

بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های مستطیلی تقویت‌شده با خط جوش: بررسی تجربی و

مدل‌سازی با شبکه عصبی GMDH

منصور به تاج^۱، هاشم بابایی^{۲*}، توحید میرزابابایی مستوفی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

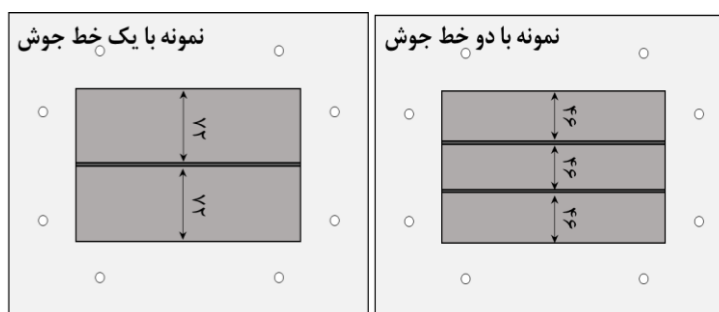
^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

برجسته‌ها

- آزمایش‌ها روی سه ساختار مختلف تقویت نشده، تقویت‌شده با یک و دو خط جوش انجام شده است.
- بار دینامیکی در محدوده‌ای گسترده با استفاده از جرم‌های ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم تا ۳ مرتبه اعمال شد.
- از شبکه عصبی برای ارائه یک مدل ریاضی استفاده شد.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

*نویسنده مسئول:

ghbabaei@guilan.ac.ir

کلید واژه‌ها:

بارگذاری انفجاری

بارگذاری مکرر

ورق تقویت‌شده

خط جوش

مدل‌سازی

چکیده

در این پژوهش، به بررسی تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق‌های مستطیلی فولادی تحت بارگذاری انفجاری مکرر پرداخته شده است. در این راستا، آزمایش‌ها روی سه ساختار مختلف تقویت نشده، تقویت‌شده با یک و دو خط جوش انجام شده است. جهت بررسی مودهای تغییر شکل و مکانیسم شکست نمونه‌های آزمایشی، بار دینامیکی در محدوده‌ای گسترده با استفاده از جرم‌های ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم تا ۳ مرتبه اعمال شد. مشاهدات تجربی بیان می‌کند که با افزایش جرم خرج، مودهای تغییر شکل اول (a) و اول (b) در جرم خرج بالاتر و در تکرار بارگذاری در شماره بالاتر مشاهده می‌شود. در ورق تقویت نشده در بارگذاری سوم با جرم خرج ۲۵ گرم، حالت اول (a) شکست مشاهده می‌شود؛ اما این مود شکست در نمونه تقویت‌شده با یک و دو خط جوش به ترتیب در تکرار سوم در جرم خرج ۳۵ گرم و ۴۵ گرم مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر خط جوش بر تغییرات مود شکست است. علاوه بر این، در بخش مدل‌سازی عددی، از شبکه عصبی برای ارائه یک مدل ریاضی بر مبنای اعداد بی‌بعد جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی نمونه‌های آزمایشی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که توافق خوبی بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی برقرار است به‌طوری‌که هر دو ساختار در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار گرفتند.

۱- مقدمه

شبیه‌سازی‌ها قبلاً با نتایج تجربی صحنه‌گذاری شده است. با توجه به زمان‌بر بودن نحوه مدل‌سازی بالا، استفاده از روش کانوپ با لحاظ کردن شرایطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۹]. معمولاً روش کانوپ تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. در واقع در این روش جرم ماده منفجره با معادل جرم تی ان تی معادل می‌گردد و از اثرات انعکاس موج انفجاری روی سازه صرف نظر می‌گردد [۱۹]. یون و همکاران [۲۰] به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت بر روی ورق فولادی چهارگوش مربعی و ساختارهای تقویت‌شده با یک خط جوش، دو خط جوش موازی و دو خط جوش عمودی پرداختند. ورق مربعی مورد مطالعه آن‌ها از جنس فولاد با ضخامت ۱۲ میلی‌متر بوده که در معرض بارگذاری انفجاری با توزیع یکنواخت قرار گرفت. ادامه این پژوهش توسط لانگدن و همکاران [۲۱] ادامه پیدا کرد. در این پژوهش ورق‌ها ماشین‌کاری شده و بخش‌هایی به صورت تسمه بر روی ورق باقی مانده بودند و از این روش برای تقویت ورق استفاده کرده بودند. به‌طور کلی، تغییر شکل پلاستیک ورق‌ها به صورت نازک‌شدگی در قسمت‌های گیردار و گاهی هم به صورت 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 ۲۰۱۵، لانگدن و همکارانش [۲۲] به بررسی تجربی تأثیر خواص ماده بر پاسخ دینامیکی ورق تحت بار انفجاری در هوا پرداختند. با انفجار خرج‌های پلاستیکی دیسکی در فاصله کوتاه، تغییر شکل و شکست ورق‌های فولادی نرم، فولادی تقویت‌شده، آلیاژ آلومینیوم، کامپوزیتی با رشته‌های تقویت‌شده پلیمری به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای هر ماده، خیز دائمی مرکز ورق با افزایش ایمپالس به صورت خطی تغییر می‌کند تا پارگی رخ دهد. در خرج با جرم‌های بیشتر، ورق‌های فولادی نرم رفتار کششی شکل‌پذیرتری نشان می‌دهند، این در حالی است که در ایمپالس یکسان، ورق‌های فولادی تقویت‌شده رفتار

