برابر با ۳۸/۰٪ در جرم خرج‌های ۷/۵ گرم می‌شود و ساختار در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دولایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.

#### ۳-۴- اثر بارگذاری مکرر روی خیز دائمی

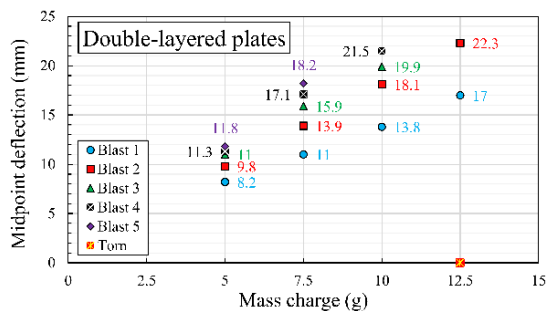
##### ۱-۳-۴- ساختار تک‌لایه

مطابق شکل ۵ و ۹، مقایسه نتایج تجربی برای ورق تک‌لایه ۲ میلی‌متری هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱/۵ گرم است، نشان می‌دهد که این ساختار ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۷٪، ۳۹/۳٪، ۵۰/۰٪ و ۵۹/۱٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۷٪، ۱۳/۶٪، ۱۷/۶٪ و ۶/۱٪ نسبت

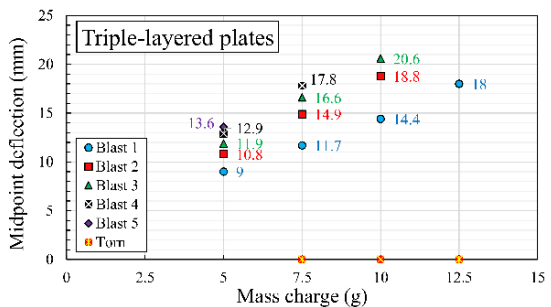
میزان ۴۴/۲٪ در جرم خرج ۷/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می‌شود و ورق قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای جرم خرج‌های بیشتر از ۷/۵ گرم را ندارد.

##### ۲-۲-۴- ساختار چندلایه

اکنون، پس از بررسی و تحلیل کمی نتایج تجربی برای ساختارهای تک‌لایه، به تحلیل نتایج برای ساختارهای چندلایه پرداخته می‌شود. به همین منظور در شکل ۷ و ۸، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های دولایه و سه‌لایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری، نمایش داده شده است.

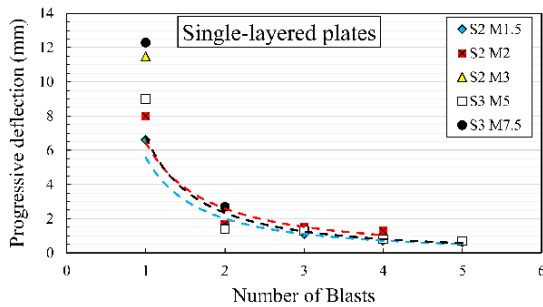


شکل ۷- تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر برحسب جرم خرج



شکل ۸- تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر برحسب جرم خرج

در حالت کلی، در شکل ۷ و ۸، مشابه با ورق‌های تک‌لایه، بیشترین خیز دائمی ورق‌های چندلایه آلومینیومی نیز با بالا رفتن میزان جرم انفجاری و به تبع آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد؛ به طوری که مطابق با نمودارها، جرم خرج انفجاری و بیشترین



شکل ۹- تغییرات خیز دائمی جلو رونده (افزایشی) برای ورق تک‌لایه برحسب تعداد دفعات انفجار

میلی‌متر ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۱۹/۵٪، ۳۴/۱٪، ۳۷/۸٪ و ۴۳/۹٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۱۹/۵٪، ۱۲/۲٪، ۲/۷٪ و ۴/۴٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهش را حفظ می‌کند؛ همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر همچنان ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۶/۳٪، ۴۴/۵٪، ۵۵/۵٪ و ۶۵/۴٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۶/۳٪، ۱۴/۴٪، ۷/۵٪ و ۶/۴٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهش را حفظ می‌کند؛ همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۰ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر تنها ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪، ۴۴/۲٪ و ۵۵/۸٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪، ۹/۹٪ و ۸/۰٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهش را حفظ می‌کند. در نهایت نتایج شکل‌های ۷ و ۱۰ نشان می‌دهند که برای ساختار دولایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار تنها ۱ دفعه بارگذاری

