



## تغییر شکل پلاستیک ورق‌های چندلایه فلزی هم‌جنس و غیر هم‌جنس با چگالی سطحی ثابت تحت بارگذاری دفعی مکرر

مجتبی ضیاءشمامی<sup>۱</sup>، هاشم بابایی<sup>۲\*</sup>، توحید میرزابابایی مستوفی<sup>۳</sup>، حسین خدارحمی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشگر، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

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

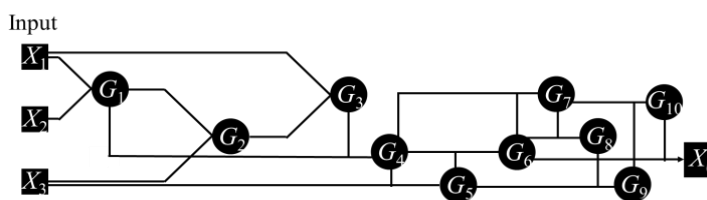
<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

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

### برجسته‌ها

- قرارگیری یک لایه ضخیم در جلو و پشتیبانی یک سازه با لایه نازک‌تر عملکرد بهتری می‌بخشد.
- نتیجه به‌دست‌آمده برای ساختارهای چندلایه هم‌جنس کاملاً مطابق با نتایج ساختارهای غیر هم‌جنس است.

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

\*نویسنده مسئول:

ghbabaei@guilan.ac.ir

کلید واژه‌ها:

بارگذاری مکرر

بارگذاری دفعی

ساختار چندلایه غیر هم‌جنس

ورق دایره‌ای

خیز حداکثر

### چکیده

در پژوهش حاضر، مکانیسم تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه فلزی هم‌جنس و غیر هم‌جنس با چگالی سطحی ثابت تحت بارگذاری دفعی مکرر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. از سامانه پاندول بالستیک به همراه لوله استقرار خرج ۲۰۰ میلی‌متری برای اعمال بار انفجاری به نمونه استفاده شد. ۴۰ نمونه آزمایشی در سه لایه‌بندی مختلف تک، دو و سه لایه با هشت چیدمان مختلف در نظر شد. برای ایجاد شرایط بارگذاری و آزمایشی یکسان، از ۱۰ گرم ماده منفجره پلاستیکی استفاده شد و پاسخ دینامیکی هر سازه تا ۵ بار بارگذاری مکرر مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی حاکی از تغییر شکل بزرگ پلاستیک همراه با نازک شدگی در مرزهای گیردار و همچنین پاره شدن برخی آزمایش‌ها است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش تعداد دفعات انفجار، بیشترین خیز دائمی ورق‌ها افزایش می‌یابد و با افزایش تعداد انفجارها، خیز پیش‌رونده ورق در مرکز آن به صورت نمایی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، قرارگیری یک لایه ضخیم در جلو و پشتیبانی یک سازه با لایه نازک‌تر عملکرد بهتری به نمونه آزمایشی در برابر بار انفجاری مکرر می‌بخشد. نتیجه به‌دست‌آمده برای ساختارهای چندلایه هم‌جنس کاملاً مطابق با نتایج ساختارهای غیر هم‌جنس است.

### ۱- مقدمه

در سال ۲۰۱۴، هنشیه و همکاران [۱۱] به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر بر روی ورق فولادی دایروی پرداختند. ورق دایروی مورد مطالعه آن‌ها از جنس فولاد دومکس ۷۰۰ 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 و یکرز ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۸، ترانگ و همکاران [۱۲] به مطالعه تغییر شکل دائمی ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری دفعی مکرر ناشی از ضربه زنده پرداختند. در این تحقیق معادلات فرم 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، به‌تدریج 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 [۱۳] به مطالعه پاسخ دینامیکی ورق‌های تقویت‌شده تحت بارگذاری مکرر پرداختند. در این مقاله برخی از فرمول‌های ساده بر اساس روش کاملاً صلب-پلاستیک برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های مستطیلی تقویت‌شده تحت بارگذاری مکرر توسط ضربه زنده در هر مکان پیشنهاد شده است. به‌منظور اعتبارسنجی روابط تحلیلی ارائه‌شده، از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی کمک گرفته شده است. تأثیر خواص مواد شامل نرخ کرنش، کرنش سختی، مدول الاستیک بر روی دقت پیش‌بینی‌های نظری، با مقایسه با شبیه‌سازی‌های عددی، ارزیابی شد که نشان می‌دهد

بررسی اثر بار انفجاری روی یک سازه به علت ایجاد شوک ناشی از انفجار در کسری از ثانیه از پدیده‌های پیچیده مهندسی است [۱ و ۲]. 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 به‌خصوص روی ساختارهای چندلایه انجام شده است [۳-۵]. از کاربردهای اصلی پدیده انفجار مکرر روی یک سازه می‌توان به به‌کارگیری ورق‌های فلزی بکار رفته در یک خودروی زرهی برای محافظت جان رزمنده در مقابل مین‌های کنار جاده‌ای و یا حتی حفظ جان مجروحین داخل خودروهای امدادی در مقابل بارگذاری انفجاری مکرر اشاره نمود. از موارد دیگر می‌توان به کشتی‌ها و زیردریایی‌هایی اشاره کرد که در معرض انفجارهای مکرر در دریاها و اقیانوس‌ها قرار می‌گیرند و در صورت نداشتن سازه مقاوم در مقابل این پدیده منجر به غرق شدن آن‌ها می‌گردد. از دیگر کاربردها می‌توان به ایمن بودن قسمت انبار هواپیماهای مسافربری در مقابل بارگذاری انفجاری مکرر ناشی از انفجار بمب‌ها دانست که با تعبیه ساختارهایی مقاوم در برابر انفجارها می‌توان جان سرنشینان را نجات داد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و احساس نیاز به تحقیق در این حوزه از مهندسی ضربه و انفجار، هدف کلی تحقیقات در سال‌های اخیر، مطالعه پاسخ دینامیکی ساختارهای فلزی چندلایه تحت بارگذاری انفجاری چندمرحله‌ای یا مکرر است که در آن شرط چگالی سطحی یکسان رعایت شده باشد [۶ و ۷]. حفظ این شرط در یک تحقیق کمک می‌کند تا بتوان درک درستی از رفتار چندین سازه با ترکیب‌بندی‌های مختلف داشت و بهترین سازه با بهترین عملکرد انفجاری را انتخاب کرد. در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، تحقیقات تجربی نسبتاً گسترده‌ای توسط محققین در زمینه شکل‌دهی ورق که در آن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاهی آزاد می‌شود و فشار زیادی به هدف موردنظر اعمال می‌شود، انجام شده است؛ اما بررسی انفجار مکرر روی یک سازه بسیار محدود و انگشت‌شمار است [۸-۱۰].

در ادامه به مهم‌ترین تحقیقات انجام‌شده در این زمینه در شش سال گذشته پرداخته شده است.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه رفتار سازه تحت بار انفجاری مکرر مربوط به ساختارهای تک لایه فولادی یا کامپوزیتی بوده [۱۶-۲۱] و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های چندلایه فلزی ترکیبی با شرط چگالی سطحی یکنواخت تحت بار دفعی مکرر و حتی منفرد انجام نشده است. منظور از چگالی سطحی ثابت آن است که ضرب چگالی در ضخامت هر لایه و مجموع آن‌ها در یک ساختار چندلایه، ثابت در نظر گرفته شده است. مزیت این مسئله آن است که می‌توان ساختارهای مختلف با جرم یکسان را در شرایط بارگذاری مشابه آزمایش کرد و دریافت کدام سازه هم جرم دارای عملکرد بهتری در برابر بارگذاری موردنظر است. لذا برای تحقق هدف مطرح شده از ورق‌های فولادی و آلومینیومی در ترکیب‌بندی‌های مختلف هم‌جنس و غیر هم‌جنس با جرم و هندسه یکسان استفاده می‌شود. همچنین برای برقراری شرایط بارگذاری مشابه از جرم خرج ۱۰ گرم در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از سطح نمونه در تمامی آزمایش‌ها بهره گرفته می‌شود. در این مطالعه تجربی، اثر تعداد بارگذاری انفجاری و نوع ترکیب‌بندی لایه‌ها روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه مطالعه می‌گردد که در قیاس با سایر تحقیقات موجود در ادبیات موضوع جز نوآوری‌های تحقیق حاضر محسوب می‌گردد.

## ۲- مطالعه آزمایشگاهی

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

در پژوهش حاضر، از سامانه پاندول بالستیک ساخته شده در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان برای مطالعه تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست چندلایه‌های فلزی تحت

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 [۱۴] 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 ترمواستاتیکی 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، گائو و همکاران [۱۵]، 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 که ترک در ورق جلویی رخ دهد کاهش می‌یابد.

در زمان استفاده از لوله‌های بلند استقرار خرج بهره گرفته می‌شود. این بدین دلیل است که در این وضعیت؛ یعنی، استفاده از لوله‌های استقرار، پاندول را از حالت تعادل خارج می‌کند. در این پژوهش، از یک لوله استقرار خرج انفجاری به قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۲۰ میلی‌متر و طول‌های ۲۰۰ میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه و همچنین یکنواخت کردن توزیع بار است، استفاده شده است. طول‌های مختلف برای لوله این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر فاصله خرج روی میزان تغییر شکل پلاستیک سازه را بررسی نمود. شایان توجه است که با توجه به پیشینه [۱، ۶، ۷ و ۲۰]، در صورتی که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از شعاع باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد.

مطابق با شماتیک دوبعدی ارائه شده در شکل ۲، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده می‌شود. در تحقیق حاضر ماده منفجره به‌کار گرفته شده برای انجام آزمایش‌های تجربی C4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری شکل بودن آن با دست به‌صورت 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 نانل به جرم ۱ گرم و به همراه دستگاه تحریک نانل استفاده می‌شود. ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای بین دو صفحه فولادی ضخیم با ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده شده و با ۷ عدد پیچ ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به‌صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌های انفجاری، توسط کولیس ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری شده است.

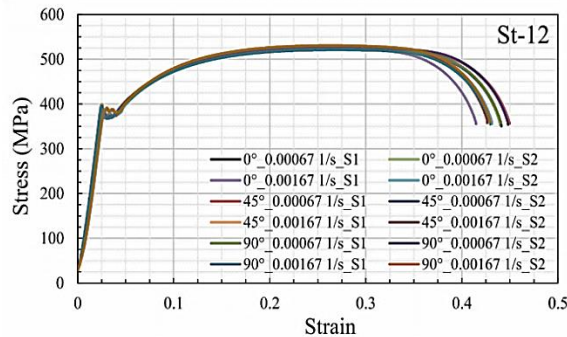
بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر استفاده شده است (مطابق با شکل ۱). این سامانه همراه با متعلقاتش به‌وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به‌صورت افقی و تراز آویزان است و دامنه حرکت رفت‌و برگشت پاندول توسط قلم روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده شده است، ثبت می‌گردد.