بررسی و مطالعه اثر بار انفجاری روی ورق‌های تقویت‌شده مورد توجه تعداد زیادی از پژوهشگران بوده است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که بیشتر این مطالعات به بررسی رفتار دینامیکی ساختارها تحت بار انفجاری پرداخته و هدف جذب انرژی هر چه بیشتر این ساختارها در مقابل بار انفجاری اعمال شده می‌باشد. البته زمانی نیز یک ورق در برابر چند بارگذاری انفجاری در زمان‌های مختلف قرار می‌گیرد که با توجه به تغییرات به وجود آمده در ساختار ورق در بارگذاری انفجاری اول، بررسی رفتار آن سازه را در برابر بارگذاری‌های انفجاری بعدی پیچیده‌تر می‌شود؛ بنابراین مطالعه یک ورق در مقابل بارگذاری انفجاری مکرر به منظور پیش‌بینی تخریب سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و احساس نیاز به تحقیق در این حوزه به علت بالا بردن مقاومت انفجاری سازه‌ها در برابر بار انفجاری مکرر، به‌خصوص در زمان حملات تروریستی و هوایی در صنایع نظامی، هدف کلی تحقیقات در سال‌های اخیر، مطالعه پاسخ دینامیکی ساختارها تحت بارگذاری انفجاری چندمرحله‌ای یا مکرر است. البته بررسی منابع در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی روی مکرر بودن این نوع بارگذاری انجام شده است.

تحقیقات تجربی و تحلیلی توسط پژوهشگران در زمینه بررسی بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی روی سازه‌های چهارگوش در منابع [۱-۳] و سازه‌های دایره‌ای در منابع [۴-۵]، انجام شده است. جونز [۶]، نوریک [۷]، ژائو [۸] و راجندران [۹] به بررسی تحلیلی و تجربی اثر بار انفجاری بر روی ورق پرداختند. مطالعات بیشتر [۱۰-۱۴] به بررسی اثر شرایط مرزی ورق، سطح مواجهه ورق (دایروی، مستطیلی و مربعی) و نوع بارگذاری‌های مختلف انفجاری با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود و آزمایش انجام شده است و مدل‌های تحلیلی نیز ارائه شده است. پژوهشگران دیگری [۱۵-۱۸] با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و آباکوس به مدل‌سازی بار انفجاری روی سازه پرداخته و پروفیل فشار بار انفجاری نسبت به زمان و مکان ارائه شده است. البته این

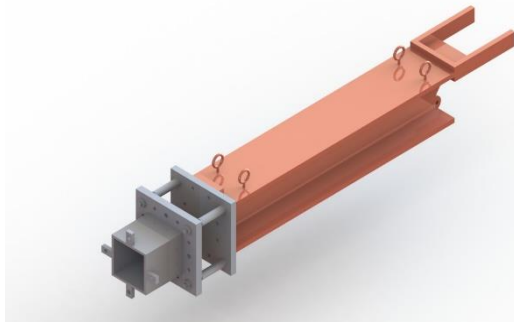
در ناحیه تحت تأثیر گرما صورت می‌گیرد و بر حالت شکست ورق‌های آلومینیومی تأثیر دارد. همچنین در کاری که توسط یینگ لی و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۱ صورت گرفت، پاسخ دینامیکی صفحات تقویت‌شده تحت بارگذاری انفجار داخلی بررسی شد. یک تحقیق تجربی و عددی ترکیبی بر روی ساختارهای کابین شکل با صفحات تقویت نشده، تقویت‌شده با یک خط جوش و تقویت‌شده با دو خط جوش انجام شد. ویژگی‌های موج انفجار داخلی، اثرات فاصله استقرار خرج و موقعیت تقویت‌کننده در حالت‌های تغییر شکل و شکست ورق‌های آزمایشی موردبررسی قرار گرفت. جالب‌توجه بود که تغییر شکل ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش فاصله استقرار خرج افزایش می‌یابد.