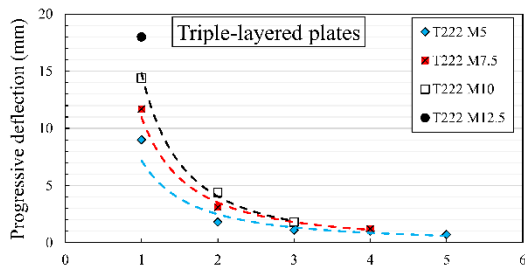
به دفعه قبلی شده و تقریباً یک روند نمایی کاهش را طی می‌کند. دلیل روند نمایی کاهش خیز را می‌توان ناشی از کار سختی ماده ورق بعد از هر بار بارگذاری مکرر دانست. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر بار بارگذاری انفجاری در ورق افزایش می‌یابد و انباشته می‌شود و سبب کاهش روند افزایشی تغییر جابجایی نقطه میانی ورق می‌شود؛ همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۲ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۲ میلی‌متری ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۱/۳٪، ۴۰/۱٪ و ۵۶/۳٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۱/۳٪، ۱۵/۴٪ و ۱۱/۶٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهش را حفظ می‌کند.

مطابق شکل ۶ و ۹، مقایسه نتایج برای ورق تک‌لایه ۳ میلی‌متری هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق ۳ میلی‌متری ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۱۵/۶٪، ۳۰/۱٪، ۳۸/۹٪ و ۴۶/۷٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۱۵/۶٪، ۱۲/۵٪، ۶/۸٪ و ۵/۶٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهش را حفظ می‌کند؛ همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۰٪ در دفعه دوم می‌شود.

#### ۴-۳-۲- ساختار چندلایه

مطابق شکل ۷ و ۱۰، نتایج بیان‌گر آن است که ساختار دولایه با ضخامت ۶ (۳+۳) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دولایه با ضخامت ۳+۳

۷/۲٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند؛ همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۰ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر برخلاف ساختارهای دولایه تنها ۲ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۰/۶٪ و ۴۳/۱٪ به ترتیب در دفعات دوم و سوم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۰/۶٪ و ۹/۶٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. در نهایت نتایج شکل‌های ۸ و ۱۱ نشان می‌دهند که برای ساختار سه‌لایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار بارگذاری مکرر را تحمل نمی‌کند و مقاومت انفجاری ضعیف‌تری در مقایسه با ساختار دولایه در برابر بار انفجاری مکرر دارد.

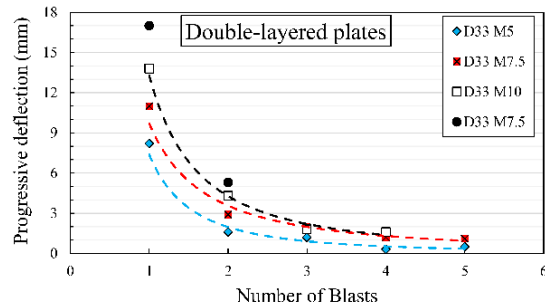


شکل ۱۱- تغییرات خیز دائمی جلو رونده (افزایشی) برای ورق سه‌لایه برحسب تعداد دفعات انفجار

#### ۴-۴- رابطه بین خیز دائمی و فاصله استقرار خرج

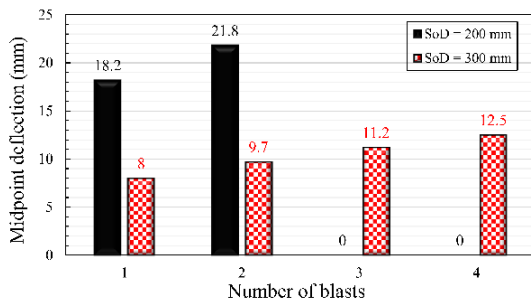
اکنون، پس از تحلیل کمی نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی مکرر و بررسی اثر بار مکرر روی بیشترین خیز ساختار، به تجزیه و تحلیل اثر فاصله استقرار خرج از سطح نمونه روی خیز دائمی با انجام آزمایش روی ساختارهای تک‌لایه و چند لایه آلومینیومی پرداخته می‌شود. بدین منظور، مطابق با جدول ۶، سیزده آزمایش جدید روی ورق تک‌لایه ۳ میلی‌متری، ساختار دولایه ۶ (۳+۳) میلی‌متری و ساختار سه‌لایه ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج ۵ گرمی به ترتیب در فاصله ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متری از سطح ورق انجام شد.

مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪ در دفعه دوم می‌شود.

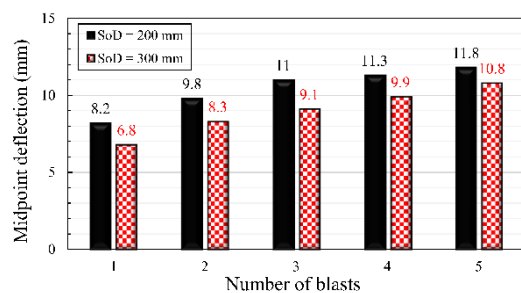


شکل ۱۰- تغییرات خیز دائمی جلو رونده (افزایشی) برای ورق دولایه برحسب تعداد دفعات انفجار

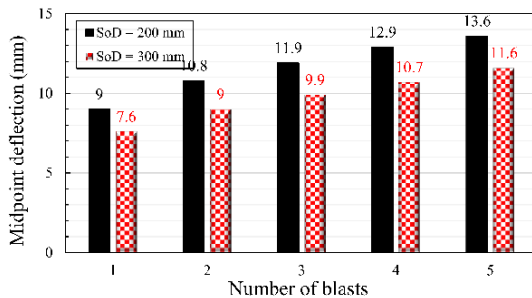
مطابق شکل ۸ و ۱۱، این نتیجه حاصل می‌شود که ساختار سه‌لایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه سوم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد که نشان می‌دهد، در مقایسه با ساختارهای دولایه یک دفعه بارگذاری انفجاری کمتری تحمل می‌کند و افزایش تعداد لایه‌ها از این دیدگاه مؤثر نیست. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای ساختار سه‌لایه، هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ساختار سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۰/۰٪، ۳۲/۲٪، ۴۳/۳٪ و ۵۱/۱٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۰/۰٪، ۱۰/۲٪، ۸/۴٪ و ۵/۴٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند؛ همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر برخلاف ساختارهای دولایه تنها ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۷/۴٪، ۴۱/۹٪ و ۵۲/۱٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۷/۴٪، ۱۱/۴٪ و



شکل ۱۲- نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای تک‌لایه برحسب تعداد انفجار



شکل ۱۳- نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه برحسب تعداد انفجار



شکل ۱۴- نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای سه‌لایه برحسب تعداد انفجار

ترتیب در انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. این مقادیر برای ساختارهای سه‌لایه، برابر است با ۰/۱۵/۶، ۰/۱۶/۷، ۰/۱۶/۸، ۰/۱۷/۱ و ۰/۱۴/۷.

#### ۴-۵- اثر افزایش تعداد لایه روی خیز دائمی در بارگذاری منفرد و مکرر

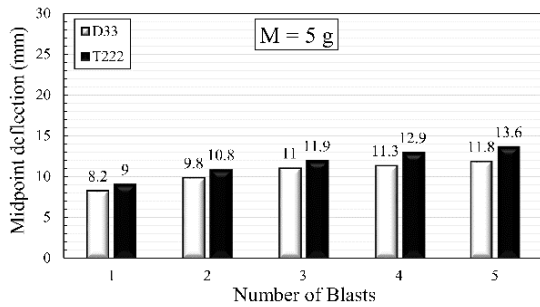
اکنون، پس از بررسی اثر فاصله استقرار خرج روی بیشترین خیز ساختار ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت

به‌منظور درک و توضیح بهتر میزان اثر فاصله استقرار بر بیشترین خیز دائمی، در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه آلومینیومی برحسب تعداد انفجار برای فاصله استقرارهای مختلف نمایش داده شده است.

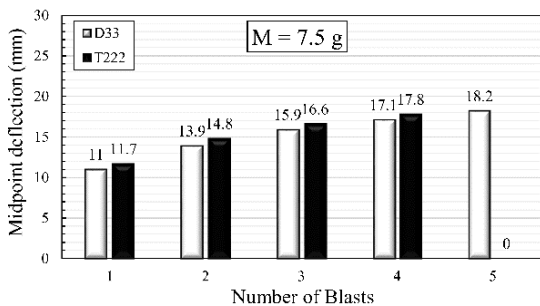
نتایج به‌دست‌آمده برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرارهای مختلف نشان می‌دهد که افزایش ۱۰۰ میلی‌متری فاصله خرج از سطح ورق، منجر به کاهش خیز دائمی ورق ۳ میلی‌متری به میزان ۰/۵۶٪ و ۰/۵۵/۵٪ به ترتیب در انفجارهای اول و دوم می‌شود؛ همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش ۵۰٪ درصدی فاصله استقرار موجب می‌شود تا نمونه بتواند بار مکرر را تا تعداد بیشتری تحمل کند؛ همچنین نتایج برای ساختارهای دولایه نشان می‌دهد که افزایش ۱۰۰ میلی‌متری فاصله خرج، منجر به کاهش خیز دائمی ساختار دولایه به میزان ۰/۱۷/۱، ۰/۱۵/۳، ۰/۱۷/۳، ۰/۱۲/۴ و ۰/۸/۵ به