**شکل (۱):** شماتیک و تصویر واقعی سامانه پاندول بالستیک مطابق با شماتیک سامانه، در انتهای سمت چپ، روی صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر، چهار میله فولادی به شعاع ۷/۵ میلی‌متر نصب شده که به‌صورت نر و ماده به نگه‌دارنده نمونه آزمایشی متصل می‌شود. نگه‌دارنده نمونه آزمایشی از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل شده است. فرض بر این است که به دلیل ضخامت زیاد نگه‌دارنده‌های فلزی، آن‌ها از اجسام غیرقابل تغییر شکل هستند؛ یعنی در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی نازک تغییر شکل غیرقابل توجهی را تجربه می‌کنند.

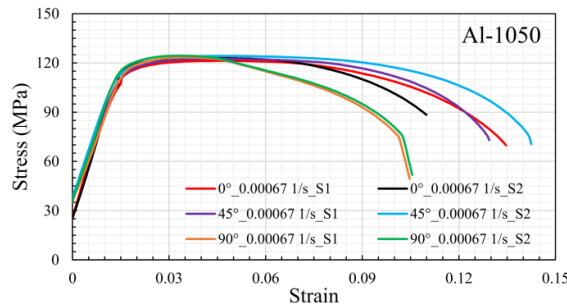
برحسب نوع تغییر شکل ورق، وسط هر دو صفحه منفذی جهت اعمال بار و خروج صفحه تعبیه شده است. همچنین، رزوه‌هایی جهت نصب لوله‌های استقرار خرج در صفحه جلویی نگه‌دارنده نمونه آزمایشی در نظر گرفته شده است. در سمت راست سامانه نیز از رزوه‌هایی جهت برقراری تعادل

تعیین شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (۴۵ درجه) نمونه‌هایی را با دستگاه وایر کات برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شد. برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو نمونه آزمایشگاهی تهیه شد. در انجام آزمایش، نمونه‌ها با سه سرعت ۵، ۱۰ و ۱۵ (میلی‌متر بر دقیقه) تحت کشش قرار گرفته‌اند. با توجه به طول اولیه نمونه‌ها (۵۰ میلی‌متر)، سه نرخ کرنش با مقادیر  $1/67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ،  $3/33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  و  $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  اعمال شد. مطابق با اشکال ۴ و ۵، برای ورق‌های آلومینیومی و فولادی در ضخامت‌های متفاوت، منحنی تنش و کرنش کاملاً مشابه و منطبق بر یکدیگر بودند.



شکل (۴): منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی برای ماده

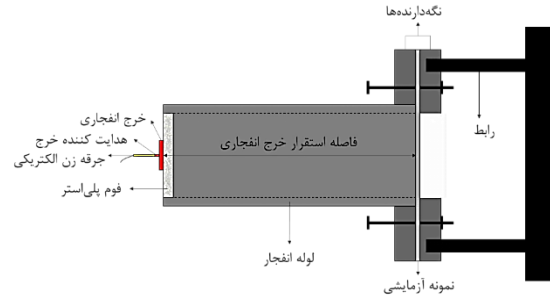
فولادی استفاده‌شده در این تحقیق [۵]



شکل (۵): منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی برای ماده

آلومینیومی استفاده‌شده در این تحقیق [۵]

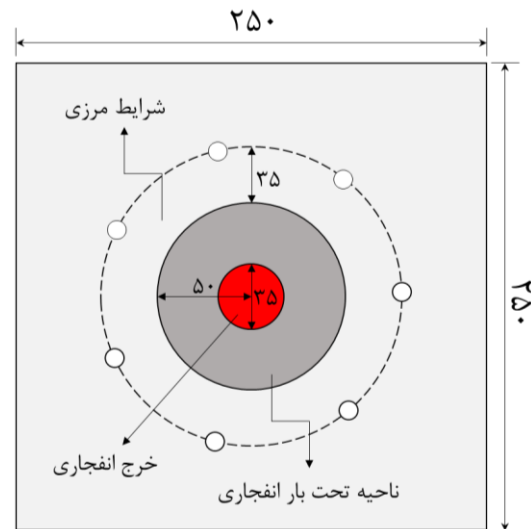
در جدول ب پیوست، مقادیر تنش تسلیم استاتیکی، تنش نهایی و همچنین کرنش شکست، چگالی و مدول الاستیسیته برای هر دو ماده ارائه شده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و مطابق با جدول ب پیوست، ۴۰ ساختار تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی، فولادی و ترکیبی



شکل (۲): شماتیک دوبعدی نحوه قرارگیری نمونه

آزمایشی، نگهدارنده و خرج انفجاری

ساختارهای تک و چندلایه به ترتیب شامل ورق‌های فولادی و آلیاژ آلومینیوم هستند که به ترتیب از شرکت فولاد مبارکه و شرکت آلومینیوم اراک در ایران خریداری شده‌اند. در این سری از آزمایش‌ها، ضخامت‌های مختلف ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر برای صفحات فولادی و همچنین ۳ میلی‌متر برای نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم در نظر گرفته شده است. ترکیبات شیمیایی صفحات آلیاژ فولاد و آلومینیوم در جدول الف پیوست ارائه شده است. در ابتدا نمونه ورق‌های مورد آزمایش در ابعاد  $250 \times 250$  میلی‌متر مربع برش زده شدند. مطابق با شکل ۳، نمونه‌های آزمایشی دارای سطح شکل‌گیری یا مواجهه دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر هستند.



شکل (۳): شماتیک هندسی نمونه آزمایشی و خرج

انفجاری (ابعاد به میلی‌متر است)

خواص مکانیکی مواد فلزی مورد استفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک‌محوره روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم و فولاد نرم

### ۱-۳- مکانیسم تغییر شکل و الگوی شکست

در این قسمت از تحقیق، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند تعداد بارگذاری انفجاری، تغییر نوع لایه‌بندی و جابجایی لایه‌ها بر بیشترین خیز دائمی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی هم‌جنس و غیر هم‌جنس تحت بار دفعی یکنواخت مکرر نشان می‌دهد که در طول ۴۰ آزمایش، تمامی ساختارها سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای آزمایشی در اشکال الف، ب و پ پیوست نشان داده شده است. در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به صورت گنبدی شکل بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولیدشده، به صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود. شایان‌ذکر است که تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ لایه جلویی، انرژی قابل توجهی از انفجار ماده منفجره را جذب می‌کند و انرژی جنبشی منتقل شده بر سطح لایه عقبی، موجب تغییر شکل دائمی آن می‌شود. همچنین، ناحیه گنبدی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای گیردار حرکت می‌کند و سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند. همچنین، نازک‌شدگی 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، نازک‌شدگی در تمامی یا بخشی از لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مد از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام شده توسط تیلینگ اسمیت و نوریک [۲۰] است. مشاهده دقیق‌تر تصویر ارائه شده برای بارگذاری سوم نشان می‌دهد که ساختار سه‌لایه هم‌جنس

فولاد-آلومینیوم در هشت گروه‌بندی به منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی ترکیبی هم جرم تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر طراحی و ساخته شده‌اند [۵]. هر گروه آزمایشی تحت ۵ دفعه بارگذاری با جرم خرج ۱۰ گرم مورد بررسی قرار گرفته است. شایان توجه است که در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام گرفته بر میزان اثر بارگذاری دفعی مکرر روی مقاومت انفجاری ساختارهایی که دارای جرم یکسانی هستند، است. لازم به توضیح است که در تمامی آزمایش‌ها فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متر است. لازم به توضیح است که هیچ‌گونه اتصال چسبی بین دو لایه موجود نیست و تنها ورق‌ها پشت یکدیگر بدون هیچ قیدی قرار گرفته‌اند. در جدول ارائه شده، در ستون کد آزمایش، حرف M بیانگر ساختار تک‌لایه، حرف D بیانگر ساختار دولایه، حرف T نشان‌دهنده ساختار سه‌لایه هم‌جنس و حرف TM ساختار سه لایه ترکیبی و اعداد بعد از آن به ترتیب ضخامت هر لایه است [۵].

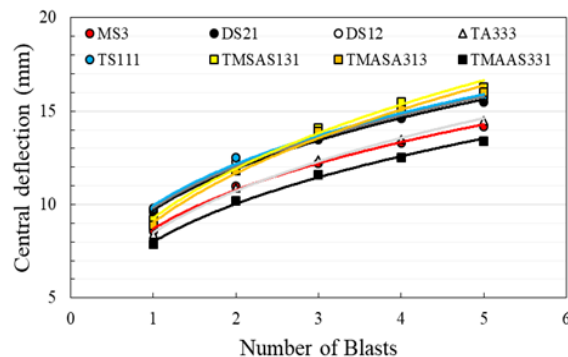
### ۳- بحث و بررسی نتایج تجربی

در جدول ت پیوست، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت بار دفعی یکنواخت مکرر تا ۵ دفعه ارائه شده است. در این جدول، مقادیر جرم خرج انفجاری M، شماره هر انفجار B، ایمپالس ناشی از بارگذاری دفعی I، بیشترین خیز دائمی نمونه  $W_0$  و همچنین نسبت بی‌بعد خیز دائمی به ضخامت نمونه ارائه شده است [۵]. لازم به توضیح است که آزمایش تکرارپذیری تنها برای ساختار اول انجام شده است و نتایج برای این گروه به صورت میانگین ارائه شده است. نتایج به دست آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی، فولادی و ترکیبی فولاد-آلومینیوم تحت دفعی یکنواخت مکرر است که در آن اثر تغییرات جنس و ضخامت لایه در ساختارهای چندلایه، ترتیب لایه، تعداد لایه‌ها در اهداف چندلایه و تعداد بارگذاری بررسی شده است. لازم به توضیح است که در نتایج مربوط به ساختارهای چندلایه، مقادیر بیشترین خیز برای لایه عقبی ارائه شده است.

گنبدی شکل در هر مرحله و افزایش حجم فضا) به ازای تغییر شکل در حین فرآیند بارگذاری در مرحله قبلی است. نتایج همچنین بیانگر تکرارپذیری برای ایمپالس است.