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 بوده [۲۴-۲۷] و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های فولادی تقویت‌شده با خط جوش تحت بار ایمپالس مکرر با توزیع یکنواخت انجام نشده است؛ بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای مستطیلی فولادی تقویت‌شده به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند میزان خرج انفجاری، ترکیب چینش خط جوش، اثر تکرار بارگذاری انفجاری و بررسی اثرگذاری آن‌ها روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. همچنین یادآور می‌شود که با توجه به پیشینه پژوهش ارائه‌شده تاکنون مدلی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ورق‌های فولادی چهارگوش با خط جوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر ارائه نشده است؛ لذا در بخش مدل‌سازی، این مطلب می‌تواند جزو نوآوری‌های پژوهش حاضر محسوب شود. در این تحقیق، با بی‌بعدسازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق، اعداد بی‌بعد برای تحلیل ابعادی فرآیند شکل‌دهی ورق‌های چهارگوش تحت بار دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی پیشنهاد می‌شود. استخراج مستقیم اعداد پیشنهادی از معادلات تعادل دینامیکی نشان‌دهنده آن است که این اعداد کاملاً معنای فیزیکی دارند. از مزیت‌های اصلی این روش می‌توان به

ترددتری دارند. همچنین ورق‌های آلومینیوم نشانه‌هایی از ذوب و پاشش شعاعی به سمت خارج به نمایش گذاشته که به علت از دست دادن مواد در مرکز ورق و به دنبال آن پارگی در ایمپالس بالاتر است. لازم به توضیح است که نسبت به سایر مواد هم جرم، کامپوزیت‌های مورد استفاده در ایمپالس پایین‌تری دچار شکستگی فیبر می‌شوند. در ادامه بوراک [۲۳] در سال ۲۰۱۷ از ورق‌های آلومینیومی استفاده کرد که با استفاده از جوش اتصال انجام شده بود. این خطوط در مکان‌های مختلفی جوش داده‌شده بودند که به همین دلیل مناطق تحت تأثیر حرارت نیز موردبررسی قرار گرفته بودند. ورق‌های استفاده‌شده در این پژوهش آلومینیوم سری ۵۰۰۰ بوده است. در پژوهش منتشرشده توسط ژو و جونز [۲۴]، به بررسی عددی پاسخ دینامیکی ساختارهای تقویت‌شده تحت بار ضربه‌ای غیریکنواخت و مکرر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. در این پژوهش، هندسه ورق به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته‌شده و به‌منظور کاهش حجم محاسبات و با استفاده از تقارن از مدل یک‌چهارم استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، ورق‌های فلزی با ضخامت‌های مختلف به‌صورت تغییر شکل‌پذیر مدل شده و مش موردنظر ساختار نیز از نوع المان خطی چهاروجهی جامد انتخاب شده است.

مقاله‌ای که توسط لیو و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۰ ارائه شد، رفتار پلاستیک و مکانیسم شکست ورق آلومینیومی چهارگوش تقویت‌شده تحت برخورد یک ضربه زنده صلب با دماغه نیمکره به‌صورت تجربی و عددی بررسی شد. این سری از آزمایش‌ها چهار نمونه مختلف در نظر گرفته شد؛ ورق تقویت نشده، ورق تقویت‌شده با جوش در سرتاسر مرز گیردار، ورق تقویت‌شده با یک خط مرکزی و ورق تقویت‌شده با دو خط جوش مرکزی. همچنین در پژوهش منتشرشده توسط شانگشو [۲۶]، آزمایش‌ها و شبیه‌سازی المان محدود ورق‌های جوش داده‌شده با آلیاژ آلومینیوم تحت بارگذاری انفجاری آزاد برای بررسی پاسخ دینامیکی تغییر شکل و شکست پلاستیک ارائه شد. این پژوهش رفتار ضربه‌ای ورق‌های آلومینیومی جوش داده‌شده را در مقایسه با صفحات فولادی نشان داد. نتایج نشان داد که تخریب ماده