#### جدول ۶- نتایج تجربی برای ساختارهای تک و چندلایه

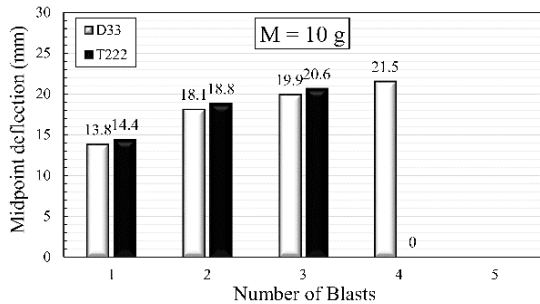
کد آزمایش	$R$	$B$	$m$ (g)	$W_0$ (mm)
S3R3M5B1H200	۳	۱	۵	۱۸/۲
S3R3M5B2H200		۲	۵	۲۱/۸
S3R3M5B3H200		۳	۵	پارگی
D33R5M5B1H300	۵	۱	۱۰	۶/۸
D33R5M5B2H300		۲	۱۰	۸/۳
D33R5M5B3H300		۳	۱۰	۹/۱
D33R5M5B4H300		۴	۱۰	۹/۹
D33R5M5B5H300		۵	۱۰	۱۰/۸
T222R5M5B1H300	۵	۱	۱۰	۷/۶
T222R5M5B2H300		۲	۱۰	۹/۰
T222R5M5B3H300		۳	۱۰	۹/۹
T222R5M5B4H300		۴	۱۰	۱۰/۷
T222R5M5B5H300		۵	۱۰	۱۱/۶



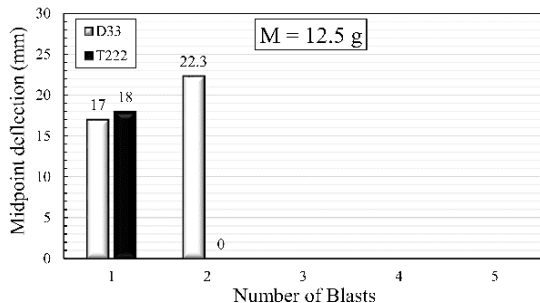
شکل ۱۵- نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار برای خرج ۵ گرم



شکل ۱۶- نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار برای خرج ۷/۵ گرم



شکل ۱۷- نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار برای خرج ۱۰ گرم



شکل ۱۸- نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار برای خرج ۱۲/۵ گرم

بار دفعی منفرد و مکرر، به تجزیه و تحلیل افزایش تعداد لایه در ساختارهای چندلایه روی خیز دائمی پرداخته می‌شود. بدین منظور در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار به ترتیب در جرم خرج‌های ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم رسم شده است. مطابق با شکل ۱۵، برای جرم خرج ۵ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان ۹/۸٪، ۱۰/۲٪، ۱۱/۲٪، ۱۴/۲٪ و ۱۵/۳٪ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌گردد و این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است، ساختارهای سه‌لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دولایه داشته باشد، اما با بالا رفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد و این پدیده به این علت است که با افزایش تعداد لایه در ساختارهای هم‌جنس، ضخامت هر لایه کاهش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش مقاومت خمشی سازه در برابر بار انفجاری می‌شود [۱۴]. شایان توجه است که خواص مکانیکی ورق مانند چگالی و همچنین تنش تسلیم روی این موضوع نیز اثر بسزایی دارد که در این مقاله با توجه به یکسان بودن لایه‌ها قابل بررسی نیست. برای اطلاعات بیشتر روی این مطلب، می‌توان به مرجع [۱۴] مراجعه کرد که توسط نویسندگان همین اثر به چاپ رسیده است.