### ۳-۳- رابطه خیز دائمی با دفعات بارگذاری

اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی مکرر به تحلیل نتایج تجربی کمی به دست آمده پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام شده در این بخش، جرم خرج ۱ گرم نازل لحاظ نشده است). در شکل ۶، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای مختلف برحسب تعداد بارگذاری نمایش داده شده است. در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ساختارهای مختلف با افزایش تعداد بار انفجاری به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. برای بیان رابطه بین بیشترین خیز دائمی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه برحسب تعداد بارگذاری، در شکل ۶ نمودارهای نمایی روی داده‌های آزمایشگاهی برازش شد که در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل (۶): تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای مختلف برحسب تعداد بارگذاری

جدول ۱: منحنی‌های نمایی برازش شده

کد آزمایش	منحنی برازش شده	R <sup>2</sup>
MS3R5M10_200	$W_0 = 8.70B^{0.31}$	۰/۹۹۶
DS21R5M10_200	$W_0 = 9.70B^{0.30}$	۰/۹۹۷
DS12R5M10_200	$W_0 = 9.81B^{0.30}$	۰/۹۹۶
TA333R5M10_200	$W_0 = 8.49B^{0.34}$	۰/۹۹۷

TA333R5M10B3\_200 دچار تغییر شکل پلاستیک بزرگ همراه با گلوبی شدن در بخشی از پیرامون گیردار نمونه است و افزایش تعداد بارگذاری باعث می‌شود تا یک ساختار سه لایه دیگر؛ یعنی، ساختار ترکیبی TMSA313، نیز دچار این حالت از تغییر شکل گردد. همچنین برای بارگذاری پنجم، دو ساختار سه لایه ترکیبی دیگر؛ یعنی، ساختارهای TMSA313 و TMSA131 همراه با ساختار سه لایه هم‌جنس TA333، حالت تغییر شکل پلاستیک بزرگ همراه با گلوبی شدن در بخشی از پیرامون گیردار نمونه را تجربه می‌کنند. شایان توجه است که در دو بارگذاری چهارم و پنجم، دو ساختار سه لایه هم‌جنس TA333 و غیر هم‌جنس TMSA313 نازک‌شدگی شدیدی را در پیرامون مرز گیردار خود بدون شروع ترک یا پارگی تجربه می‌کنند. این موضوع بدان معناست که این دو ساختار به هیچ‌عنوان عملکرد مناسبی در برابر بارهای انفجاری مکرر در قیاس با سایر ساختارهای آزمایشی ارائه شده در جدول ۱ ندارند. لازم به توضیح است که در نتایج ارائه شده در شکل‌های الف، ب و پ موجود در پیوست تأکید می‌کند که در نظر گرفتن یک‌لایه آلومینیومی با ضخامت حتی ۳ برابر ورق فولادی موجب می‌شود تا نازک‌شدگی شدید در لایه عقبی سازه ایجاد گردد که این به علت کرنش شکست پایین ورق آلومینیومی در مقایسه با ورق فولادی می‌باشد؛ لذا مشاهدات تجربی روی گستره تغییر شکل و الگوی شکست ساختارهای مختلف نشان می‌دهد که در ساختارهای چندلایه، ورق نازک اما با تنش تسلیم، چگالی و کرنش شکست بالاتر باید در انتها قرار داشته باشد.

### ۳-۲- رابطه ایمپالس با تعداد دفعات بارگذاری

مطابق با جدول ۱ پیوست در این سری از آزمایش‌ها، تغییرات بسیار اندکی در ایمپالس منتقل شده به نمونه آزمایشی برای هر دفعه بارگذاری وجود دارد و مشخص است که گرادیان این تغییرات در بین انفجارهای اول تا پنجم در یک جرم خرج مشخص تقریباً صفر است. شایان توجه است که علت اختلاف کم در مقدار ایمپالس ناشی تغییر حجم فضای تغییر شکل یافته نمونه آزمایشی (افزایش ناحیه

جدول ۱: منحنی‌های نمایی برازش شده

کد آزمایش	منحنی برازش شده	R <sup>2</sup>
TS111R5M10_200	$W_0 = 9.94B^{0.29}$	۰/۹۹۳
TMSAS131R5M10_200	$W_0 = 9.26B^{0.36}$	۰/۹۹۵
TMASA313R5M10_200	$W_0 = 9.03B^{0.37}$	۰/۹۹۳
TMAAS331R5M10_200	$W_0 = 8.0B^{0.33}$	۰/۹۹۶

نگاه دقیق‌تر به نمودار ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که در تمامی دفعات بارگذاری، ساختار TMAAS331 دارای بهترین عملکرد در برابر بار دفعی یکنواخت مکرر بوده و بعدازآن، ساختار تک‌لایه فولادی و سه‌لایه آلومینیومی بهترین عملکرد را دارا هستند. این در صورتی است که ۵ ساختار دیگر تقریباً رفتاری مشابه و نزدیک به هم از دیدگاه بیشترین میزان تغییر شکل را دارند و اختلاف تقریباً چشمگیری با سه ساختار فوق‌الذکر دارند. به‌طور جزئی‌تر، در ادامه ساختار TMAAS331 به‌عنوان بهترین سازه در برابر بار انفجاری مکرر، مبنای مقایسه قرار می‌گیرد. مقایسه ساختار تک‌لایه فولادی MS3 با TMAAS331 نشان می‌دهد که استفاده از یک ساختار تک‌لایه فولادی به‌عنوان سازه در برابر انفجاری منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۸/۹٪، ۷/۸٪، ۵/۲٪، ۶/۴٪ و ۶/۰٪ به ترتیب در دفعات اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود و با افزایش دفعات بارگذاری یک روند کاهشی را دارد. این مقادیر به ترتیب برای ساختار TA333 به میزان ۶/۳٪، ۶/۹٪، ۶/۹٪ و ۸/۰٪ و ۸/۲٪ برای ساختار DS21 به میزان ۲۱/۵٪، ۱۸/۶٪، ۱۶/۴٪، ۱۶/۸٪ و ۱۵/۷٪ برای ساختار DS12 به میزان ۲۲/۸٪، ۲۰/۶٪، ۱۷/۲٪ و ۱۷/۶٪ برای ساختار TS111 به میزان ۲۴/۱٪، ۲۲/۵٪، ۱۸/۱٪ و ۱۸/۴٪ و ۱۷/۹٪ برای ساختار TASA313 به میزان ۱۲/۷٪، ۱۵/۷٪، ۱۹/۸٪، ۲۰/۸٪ و ۱۹/۴٪ برای ساختار TSAS131 به میزان ۱۶/۵٪، ۱۶/۷٪، ۲۱/۶٪، ۲۴/۰٪ و ۲۱/۶٪ است. این نتیجه نشان می‌دهد که اگر ترتیب لایه‌ها در ساختارهای چندلایه ترکیبی به‌درستی انتخاب گردد، از این ترکیب‌بندی می‌توان به‌عنوان یک سازه مناسب در برابر بار انفجاری یاد کرد.

در ادامه بحث، به بررسی تغییرات میزان خیز پیش‌رونده برحسب تعداد بارگذاری برای هر سازه پرداخته می‌شود که نمودار آن در شکل ۷ رسم شده است. لازم به ذکر است که

منظور از خیز پیش‌رونده همان مقدار اختلاف خیز مرکزی ورق در دو بارگذاری پی‌درپی است. نتایج نشان می‌دهد که این کمیت یک روند نمایی کاهشی را طی می‌کند. دلیل روند نمایی کاهش خیز را می‌توان ناشی از کار سختی ماده ورق بعد از هر بار بارگذاری مکرر دانست [۱۱]. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر بار بارگذاری انفجاری در ورق افزایش می‌یابد و انباشته می‌گردد و سبب کاهش روند افزایشی تغییر جابجایی نقطه میانی ورق می‌گردد.

مطابق با جدول نتایج تجربی و همچنین شکل ۷ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش تعداد دفعات بارگذاری در ساختار TMAAS331 بیشترین خیز دائمی نمونه نسبت به دفعه قبلی به میزان ۷۰/۹٪، ۳۹/۱٪، ۳۵/۷٪ و ۰/۰٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم کاهش می‌یابد. این مقادیر به ترتیب برای ساختار MS3 به میزان ۷۲/۱٪، ۵۰/۰٪، ۸/۳٪ و ۱۸/۲٪ برای ساختار TA333 به میزان ۷۰/۲٪، ۴۰/۰٪، ۲۶/۷٪ و ۹/۱٪ برای ساختار DS21 به میزان ۷۴/۰٪، ۴۴/۰٪، ۲۱/۴٪ و ۱۸/۲٪ برای ساختار DS12 به میزان ۷۳/۲٪، ۵۰/۰٪، ۱۵/۴٪ و ۹/۱٪ برای ساختار TS111 به میزان ۷۲/۴٪، ۵۵/۶٪، ۸/۳٪ و ۹/۱٪ برای ساختار TASA313 به میزان ۶۷/۴٪، ۲۷/۶٪، ۴۲/۹٪ و ۲۵/۰٪ برای ساختار TSAS131 به میزان ۷۰/۷٪، ۱۸/۵٪، ۳۶/۴٪ و ۴۲/۹٪ است. این نتیجه نشان می‌دهد که در ساختارهای ترکیبی رفتار کاهشی در میزان خیز پیش‌رونده روند منطقی ندارد و این به علت رفتار بین لایه‌های فلزی و مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل است. منظور از رفتار بین لایه‌های فلزی این است که در واقع به دلیل عدم در نظر گرفتن لایه چسبی بین لایه‌ها، در حین تغییر شکل سازه، لایه‌ها توأمان با یکدیگر جابجا نمی‌شوند و فعل‌وانفعالی بین آن‌ها رخ می‌دهد.



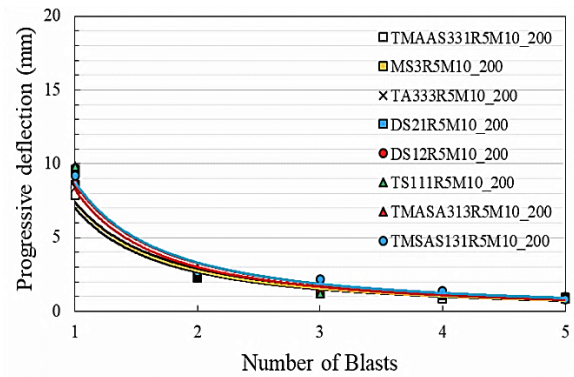
با سایر ساختارهای آزمایشی داشت. همچنین، میزان بیشترین خیز دائمی ساختار سه‌لایه فولادی نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌های ساختار و افزایش تعداد بار انفجاری منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش بیشترین خیز دائمی به میزان  $14/0\%$ ،  $13/6\%$ ،  $12/3\%$ ،  $11/3\%$  و  $11/3\%$  می‌شود.

در بخش دیگر این مبحث به بررسی تغییرات بیشترین خیز دائمی با جابجایی لایه‌ها در ساختار غیر هم‌جنس پرداخته می‌شود. نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو ساختار TMAAS331 و TMSA313 نشان می‌دهد که جابجایی لایه میانی و عقبی در این دو ساختار؛ یعنی استفاده از لایه ضخیم میانی به‌جای لایه نازک فولادی، منجر به افزایش چشمگیر مقاومت انفجاری سازه می‌شود، به‌طوری‌که بیشترین خیز دائمی سازه به میزان  $11/2\%$ ،  $13/6\%$ ،  $16/5\%$ ،  $17/2\%$  و  $16/3\%$  در دفعات بارگذاری اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم کاهش می‌یابد و هرچقدر تعداد بارگذاری بیشتر می‌شود، این جابجایی لایه تأثیر بیشتری روی کاهش خیز دائمی سازه و افزایش مقاومت انفجاری دارد. این موضوع بدین علت است که قرارگیری یک لایه با ضخامت زیاد، چگالی و تنش تسلیم پایین در جلوی سازه و در لحظه تماس اولیه با موج انفجار موجب می‌شود که به علت سفتی بیشتر لایه اول با توجه به ضخامت و همچنین ویژگی جذب انرژی بیشتر با توجه به چگالی و تنش تسلیم پایین، در کل سازه تغییر شکل کمتری داشته باشد. شایان توجه است که در نظر گرفتن یک ورق یک‌لایه با ضخامت ۶ میلی‌متر به‌جای دو ورق آلومینیومی ۳ میلی‌متر با توجه به افزایش سفتی ورق و ضخامت آن شرایط بهتری از لحاظ مقاومت انفجاری برای سازه ایجاد می‌کند اما تهیه یک ورق آلومینیومی با ضخامت ۶ میلی‌متر نیز خود دارای محدودیت است.