است. همچنین، رزوه‌هایی جهت نصب رابط‌های استقرار خرج در صفحه جلویی نگه‌دارنده نمونه آزمایشی در نظر گرفته شده است. در سامانه نیز از وزنه‌هایی جهت برقراری تعادل در زمان استفاده از لوله‌های بلند استقرار خرج بهره گرفته می‌شود. این بدین دلیل است که در این وضعیت؛ یعنی استفاده از رابط‌های استقرار، آونگ را از حالت تعادل خارج می‌کند. در این پژوهش، از یک رابط استقرار خرج انفجاری به ابعاد داخلی 150×25 میلی‌متر مربع و طول 200 میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه است، استفاده شده است. شایان توجه است که با توجه به پیشینه [۱-۵]، در صورتی که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از نصف عرض ورق باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد.



شکل (۱): شماتیک سامانه آونگ بالستیک

۲-۲- نحوه بارگذاری و نمونه‌های آزمایشگاهی

مطابق با شماتیک دوبعدی ارائه‌شده در شکل ۲، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت 35 میلی‌متر قرار داده می‌شود. در تحقیق حاضر ماده منفجره بکار گرفته شده برای انجام آزمایش‌های تجربی PE4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتالی با دقت 0.01 گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری شکل بودن آن با دست به صورت دیسکی به قطر 30 میلی‌متر درآورده شده و روی صفحه پلی‌استری پهن شده است. در طی این آزمایش‌ها، اثر پد پلی‌استری بر انتشار موج شوک نادیده گرفته شد. در بخش دوم، برای تحریک ماده منفجره از چاشنی نمره 8 نانل به جرم 1 گرم و به همراه دستگاه تحریک نانل استفاده می‌

سازمان‌دهی کارهای تجربی، پیش‌گیری از آزمایش‌های تکراری، بررسی و شناخت اثر هر یک از متغیرهای وابسته به فرآیند و همچنین تحلیل و تجزیه داده‌های آزمایشگاهی اشاره کرد.

۲- کار تجربی

۲-۱- سامانه آزمایشگاهی

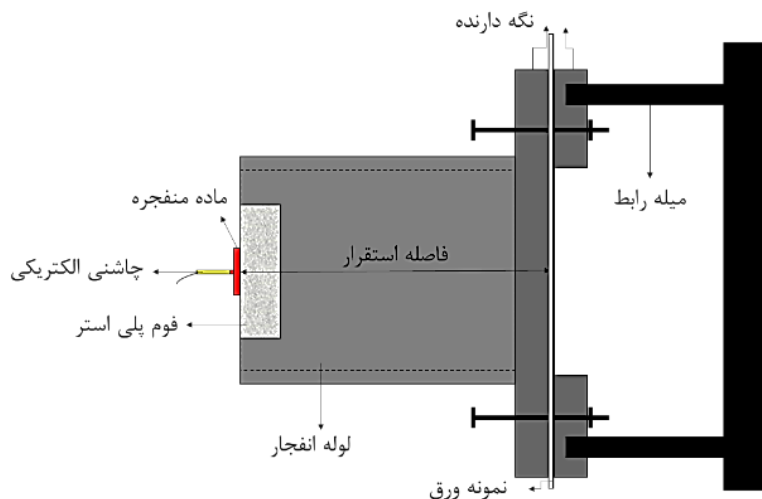
در مطالعات تجربی فرآیند شکل‌دهی تحت بار ایمپالسیو، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارها و همچنین مقاومت انفجاری آن‌ها تحت آزمایش نسبت به بار ایمپالسیو اعمالی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ از این رو در این پژوهش، هدف از مطالعات آزمایشگاهی آن است تا بتوان رفتار دینامیکی ساختارهای تقویت‌شده فولادی با خط جوش 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 آونگ بالستیک برای مطالعه تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ورق‌های چهارگوش فولادی تحت بارگذاری ایمپالسیو یکنواخت مکرر استفاده شده است (مطابق با شکل ۱). سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به صورت افقی و تراز آویزان است و دامنه حرکت رفت و برگشت آونگ توسط قلم روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده شده است، ثبت می‌گردد. مطابق با شماتیک سامانه، در انتهای سمت چپ، روی صفحه مربعی فولادی با ضخامت 25 میلی‌متر، چهار میله فولادی به شعاع $7/5$ میلی‌متر نصب شده که به صورت نر و ماده به نگه‌دارنده نمونه آزمایشی متصل می‌شود. نگه‌دارنده نمونه آزمایشی از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت 25 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