مطابق با شکل ۱۶ و ۱۷، برای جرم خرج ۷/۵ و ۱۰ گرم، افزایش تعداد لایه همچنان منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار می‌شود؛ اما، رفتاری کاملاً متفاوت از خود نشان می‌دهد، هنگامی که ورق تحت انفجار خرج ۵ گرمی قرار دارد. برای بررسی این پدیده، مشابه با قسمت‌های قبلی، نتایج به‌طور دقیق‌تری تحلیل می‌شود. برای جرم خرج ۷/۵ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان ۶/۵٪، ۶/۴٪، ۱۱/۲٪، ۴/۴٪ و ۴/۱٪ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم و چهارم می‌شود؛ همچنین برای جرم خرج ۱۰ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان ۹/۸٪، ۴/۳٪، ۳/۹٪ و ۳/۵٪ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم و سوم می‌شود. این بدان معناست که با افزایش جرم خرج به تبع آن افزایش ایمپالس انفجار، ساختارهای چندلایه با تعداد لایه بیشتر،

مقاومت انفجاری بهتری از خود نشان می‌دهند و دیگر یک رابطه صعودی بین اختلاف بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه و تعداد انفجار برقرار نیست.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه آلومینیومی در برابر بارگذاری انفجاری مکرر پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که خیز دائمی ورق در نقطه میانی با افزایش تعداد بارگذاری انفجاری، افزایش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین مقدار در اولین بارگذاری و انفجار رخ می‌دهد و به تدریج از روند افزایشی آن کاهش می‌یابد و یک روند نمایی نزولی را طی می‌کند. دلیل این پدیده را می‌توان ناشی از کار سختی حاصل از هر دفعه بارگذاری مکرر دانست. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر دفعه بارگذاری انفجاری در ورق افزایش یافته و انباشته می‌شود و سبب کاهش روند افزایشی تغییر جابجایی نقطه میانی ورق می‌شود. سایر نتایج تجربی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱) ساختار سه‌لایه در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دولایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.

۲) ساختار دولایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۳+۳) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد؛ همچنین برای ساختار دولایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار تنها ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪ در دفعه دوم می‌شود.

۳) نتایج تجربی برای جرم خرج ۵ گرم نشان داد که افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز می‌شود.

۴) این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است، ساختارهای سه‌لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای

دولایه داشته باشد، اما با بالا رفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد.

## ۶- مراجع

- [1] Li Q, Jones N (2000) On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members. Arch Appl Mech 70(4): 245-254.
- [2] 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.
- [3] Jones N (2010) Inelastic response of structures due to large impact and blast loadings. J Strain Anal Eng Des 45(6): 451-464.
- [4] 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.
- [5] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng 231(3):490-496.
- [6] Micallef K, Fallah AS, Pope DJ, Louca LA (2013) Dynamic performance of simply supported rigid plastic circular thick steel plates subjected to localized blast loading. J Eng Mech 140(1): 159-171.
- [7] Jones N (2014) Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. Int J Impact Eng 74: 3-15.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. Int J Impact Eng 125: 93-106.
- [11] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2020) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a

- [20] Zhou Y, Ji C, Long Y, Yu Y, Li Y, Wang T (2018) Experimental studies on the deformation and damage of steel cylindrical shells subjected to double-explosion loadings. *Thin-Walled Struct* 127:469-82.
- [21] Guo K, Zhu L, Li Y, Yu TX, Sheno A, Zhou Q (2018) Experimental investigation on the dynamic behaviour of aluminum foam sandwich plate under repeated impacts. *Compos Struct* 15(200): 298-305.
- [22] Teeling-Smith RG, Nurick GN (1991) The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *Int J Impact Eng* 11(1):77-91.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Mostofi TM, Badkhor MS, Ghasemi E (2019) Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(3) 65-80.
- [26] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(1) 71-83.
- [27] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(2) 15-29.
- result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 234(2): 231-45.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Struct* 144, 106332.
- [16] Henchie TF, Yuen SC, Nurick GN, Ranwaha N, Balden VH (2014) The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study. *Int J Impact Eng* 74:36-45.
- [17] Truong DD, Jung HJ, Shin HK, Cho SR (2018) Response of low-temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts. *Int J Nav Arch Ocean Eng* 10(6):670-82.
- [18] Zhu L, Guo K, Li Y, Yu TX, Zhou Q (2018) Experimental study on the dynamic behaviour of aluminium foam sandwich plates under single and repeated impacts at low temperature. *Int J Impact Eng* 114:123-32.
- [19] Zhu L, Shi S, Jones N (2018) Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts. *Int J Impact Eng* 117:113-22.