#### ۴- مدل سازی

##### ۴-۱- اصول و قواعد شبکه عصبی از نوع GMDH

در مدل‌سازی عددی، اجزای سیستم مجهول بوده و تنها ورودی و خروجی آن در دسترس است. در مدل‌سازی



شکل (۷): تغییرات خیز پیش‌رونده ساختارهای مختلف بر حسب تعداد بارگذاری

#### ۴-۳- اثر تغییر نوع لایه‌بندی روی بیشترین خیز دائمی

برای بررسی اثر تغییر لایه‌بندی روی بیشترین خیز دائمی نمونه‌های هم‌جنس، ساختار تک‌لایه فولادی MS3R5M10 به‌عنوان مبنای مقایسه برای تحلیل نتایج قرار داده می‌شود. مطابق با جدول نتایج تجربی این نتیجه حاصل می‌گردد که افزایش تعداد لایه‌ها به علت کاهش ضخامت هر لایه و سفتی آن منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی نمونه و کاهش مقاومت انفجاری آن می‌شود. به‌طور جزئی‌تر، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دفعات بارگذاری میزان بیشترین خیز دائمی ساختار DS21 در مقایسه با ساختار MS3 در هر دفعه بارگذاری به ترتیب به میزان  $11/6\%$ ،  $10/0\%$ ،  $10/7\%$ ،  $9/8\%$  و  $9/2\%$  افزایش می‌یابد. این در حالی است که جابجایی لایه‌ها در ساختار دو‌لایه فولادی تقریباً تأثیر محسوسی روی خروجی مسئله نمی‌گذارد. همچنین با افزایش دفعات بارگذاری میزان بیشترین خیز دائمی ساختار DS12 در مقایسه با ساختار MS3 در هر دفعه بارگذاری به ترتیب به میزان  $12/8\%$ ،  $11/8\%$ ،  $11/5\%$ ،  $10/5\%$  و  $10/6\%$  افزایش می‌یابد. این بدان معناست که قرارگیری یک لایه ضخیم در جلو و پشتیبانی یک سازه با لایه نازک‌تر عملکرد بهتری به نمونه آزمایشی در برابر بار انفجاری می‌بخشد. شایان توجه است که این نتیجه در ساختارهای هم‌جنس کاملاً مطابق با ساختار غیر هم‌جنس نیز است که در مرحله قبلی بحث شد و ساختار TMAAS331 بهترین عملکرد انفجاری را در قیاس

هر نرون با ۵ وزن و یک بایاس عمل پردازش را میان داده‌های ورودی و خروجی برقرار می‌کند که در رابطه (۵) نشان داده شده است [۲۹ و ۳۰].

$$y_{ik}^* = N(x_{i\alpha}, x_{i\beta}) = b^k + w_1^k x_{i\alpha} + w_2^k x_{i\beta} + w_3^k x_{i\alpha}^2 + w_4^k x_{i\beta}^2 + w_5^k x_{i\alpha} x_{i\beta} \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $i=1,2,3,\dots,N$  است که در آن  $N$  تعداد نمونه‌های ورودی و خروجی بوده و سو  $\alpha, \beta \in \{1,2,3,\dots,m\}$  می‌باشد، که در آن‌ها  $m$  تعداد نرون‌های لایه قبلی است. وزن‌ها بر اساس روش کمترین مربعات خطا محاسبه شده و سپس به‌عنوان مقادیر مشخص و ثابت در داخل هر عصب جایگذاری می‌شود. در این نوع از شبکه‌ها عصب‌های مرحله قبلی و یا لایه قبلی ( $m$ ) عامل و یا مولد تولید عصب‌های جدید (به تعداد  $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{m}$ ) اند. از میان عصب‌های تولیدشده، لزوماً بایستی تعدادی از آن‌ها حذف گردند تا بدین‌وسیله از واگرایی شبکه جلوگیری به عمل آید. اصطلاحاً به این‌گونه عصب‌های حذف‌شده، عصب مرده گفته می‌شود. عصب‌هایی که برای ادامه و گسترش شبکه باقی می‌مانند، امکان دارند برای ایجاد فرم همگرایی شبکه و عدم ارتباط آن‌ها با عصب لایه آخر حذف گردند، که اصطلاحاً به آن‌ها عصب غیرفعال می‌گویند. میزان مجموع مربعات خطا ( $r_j^2$ ) میان مقادیر خروجی واقعی ( $y_i$ ) و خروجی عصب زام ( $y_{ij}^*$ ) ملاک و معیاری برای حذف مجموعه‌ای از عصب‌ها در یک لایه است که در رابطه (۶) نشان داده شده است [۲۹ و ۳۰].

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ij}^*)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2} \rightarrow \min \quad (6)$$

در رابطه بالا  $\{1,2,3,\dots,C_m^2\}$  است که در آن  $m$  تعداد عصب‌های گزینش شده در لایه قبلی است. نگاهی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط این نوع از شبکه‌های عصبی برقرار می‌شود به‌صورت تابع غیرخطی ولترا، به فرم رابطه (۷) است [۲۹ و ۳۰].

عددی، شناسایی سیستم مبتنی بر اطلاعات ورودی و خروجی موردنظر است. حاصل این شناسایی یک تابع تقریبی ریاضی است. این تابع چندجمله‌ای، رابطه‌ای میان ورودی‌ها و خروجی و مدلی برای سیستم است [۲۲-۳۰]. مسائل شناسایی سیستم بدین‌گونه مطرح می‌گردد که فرض می‌شود که رابطه خروجی ( $y$ ) یک سیستم ناشناخته با  $m$  ورودی آن به‌صورت رابطه (۱) است.

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (1)$$

با داشتن  $N$  نمونه از این داده‌های ورودی و خروجی، سیستمی همانند ماتریس زیر در رابطه (۲) به‌دست می‌آید [۲۹ و ۳۰].

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m} & y_1 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m} & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & x_{N3} & \dots & x_{Nm} & y_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

عمل شناسایی سیستم را می‌توان انجام داد که حاصل آن تقریب تابع  $\hat{f}$  می‌باشد. که به‌موجب آن می‌توان به ازای بردار ورودی  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$  مقدار خروجی  $\hat{y}$  را به صورت رابطه (۳) تقریب زد [۲۹ و ۳۰].

$$\hat{y} = \hat{f}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (3)$$

آنچه به‌طور معمول به‌عنوان هدف مشترک روش‌های شناسایی سیستم مطرح است، کمینه کردن مجموع مربعات خطا به ازای  $N$  نمونه است که در رابطه (۴) آمده است.

$$\sum_{i=1}^N [\hat{f}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) - y_i]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

که در آن تابع  $(\hat{f})$  می‌تواند به‌صورت تابع خطی و یا غیرخطی از متغیرهای ورودی سیستم باشد [۲۹ و ۳۰]. شبکه GMDH، شبکه‌ای خود سازمانده و یک‌سویه است که از چندین لایه و هر لایه نیز از چندین عصب تشکیل شده است. تمامی عصب‌ها از یک ساختار مشابهی برخوردار می‌باشند، همگی آن‌ها دارای دو ورودی و یک خروجی‌اند و

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Np} & x_{Nq} & x_{Np}x_{Nq} & x_{Np}^2 & x_{Nq}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

و بردار  $Y$  مقادیر خروجی نیز از رابطه (۱۴) به دست آمده است [۲۹ و ۳۰].

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\} \quad (14)$$

برای حل معادله لازم است که شبه معکوس ماتریس غیرمربعی  $A$  محاسبه گردد. به همین خاطر برای محاسبه شبه معکوس ماتریس غیرمربعی  $A$ ، از روش تجزیه مقادیر تکینه (SVD) استفاده می‌شود [۲۹ و ۳۰].

#### ۴-۲- ارائه اعداد بی‌بعد برای مسئله حاضر

یکی از مشکلات موجود در مراجع قبلی [۱]، عدم بیان دلیل برای معرفی اعداد بی‌بعد بود؛ لذا در این بخش از تحقیق، هدف آن است که اعداد بی‌بعد پیشنهادی از بی‌بعدسازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق استخراج شوند و همچنین کمیت‌های مهمی نظیر هندسه ورق، توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر بار وارده، حساسیت ماده به نرخ کرنش و همچنین اینرسی بار دینامیکی وارد شده را در نظر بگیرد. در انتها معادلات ساختاری تجربی بر اساس نتایج تجربی موجود و همچنین روش تجزیه مقادیر منفرد بهینه‌شده به دست می‌آیند.

با مرور مطالعات و تحقیقات انجام‌شده روی تحلیل ابعادی رفتار پلاستیک-دینامیکی و شکست سازه‌های متفاوت اعم از تیر، ورق و پوسته‌ها تحت بارگذاری دینامیکی [۲، ۲۷-۲۱] این نتیجه به دست آمد که روش تحلیل ابعادی و به تبع آن استخراج روابط تجربی بر اساس اعداد بی‌بعد پیشنهادی، دارای مزیت‌های بسیار زیادی مانند سازمان‌دهی کارهای تجربی و دوری از انجام آزمایش‌های غیرضروری است؛ لذا می‌توان از این روش به‌عنوان یک روش جایگزین، مؤثر برای به دست آوردن یک رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی مسئله در هر فرآیندی نام برد. با توجه به تحلیل نیرویی

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k \quad (7)$$

+...

ساختاری را که برای عصب‌ها در نظر گرفته می‌شود، به صورت چندجمله‌ای دومتغیره درجه دوم، همانند رابطه (۸) است [۲۹].

$$y_i = f(x_{ip}, x_{iq}) = a_0 + a_1 x_{ip} + a_2 x_{iq} + a_3 x_{ip} x_{iq} + a_4 x_{ip}^2 + a_5 x_{iq}^2 \quad (8)$$

هدف در الگوریتم GMDH یافتن ضرایب ناشناخته  $a_0$  است. تابع  $f$  در رابطه (۸) دارای شش ضریب مجهول است. لذا بایستی آن‌ها را طوری تعیین کنیم که به ازای تمام نمونه‌های دو متغیر وابسته به سیستم  $\{(x_{ip}, x_{iq}), i=1, 2, \dots, N\}$  خروجی مطلوب  $\{(y_i), i=1, 2, \dots, N\}$  برقرار گردد. به همین خاطر تابع  $f$  را بر اساس قاعده کمترین مربعات خطا، طبق رابطه (۹) ارائه شده است [۲۹ و ۳۰].

$$\sum_{k=1}^N \left[ \left( f(x_{ki}, x_{kj}) - y_i \right)^2 \right] \rightarrow \min \quad (9)$$

با این شرایطی که بر مسئله حاکم است، بایستی دستگاه معادله‌ای را که دارای شش مجهول و  $N$  معادله است که در رابطه (۱۰) آمده است [۲۹ و ۳۰].