الگو برای تست‌ها آماده‌سازی شدند. این سه الگو عبارت‌اند از: ورق فولادی تقویت نشده (بدون خط جوش)، ورق فولادی تقویت‌شده با یک خط جوش و ورق فولادی تقویت شده با دو خط جوش. تمام صفحات از جنس فولاد به ابعاد 400×300 میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر بودند. شایان توجه است که از الکتروود فولادی با قطر ۳ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها با استفاده از قوس‌های جوشکاری خودکار TIG و به دنبال روش‌های استاندارد ساخت و جوشکاری ساخته شدند.

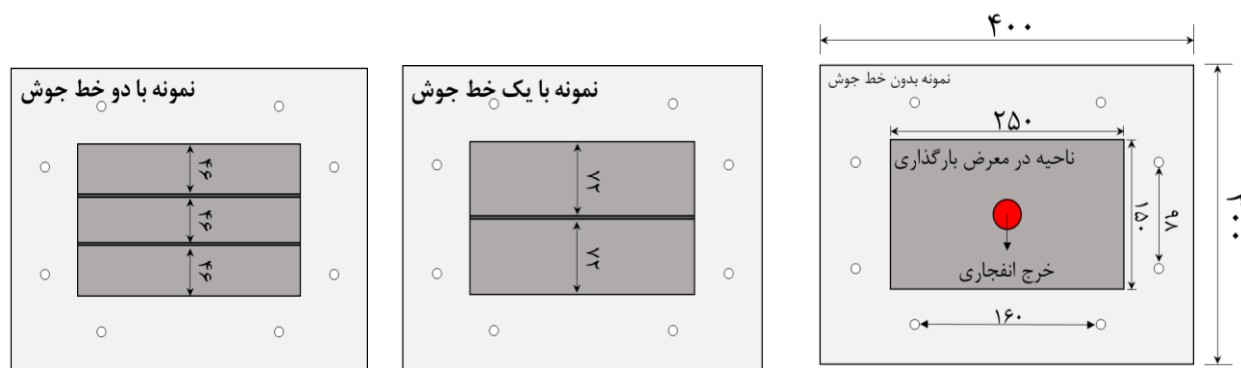
۲-۳- نتایج مطالعه آزمایشگاهی

در جدول الف پیوست، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای فولادی تقویت نشده و تقویت شده با خط جوش تحت بار ایمپالسیو یکنواخت مکرر تا ۳ دفعه ارائه شده است.

شود. ورق‌های چهارگوش با سطح مواجهه مستطیلی 250×150 میلی‌متر مربع بین دو صفحه فولادی ضخیم با ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده شده و با ۸ عدد پیچ ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. در این سری آزمایش‌ها، جرم خرج دارای چهار مقدار ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم در فاصله ثابت ۲۰۰ میلی‌متر از نمونه در نظر گرفته شد. برای به دست آوردن بارگذاری انفجاری مکرر در آزمایش‌ها، هر نمونه مجدداً روی سامانه آزمایشی بسته شد و تحت شرایط بارگذاری قبلی تحت انفجارهای بعدی قرار گرفت. این روند برای تعداد موردنیاز انفجار بسته به مود تغییر شکل و مکانیسم شکست نمونه آزمایشی تا سه بار تکرار شد. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌های انفجاری، توسط کولیس ارتفاع‌سنج در نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است. همچنین، مطابق با شکل ۳، ورق‌ها در سه



شکل (۲): شماتیک دوبعدی نحوه قرارگیری نمونه آزمایشی، نگه‌دارنده و خرج انفجاری



شکل (۳): شماتیک دوبعدی نمونه‌های آزمایشی مختلف با سه الگو

۲-۳- نتایج مطالعه آزمایشگاهی

در جدول الف پیوست، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای فولادی تقویت نشده و تقویت شده با خط جوش تحت بار ایمپالسیو یکنواخت مکرر تا ۳ دفعه ارائه شده است. در این جدول، مقادیر جرم خرج انفجاری m ، شماره هر انفجار n_B ، ایمپالس ناشی از بارگذاری ایمپالسیو I ، بیشترین خیز دائمی نمونه و همچنین مود تغییر شکل ورق ارائه شده است. نتایج به دست آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی تقویت شده و نشده تحت بار ایمپالسیو یکنواخت مکرر است که در آن اثر تغییر شدت بار اعمالی، چینش جوش و تعداد بارگذاری بررسی شده است.