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_{1p} + a_2 x_{1q} + a_3 x_{1p} x_{1q} + a_4 x_{1p}^2 + a_5 x_{1q}^2 = y_1 \\ a_0 + a_1 x_{2p} + a_2 x_{2q} + a_3 x_{2p} x_{2q} + a_4 x_{2p}^2 + a_5 x_{2q}^2 = y_2 \\ \dots \\ a_0 + a_1 x_{Np} + a_2 x_{Nq} + a_3 x_{Np} x_{Nq} + a_4 x_{Np}^2 + a_5 x_{Nq}^2 = y_N \end{cases} \quad (10)$$

دستگاه معادله رابطه (۱۰) را می‌توان به فرم ماتریسی رابطه (۱۱) نمایش داد.

$$Aa = Y \quad (11)$$

که در آن  $a$  و  $A$  از رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) به دست می‌آیند [۲۹ و ۳۰].

$$a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}^T \quad (12)$$

$C_s$  سرعت صوت در محیط،  $X$  و  $Y$  مختصات بی‌بعد،  $T$  زمان بی‌بعد و  $W$  خیز بی‌بعد هستند. همچنین،  $m_x$ ،  $m_y$  و  $m_{xy}$  گشتاورهای خمشی بی‌بعد و  $n_x$ ،  $n_y$  و  $n_{xy}$  نیروهای غشایی بی‌بعد هستند. در ادامه، جهت افزودن اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش، با جایگزین کردن تنش تسلیم استاتیکی با تنش تسلیم دینامیکی، رابطه (۱۶) به صورت معادله (۱۷) تغییر می‌کند.

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left( n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left( \frac{L}{H} \right)^2 \left( \frac{\rho C_s^2}{\sigma_d} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_d} \right) \quad (17)$$

همان‌طور که از معادله ۱۷ برمی‌آید، 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  $P/\sigma_d$  که فشار دینامیکی متناسب است با  $\rho V_0^2$ . اکنون با به‌کارگیری معادله ساختاری کوپر-سیموندز و استفاده از تقریب جونز [۲۱-۲۷] برای محاسبه مقدار نرخ کرنش متوسط، تنش تسلیم دینامیکی برحسب تنش تسلیم استاتیکی و پارامترهای نرخ کرنش متوسط محاسبه می‌گردد و در نهایت با انجام ساده‌سازی عدد بی‌بعد اثر نرخ کرنش  $\xi$  به صورت معادله ۲۰ تعریف می‌گردد. با جایگذاری معادلات ۱۸ و ۲۰ در معادله ۱۷ و همچنین تغییر طول ورق مربعی به شعاع ورق دایره‌ای، تحلیل ابعادی برای معادله بی‌بعد حاکم بر ورق دایره‌ای تحت بار دینامیکی یکنواخت منجر می‌شود به رابطه ۲۱:

$$\sigma_d = \sigma_0 \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_m}{D} \right)^q \right) = \sigma_0 \left( 1 + \xi \left( \frac{W_0}{H} \right)^q \right) \quad (18)$$

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{V_0 W_0}{3\sqrt{2}R^2} = \frac{I W_0}{3\sqrt{2}\pi\rho H R^4} \quad (19)$$

$$\xi = \left( \frac{I}{3\sqrt{2}\pi\rho R^4 D} \right)^q \quad (20)$$

$$\frac{W_0}{H} = f \left( \frac{R}{H}, \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi} \right) \quad (21)$$

برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی یکنواخت به صورت رابطه (۱۵) ارائه می‌گردد.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \quad (15)$$

در معادلات بالا،  $M_x$ ،  $M_y$  و  $M_{xy}$  گشتاورهای خمشی،  $P$  نیروی دینامیکی،  $H$  ضخامت ورق و  $w$  میزان جابجایی ورق است. هنگامی که نیروهای برشی  $Q_x$  و  $Q_y$  به‌عنوان نیروهای عامل در نظر گرفته می‌شوند، جریان پلاستیک دینامیکی ماده توسط گشتاورهای خمشی  $M_x$ ،  $M_y$  و  $M_{xy}$  کنترل می‌شود. بر این اساس شماتیک معیار عملکرد فون-میسز در فضای نیروی سه‌بعدی عمومی برای جریان پلاستیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است که در آن  $m_x = M_x / M_0$ ،  $m_y = M_y / M_0$  و  $m_{xy} = M_{xy} / M_0$  هستند. همچنین،  $M_0$ ، گشتار خمشی کاملاً پلاستیک می‌باشد که به‌راحتی از رابطه  $\sigma_0 H^2 / 4$  قابل محاسبه است. در یک ورق مربعی کاملاً گیردار در لبه‌های مرزی، لولای پلاستیکی در دو قطر و چهار مرز گیردار روی محیط ورق شکل می‌گیرد. در لولاهای پلاستیک نیز باید سرعت خیز دائمی ورق صفر باشد. همچنین در مرزهای گیردار باید خیز و سرعت اولیه مقداری برابر با صفر داشته باشد. با توجه به اینکه موضوع موردنظر در این تحقیق بررسی تغییر شکل بزرگ ورق بوده؛ لذا افزودن نیروهای غشایی ( $N_x$ ،  $N_y$  و  $N_{xy}$ ) در معادله (۱۵) الزامی است و معادله ۱۵ به صورت معادله (۱۶) تغییر می‌کند [۲۱-۲۷].

با تعریف پارامترهای بی‌بعد  $X = x/L$ ،  $Y = y/L$ ،  $n_x = N_x / N_0$ ،  $n_y = N_y / N_0$ ،  $n_{xy} = N_{xy} / N_0$  و  $W = w/H$  معادله حاکم بر ورق مربعی به فرم بی‌بعد تبدیل می‌شود (معادله ۱۶).

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left( n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left( \frac{L}{H} \right)^2 \left( \frac{\rho C_s^2}{\sigma_0} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_0} \right) \quad (16)$$

در تعاریف بالا،  $L$  نصف طول ورق مربعی،  $M_0$  گشتار خمشی کاملاً پلاستیک،  $N_0$  نیروی غشایی کاملاً پلاستیک،

$$X_2 = B \cdot \frac{\rho_f V_{0,f}^2}{\sigma_{0,f}} \cdot \frac{\rho_m V_{0,m}^2}{\sigma_{0,m}} \cdot \frac{\rho_b V_{0,b}^2}{\sigma_{0,b}} \quad (25)$$

$$X_3 = B \cdot \frac{1}{\xi_f} \cdot \frac{1}{\xi_m} \cdot \frac{1}{\xi_b} \quad (26)$$

اکنون، رابطه فوق را می‌توان به صورت رابطه (۲۷) در نظر گرفت.

$$Y = \frac{W_0}{H} = f(X_1, X_2, X_3) \quad (27)$$

برای محاسبه مدل بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق‌های چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری مکرر از داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این معادلات داده‌های ورودی  $(X_1, X_2, X_3)$  و  $Y$  داده خروجی شبکه است [۲۹ و ۳۰].

#### ۴-۳- نتایج مدل سازی

در مدل سازی فرآیند بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های چندلایه دایره‌ای از ۴۰ دسته داده ورودی- خروجی آن به عنوان ورودی شبکه عصبی از نوع GMDH استفاده شده است. به منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دودسته تقسیم شده‌اند که شامل دسته داده‌های آموزشی و پیش‌بینی هستند؛ بنابراین، ۲۸ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۲ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، نسبت بیشترین خیز دائمی ورق‌های چندلایه دایره‌ای به ضخامت آن با استفاده از ۱۱ سری معادلات زیر به دست می‌آید (شکل ۸). لازم به توضیح است که این معادلات به صورت شبکه به یکدیگر متصل هستند. مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل ریاضی به دست آمده از شبکه عصبی از نوع GMDH و خروجی‌های تجربی در ۴۰ داده ورودی- خروجی فرآیند بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های چندلایه دایره‌ای در شکل ۹ نشان داده شده است.

$$G_1 = 3.354 + 0.3758X_1 + 0.1441X_2 + \dots \quad (28)$$

$$0.4996X_1^2 + 5.027X_2^2 + 5.223X_1X_2$$

$$G_2 = -2.952 - 0.01246X_3 + 0.4524G_1 + \dots \quad (29)$$

$$0.4681X_3^2 + 1.859G_1^2 + 1.887X_3G_1$$

رابطه ۲۱، نسبت بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق‌های تک لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت را نشان می‌دهد.

شایان توجه است که در تحلیل ابعادی ساختارهای دایره‌ای چندلایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر نسبت به تحلیل ابعادی ورق‌های تک لایه، کمیت‌های فیزیکی بیشتری وارد می‌شود. این کمیت‌ها شامل خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر لایه عقبی و جلویی یا حتی میانی و همچنین تعداد دفعات تکرار بارگذاری ( $B$ ) که باید در تحلیل رفتار پلاستیک ساختارهای چندلایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی هر کدام از لایه‌های جلویی، میانی و عقبی به ضخامت آن لایه برای ساختارهای دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی دینامیکی یکنواخت مکرر به صورت معادله ۲۲ بیان می‌شود. شایان توجه است که رابطه ۲۲ برای یک ساختار سه‌لایه غیرهم‌جنس تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت ارائه شده که دارای سه لایه با سه ماده مختلف است که باید اثر خواص مکانیکی، ضخامت و همچنین حساسیت ماده به نرخ کرنش به معادلات اضافه گردد. این موضوع بدان معناست که برای یک ساختار سه لایه هم‌جنس که در آن ضخامت لایه‌ها برابر است ضرورتی بر اضافه کردن اعداد بی‌بعد مربوط لایه‌های میانی و جلویی نیست.

$$\frac{W_0}{H} = f \left( \left( B \cdot \frac{R}{H_f} \cdot \frac{R}{H_m} \cdot \frac{R}{H_b} \right), \dots, \left( B \cdot \frac{\rho_f V_{0,f}^2}{\sigma_{0,f}} \cdot \frac{\rho_m V_{0,m}^2}{\sigma_{0,m}} \cdot \frac{\rho_b V_{0,b}^2}{\sigma_{0,b}} \right), \dots, \left( B \cdot \frac{1}{\xi_f} \cdot \frac{1}{\xi_m} \cdot \frac{1}{\xi_b} \right) \right) \quad (22)$$

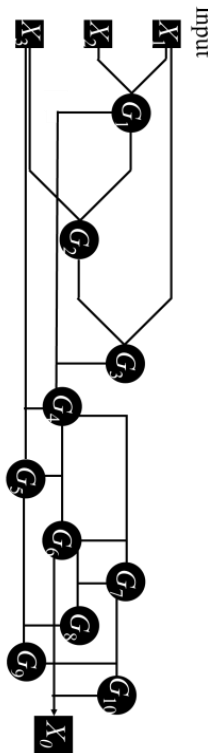
حال با توجه به توضیحات ارائه شده، معادله (۲۲) به صورت معادله (۲۳) تغییر می‌کند.

$$\frac{W_0}{H} = f(X_1, X_2, X_3) \quad (23)$$

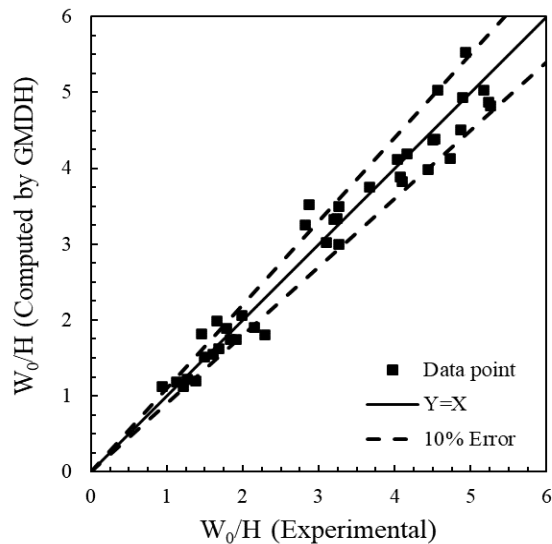
که در آن

$$X_1 = B \cdot \frac{R}{H_f} \cdot \frac{R}{H_m} \cdot \frac{R}{H_b} \quad (24)$$

خطای پیش‌بینی با وضوح بیشتری مشاهده کرد. با توجه به کم بودن خطای پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان از آن به‌عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش‌بینی رفتار پلاستیک ورق‌های چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری مکرر استفاده کرد.



شکل (۸): شبکه عصبی GMDH



شکل (۹): مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه‌شده توسط روش شبکه عصبی GMDH

$$G_3 = 0.08018 - 0.002799X_1 + 1.181G_2 + \dots \quad (30)$$

$$0.0000002221X_1^2 - 0.06601G_2^2 + 0.0009379X_1G_2$$

$$G_4 = -0.1362 - 0.6582G_1 + 1.692G_3 + \dots \quad (31)$$

$$2.245G_1^2 + 2.330G_3^2 - 4.588G_1G_3$$

$$G_5 = -0.2030 + 0.01506X_3 + 1.116G_4 + \dots \quad (32)$$

$$-0.00002577X_3^2 - 0.006858G_4^2 - 0.007818X_3G_4$$

$$G_6 = -0.1715 - 3.354G_4 + 4.522G_5 + \dots \quad (33)$$

$$-3.869G_4^2 - 4.863G_5^2 + 8.703G_4G_5$$

$$G_7 = 0.06095 + 1.331G_4 - 0.4685G_6 + \dots \quad (34)$$

$$6.643G_4^2 + 7.343G_6^2 - 13.96G_4G_6$$

$$G_8 = 0.1112 - 2.785G_6 + 3.842G_7 + \dots \quad (35)$$

$$-12.35G_6^2 - 13.05G_7^2 + 25.38G_6G_7$$

$$G_9 = 0.2549 + 2.369G_5 - 1.610G_8 + \dots \quad (36)$$

$$0.01530G_5^2 + 1.129G_8^2 - 1.103G_5G_8$$

$$G_{10} = 3758 + 1441G_7 + 0.4996G_9 + \dots \quad (37)$$

$$5.027G_7^2 + 5.223G_9^2 - 10.20G_7G_9$$

$$X_0 = -0.01246 + 0.4524G_6 + 0.4681G_{10} + \dots \quad (38)$$

$$1.859G_6^2 + 1.887G_{10}^2 - 3.736G_6G_{10}$$

در روش شبکه عصبی از نوع GMDH، انطباق خروجی‌های مدل شده و خروجی‌های تجربی برای داده‌های آموزشی و پیش‌بینی به‌دست‌آمده و انحراف داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی GMDH بسیار اندک است. این انحراف در بعضی از بخش‌ها به صفر می‌رسد؛ بنابراین، مطابق شکل ۹ توافق خوبی بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی مشاهده می‌شود به‌طوری‌که ۸۰٪ نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند. نتایج روش مدل‌سازی انجام‌شده برای فرآیند بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های چندلایه دایره‌ای، نشان‌دهنده دقت بالا و توانایی شبکه عصبی ارائه‌شده در طراحی و مدل‌سازی این فرآیند است. کاملاً مشخص است که هم خطای مدل‌سازی و هم خطای پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در این تحقیق به نتایج خوبی منجر شده، به‌خصوص این مورد را می‌توان در مورد

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ورق‌های تک‌لایه و چندلایه فلزی هم‌جنس و غیرهم‌جنس با چگالی سطحی ثابت تحت بارگذاری دفعی 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 یک‌روند 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 می‌گردد و سبب کاهش روند افزایشی تغییر جابجایی نقطه میانی ورق می‌گردد. سایر نتایج تجربی به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

(۱) در طول ۴۰ آزمایش، تمامی ساختارها سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به صورت دومی شکل بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولیدشده، به صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود.

(۲) ناحیه دومی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای گیردار حرکت می‌کنند و سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند. همچنین، نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است.

(۳) برای بارگذاری پنجم، دو ساختار سه‌لایه ترکیبی؛ یعنی، ساختارهای TMSAS131 و TMASA313 همراه با ساختار سه لایه هم‌جنس TA333، حالت تغییر شکل پلاستیک بزرگ همراه با گلویی شدن

در بخشی از پیرامون گیردار نمونه را تجربه می‌کنند.

(۴) در دو بارگذاری چهارم و پنجم، دو ساختار سه‌لایه هم‌جنس TA333 و غیر هم‌جنس TMASA313 نازک‌شدگی شدیدی را در پیرامون مرز گیردار خود بدون شروع ترک یا پارگی تجربه می‌کنند. این موضوع بدان معناست که این دو ساختار به هیچ‌عنوان عملکرد مناسبی در برابر بارهای انفجاری مکرر در قیاس با سایر ساختارهای آزمایشی ندارند.

(۵) در این سری از آزمایش‌ها، تغییرات بسیار اندکی در ایمپالس منتقل‌شده به نمونه آزمایشی برای هر دفعه بارگذاری وجود دارد و مشخص است که گرادیان این تغییرات در بین انفجارهای اول تا پنجم در یک جرم خرج مشخص تقریباً صفر است. شایان توجه است که علت اختلاف کم در مقدار ایمپالس ناشی تغییر حجم نمونه آزمایشی به ازای تغییر شکل پلاستیک در حین فرآیند بارگذاری در مرحله قبلی است.

(۶) افزایش تعداد لایه‌ها به علت کاهش ضخامت هر لایه و سفتی آن منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی نمونه و کاهش مقاومت انفجاری آن می‌شود.

(۷) قرارگیری یک لایه ضخیم در جلو و پشتیبانی یک سازه با لایه نازک‌تر عملکرد بهتری به نمونه آزمایشی در برابر بار انفجاری می‌بخشد. شایان توجه است که این نتیجه در ساختارهای هم‌جنس کاملاً مطابق با ساختار غیرهم‌جنس نیز است.

(۸) نتایج تجربی به دست آمده برای دو ساختار TMASA313 و TMAAS331 نشان می‌دهد که جابجایی لایه میانی و عقبی در این دو ساختار؛ یعنی استفاده از لایه ضخیم میانی به جای لایه نازک فولادی، منجر به افزایش چشمگیر مقاومت انفجاری سازه می‌شود و هرچقدر تعداد بارگذاری بیشتر می‌شود، این جابجایی لایه تأثیر بیشترین

the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2019;233(7):1449-71.

[7] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. Thin-Walled Structures. 2019;144:106332.

[8] Mehreganian N, Louca L, Langdon G, Curry R, Abdul-Karim N. The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques. International Journal of Impact Engineering. 2018;115:81-93.

[9] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. International Journal of Impact Engineering. 2019;125:93-106.

[10] Zhou Y, Ji C, Long Y, Yu Y, Li Y, Wang T. Experimental studies on the deformation and damage of steel cylindrical shells subjected to double-explosion loadings. Thin-Walled Structures. 2018;127:469-82.

[11] Henchie TF, Yuen SCK, Nurick G, Ranwaha N, Balden V. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study. International Journal of Impact Engineering. 2014;74:36-45.

[12] Truong DD, Jung H-J, Shin HK, Cho S-R. Response of low-temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2018;10(6):670-82.

[13] Zhu L, Shi S, Jones N. Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts. International Journal of Impact Engineering. 2018;117:113-22.

[14] Zhu L, Guo K, Li Y, Yu T, Zhou Q. Experimental study on the dynamic behaviour of aluminium foam sandwich plates under single and repeated impacts at low temperature. International Journal of Impact Engineering. 2018;114:123-32.

[15] Guo K, Zhu L, Li Y, Yu T, Sheno A, Zhou Q. Experimental investigation on the dynamic behaviour of aluminum foam sandwich plate under repeated impacts. Composite Structures. 2018;200:298-305.

[16] Rajendran R, Lee J. Blast loaded plates. Marine Structures. 2009;22(2):99-127.

[17] Rudrapatna N, Vaziri R, Olson M. Deformation and failure of blast-loaded square plates.

روی کاهش خیز دائمی سازه و افزایش مقاومت انفجاری دارد.

در بخش مدل‌سازی، از روش شبکه عصبی برای ارائه یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختار چندلایه دایره‌ای تحت بار دفعی استفاده شد. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند به‌طوری‌که ۲۸ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۲ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شد. نتایج حاصل‌شده بیان‌گر توافق خوب بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی است به‌طوری‌که ۸۰٪ نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند؛ بنابراین، با توجه به کم بودن خطای پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان از آن به‌عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش‌بینی رفتار پلاستیک ورق‌های چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری مکرر استفاده کرد.

## ۶- مراجع

[1] Li Q, Jones N. On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members. Archive of Applied Mechanics. 2000;70(4):245-54.

[2] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. Thin-Walled Structures. 2016;109:367-76.

[3] Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H. Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. Thin-Walled Structures. 2020;155:106851.

[4] Jones N. Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. International Journal of Impact Engineering. 2014;74:3-15.

[5] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H. Structural response of monolithic and multi-layered circular metallic plates under repeated uniformly distributed impulsive loading: An experimental study. Thin-Walled Structures. 2020;157:107024.

[6] Rezasefat M, Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. Proceedings of



monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2017;112:118-24.

[28] Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K. Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Technology*. 2017;315:171-81.

[29] Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh S, Mirzababaie Mostofi T. Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic impact loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020;234(3):368-78.

[30] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Namazi N, Rahmanpoor A. Dynamic compaction of cold die Aluminum powders. *Geomechanics and Engineering*. 2016;10:109-24.

*International Journal of Impact Engineering*. 1999;22(4):449-67.

[18] Cullis IG, Schofield J, Whitby A. Assessment of blast loading effects—Types of explosion and loading effects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2010;87(9):493-503.

[19] Soutis C, Mohamed G, Hodzic A. Modelling the structural response of GLARE panels to blast load. *Composite Structures*. 2011;94(1):267-76.

[20] Teeling-Smith R, Nurick G. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 1991;11(1):77-91.

[21] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H. 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 Structures*. 2018;123:48-56.

[22] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin-Walled Structures*. 2017;118:1-11.

[23] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E. On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017;231(5):939-50.

[24] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020;234(2):231-45.

[25] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Darvizeh A. Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Experimental Techniques*. 2016;40(6):1485-94.

[26] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M. Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Geomechanics and Engineering*. 2015;9(2):207-18.

[27] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of



## پیوست

جدول الف: ترکیبات شیمیایی ورق‌های فولادی و آلومینیومی استفاده شده در تحقیق حاضر (درصد وزنی)

عناصر								ماده
S	Cu	Cr	Si	Mn	P	Ni	Fe	فولاد
۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۷۲	۱/۰۹	۱/۱۳	۱/۲۵	۱/۶۳	۹۳/۸	
V	Zn	Ti	Mg	Mn	Si	Fe	Al	آلومینیوم
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۲۶	۰/۴۴	۹۹/۰	

جدول ب: خواص مکانیکی ورق‌های فولادی و آلومینیومی استفاده شده در تحقیق حاضر

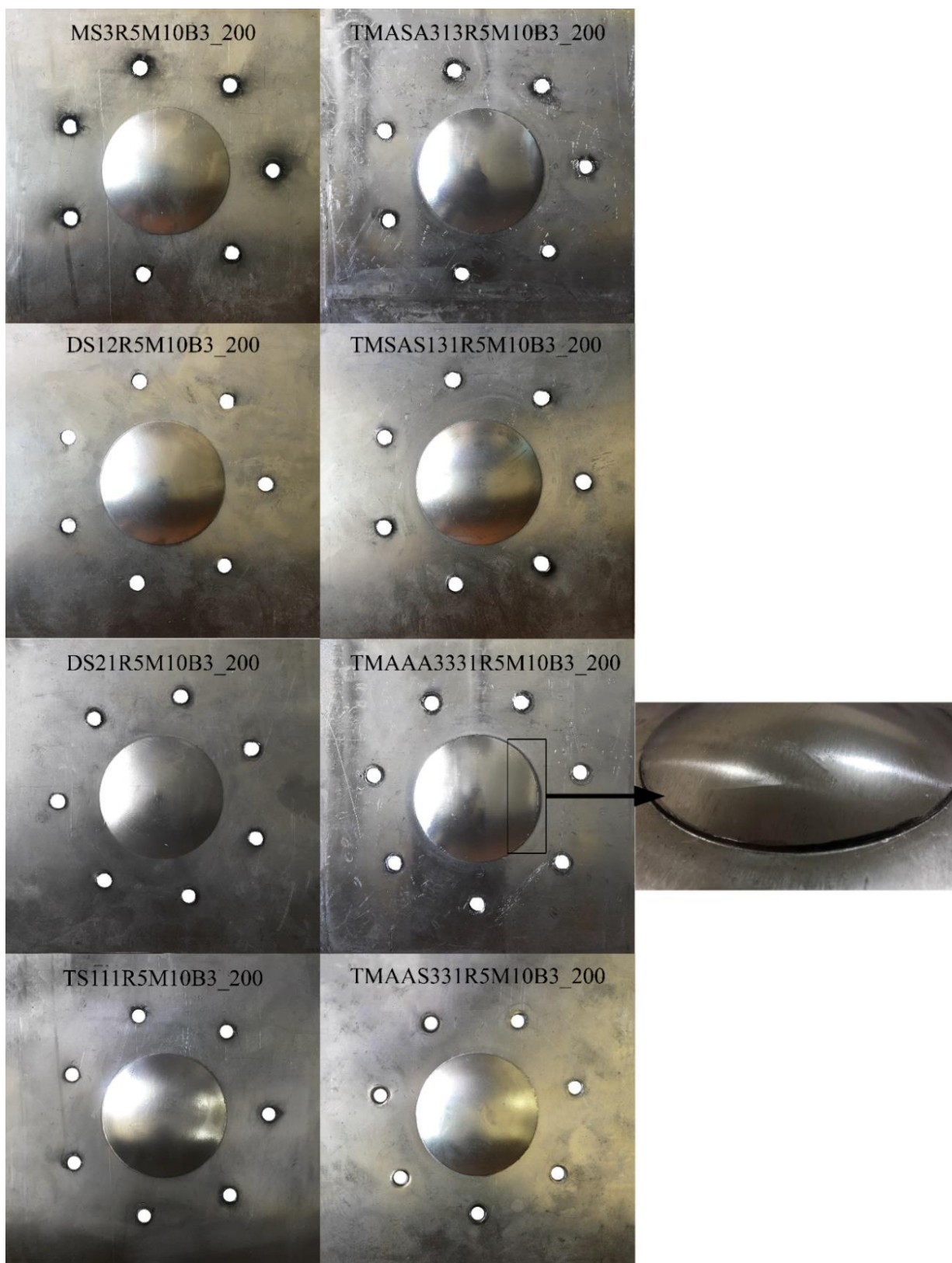
ماده	تنش تسلیم استاتیکی (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش شکست	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (GPa)
فولاد	۳۵۰	۵۲۵	۰/۱۲۱	۷۸۵۰	۲۱۰
آلومینیوم	۱۱۰	۱۲۳	۰/۴۰	۲۷۰۰	۶۹

جدول پ: گروه‌های آزمایشی

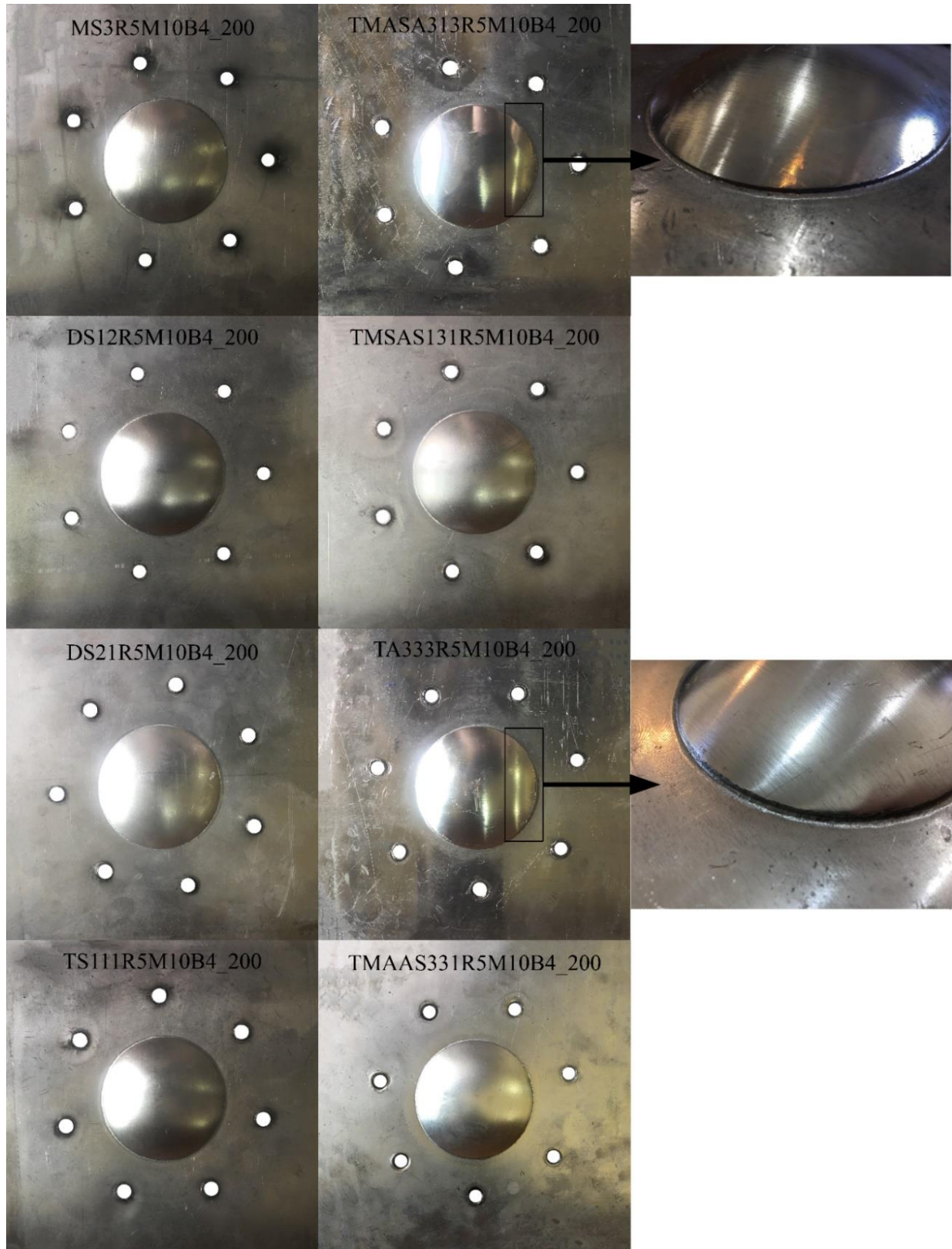
ترکیب بندی	هندسه	کد آزمایش	ضخامت کل (mm)	چگالی سطحی (kg/m <sup>2</sup> )	جرم خرج (g)	تعداد
تک لایه		MS3	۳	۲۳/۶	۱۰	۵
	دو لایه	DS21	۱+۲	۲۳/۶	۱۰	۵
		DS12	۲+۱	۲۳/۶	۱۰	۵
سه لایه		TA333	۳+۳+۳	۲۴/۳	۱۰	۵
		TS111	۱+۱+۱	۲۳/۶	۱۰	۵
		TMSAS131	۱+۳+۱	۲۳/۸	۱۰	۵
		TMASA313	۳+۱+۳	۲۴/۱	۱۰	۵
		TMAAS331	۱+۳+۳	۲۴/۱	۱۰	۵

## جدول ت: نتایج تجربی

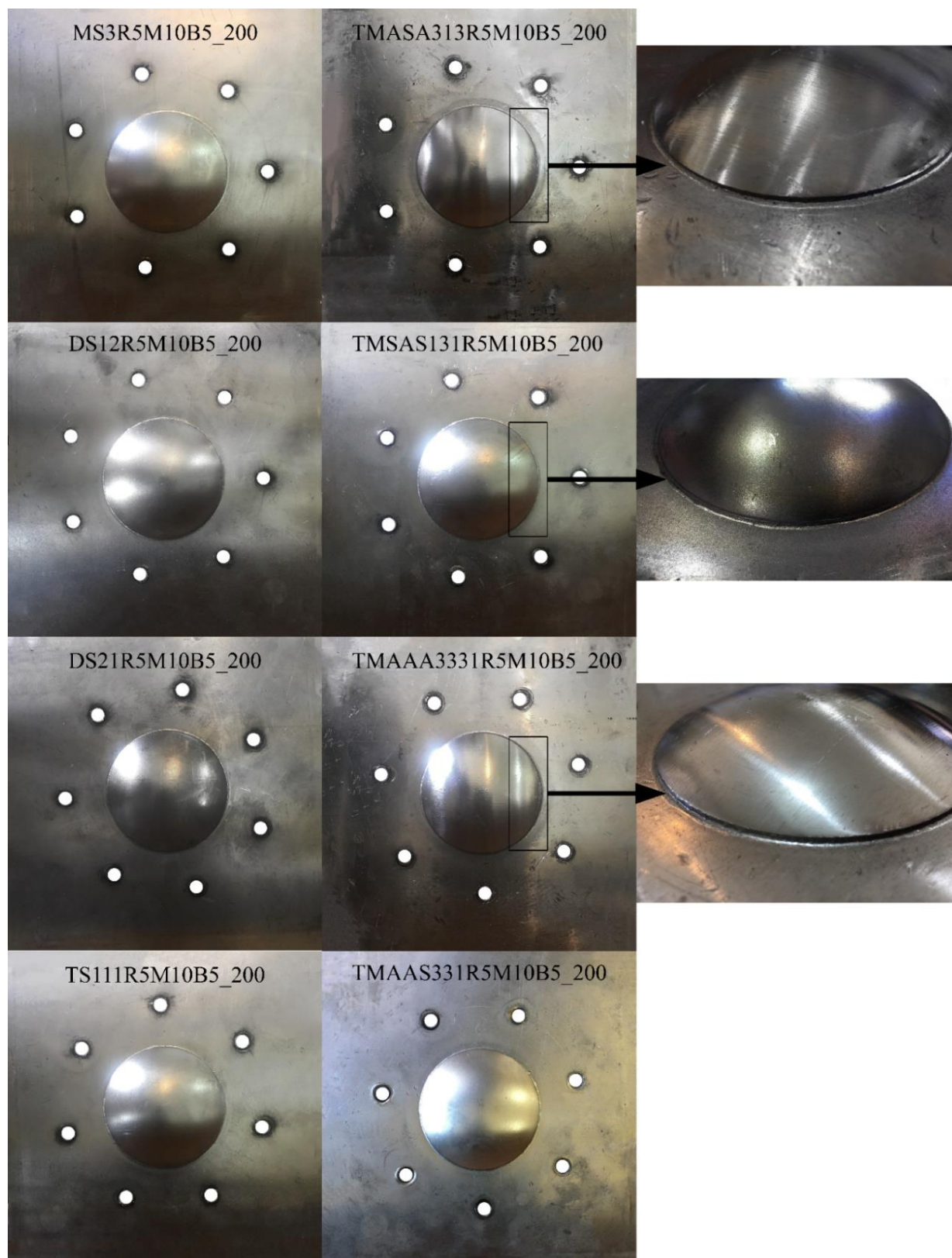
$W_0/H_t$	(mm) $W_0$	(N·s) I	(g) M	B	کد آزمایش
۲/۸۷	۸/۶	۲۱/۳۲	۱۰	۱	MS3R5M10B1_200
۳/۶۷	۱۱/۰	۲۱/۶۷	۱۰	۲	MS3R5M10B2_200
۴/۰۷	۱۲/۲	۲۱/۳۸	۱۰	۳	MS3R5M10B3_200
۴/۴۳	۱۳/۳	۲۱/۱۶	۱۰	۴	MS3R5M10B4_200
۴/۷۳	۱۴/۲	۲۱/۳۵	۱۰	۵	MS3R5M10B5_200
۳/۲۰	۹/۶	۲۱/۵۶	۱۰	۱	DS21R5M10B1_200
۴/۰۳	۱۲/۱	۲۱/۵۰	۱۰	۲	DS21R5M10B2_200
۴/۵۰	۱۳/۵	۲۱/۶۹	۱۰	۳	DS21R5M10B3_200
۴/۸۷	۱۴/۶	۲۱/۴۲	۱۰	۴	DS21R5M10B4_200
۵/۱۷	۱۵/۵	۲۱/۳۷	۱۰	۵	DS21R5M10B5_200
۳/۲۳	۹/۷	۲۱/۴۵	۱۰	۱	DS12R5M10B1_200
۴/۱۰	۱۲/۳	۲۱/۴۶	۱۰	۲	DS12R5M10B2_200
۴/۵۳	۱۳/۶	۲۱/۴۷	۱۰	۳	DS12R5M10B3_200
۴/۹۰	۱۴/۷	۲۱/۵۳	۱۰	۴	DS12R5M10B4_200
۵/۲۳	۱۵/۷	۲۱/۴۸	۱۰	۵	DS12R5M10B5_200
۰/۹۳	۸/۴	۲۱/۳۹	۱۰	۱	TA333R5M10B1_200
۱/۲۱	۱۰/۹	۲۱/۶۷	۱۰	۲	TA333R5M10B2_200
۱/۳۸	۱۲/۴	۲۱/۵۴	۱۰	۳	TA333R5M10B3_200
۱/۵۰	۱۳/۵	۲۱/۳۲	۱۰	۴	TA333R5M10B4_200
۱/۶۱	۱۴/۵	۲۱/۵۷	۱۰	۵	TA333R5M10B5_200
۳/۲۷	۹/۸	۲۱/۵۹	۱۰	۱	TS111R5M10B1_200
۴/۱۷	۱۲/۵	۲۱/۵۹	۱۰	۲	TS111R5M10B2_200
۴/۵۷	۱۳/۷	۲۱/۴۰	۱۰	۳	TS111R5M10B3_200
۴/۹۳	۱۴/۸	۲۱/۶۲	۱۰	۴	TS111R5M10B4_200
۵/۲۷	۱۵/۸	۲۱/۶۶	۱۰	۵	TS111R5M10B5_200
۱/۸۴	۹/۲	۲۱/۴۹	۱۰	۱	TMSAS131R5M10B1_200
۲/۳۸	۱۱/۹	۲۱/۴۶	۱۰	۲	TMSAS131R5M10B2_200
۲/۸۲	۱۴/۱	۲۱/۶۸	۱۰	۳	TMSAS131R5M10B3_200
۳/۱	۱۵/۵	۲۱/۶۱	۱۰	۴	TMSAS131R5M10B4_200
۳/۲۶	۱۶/۳	۲۱/۶۶	۱۰	۵	TMSAS131R5M10B5_200
۱/۲۷	۸/۹	۲۱/۳۸	۱۰	۱	TMASA313R5M10B1_200
۱/۶۹	۱۱/۸	۲۱/۷۰	۱۰	۲	TMASA313R5M10B2_200
۱/۹۹	۱۳/۹	۲۱/۵۰	۱۰	۳	TMASA313R5M10B3_200
۲/۱۶	۱۵/۱	۲۱/۴۴	۱۰	۴	TMASA313R5M10B4_200
۲/۲۹	۱۶/۰	۲۱/۳۲	۱۰	۵	TMASA313R5M10B5_200
۱/۱۳	۷/۹	۲۱/۵۴	۱۰	۱	TMAAS331R5M10B1_200
۱/۴۶	۱۰/۲	۲۱/۳۵	۱۰	۲	TMAAS331R5M10B2_200
۱/۶۶	۱۱/۶	۲۱/۷۰	۱۰	۳	TMAAS331R5M10B3_200
۱/۷۹	۱۲/۵	۲۱/۵۴	۱۰	۴	TMAAS331R5M10B4_200
۱/۹۱	۱۳/۴	۲۱/۵۲	۱۰	۵	TMAAS331R5M10B5_200



شکل (الف): مکانیسم تغییر شکل پلاستیک ساختارهای آزمایشی در بارگذاری سوم [۵]



شکل (ب): مکانیسم تغییر شکل پلاستیک ساختارهای آزمایشی در بارگذاری چهارم [۵]



شکل (پ): مکانیسم تغییر شکل پلاستیک ساختارهای آزمایشی در بارگذاری پنجم [۵]



## Plastic Deformation of Similar and Dissimilar Multi-layered Metallic Plates with the Same Areal Density Subjected to Repeated Impulsive Loading

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

<sup>1</sup> Researcher, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

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

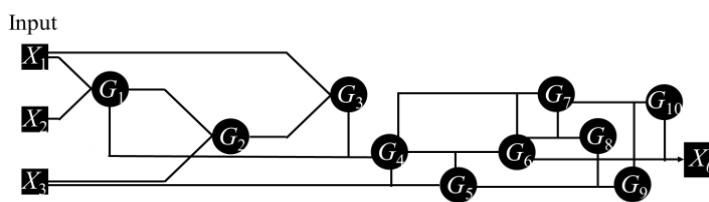
<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

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

### HIGHLIGHTS

- Placing a thick front layer and a thin back layer gives better blast performance to the tested specimen against repeated impulsive loading.
- For multi-layered configurations with the same material is completely consistent with those structures made of dissimilar layers.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 17 August 2021

Received in revised form: 10 October 2021

Accepted: 16 October 2021

Available online: 10 January 2021

\*Correspondence:

ghbabaei@guilan.ac.ir

How to cite this article:

M. Ziya-Shamami, H. Babaei, T.M. Mostofi, H. Khodarahmi. Plastic deformation of similar and dissimilar multi-layered metallic plates with the same areal density subjected to repeated impulsive loading. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(1):137-159.

Keywords:

Repeated loading

Impulsive loading

Multi-layered mixed configuration

Circular plate

Maximum displacement

### ABSTRACT

In the current research study, the large plastic deformations of similar and dissimilar single- and multi-layered metallic plates with the same areal density under repeated uniform impulsive loading have been investigated. The ballistic pendulum along a 200 mm length standoff blast tube was used to apply the blast load on the specimen. Forty testing specimens in three different layering configurations including single-, double, and triple-layered, and eight different arrangements were considered. For the same loading and experimental condition, 10 g plastic explosive was utilized and the dynamic response of structures was studied for up to five consecutive loads. The experimental results indicated large plastic global deformation with thinning happening at the clamped boundary and also tearing for some experiments. The results also represented that the maximum permanent deflections of plates were increased by the number of blast loads and the progressive deflection of the plates at the center decreased exponentially with increasing the number of blasts. Placing a thick front layer and a thin back layer gives better blast performance to the tested specimen against repeated impulsive loading. The obtained result for multi-layered configurations with the same material is completely consistent with those structures made of dissimilar layers.