لازم به توضیح است که در سال ۱۹۷۳، منکس و اپات برای نخستین بار در بررسی تجربی خود روی رفتار سازه تحت بارهای ایمپالسیو، سه حالت شکست مجزای زیر را مشاهده نمودند: حالت اول شکست: (۱) تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ؛ (۲) حالت دوم شکست: پارگی کششی در لبه‌ها؛ (۳) حالت سوم شکست: گسیختگی برشی در لبه‌ها. در سال ۱۹۹۰، نوریک و همکارانش برای تشریح گلویی شدن جزئی و کامل در پیرامون مرز ورق، حالت اول شکست را به دو دسته مجزا تقسیم کردند: (۱) حالت اول (a) شکست: تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ همراه با گلویی شدن جزئی در پیرامون مرز ورق؛ (۲) حالت اول (b) شکست: تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ همراه با گلویی شدن کامل در پیرامون مرز ورق. حد پایین از حالت اول (a) شکست، جایی است که ناحیه‌ای از پیرامون گیردار ورق دچار گلویی شدن می‌شود. همان‌طور که بار افزایش می‌یابد، گلویی شدن مرز توسعه پیدا کرده تا تمام مرز ورق را در برگیرد (حد بالای حالت اول شکست) و به‌عنوان حالت اول (b) شکست شناخته می‌شود. افزایش بیشتر بار باعث انتقال شکست از حالت اول به دوم می‌شود. هنگامی که پارگی در قسمتی از مرز ورق ظاهر می‌گردد، حد پایین حالت دوم شکست در ورق رخ داده و به عنوان حالت دوم شکست* شناخته می‌شود. با توجه به توضیحات بالا حالت دوم شکست به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

- (۱) حالت دوم (*) شکست: تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ همراه با پارگی جزئی در پیرامون مرز ورق
- (۲) حالت دوم (a) شکست: افزایش بیشترین خیز ورق با افزایش ایمپالس همراه با پارگی کامل در پیرامون مرز
- (۳) حالت دوم (b) شکست: کاهش بیشترین خیز ورق با افزایش ایمپالس همراه با پارگی کامل در پیرامون مرز

۲-۳-۱- تحلیل کیفی نتایج

در این قسمت از پژوهش، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مودهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند افزایش جرم خرج انفجاری، نوع چینش خط جوش‌ها و افزایش تعداد بارگذاری انفجاری بر بیشترین خیز دائمی تقویت شده و تقویت نشده، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشاهدات تجربی با هدف بررسی مودهای تغییر شکل هر سه ساختار (تقویت نشده، تقویت شده با یک خط جوش و تقویت شده با دو خط جوش) تحت بار ایمپالسیو یکنواخت مکرر نشان می‌دهد که در طول ۳۶ آزمایش، تمامی ساختارها به غیر از ۱۴ نمونه سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مود اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): الگوی تغییر شکل و مکانیسم شکست برای نمونه‌های آزمایشی تحت بار انفجاری ۲۵ و ۵۰ گرم

تغییر شکل پلاستیک بزرگ همراه با گلویی شدن در بخشی از پیرامون گیردار نمونه و به عبارتی حالت اول (a) در این نمونه رخ می‌دهد؛ اما اضافه نمودن خط جوش به ورق فلزی باعث تغییر مود تغییر شکل به مود تغییر شکل غیرالاستیک گردید. شایان ذکر است که این نازک‌شدگی با افزایش جرم خرج در نمونه‌های تقویت‌شده نیز مشاهده می‌شود. مطابق با شکل ۴ که برای ساختارهای مختلف تحت بارگذاری یکسان ۵۰ گرم در انفجار اول و دوم به تصویر کشیده شده است، در نمونه تقویت نشده ورق در تکرار دوم، حالت دوم شکست مشاهده می‌شود و ورق دچار پارگی شده است؛ اما برای نمونه‌های تقویت‌شده با یک و یا دو خط جوش اندکی نازک‌شدگی در لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مود از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام شده توسط یوان و نوریک [۲۰] است.

شایان توجه است که اثر اضافه نمودن خط جوش به سازه کاملاً در این سری از آزمایش مشهود است؛ زیرا نمونه‌های MB23 با یک خط جوش و MB35 با دو خط جوش تحمل بارگذاری دوم را دارد؛ اما ورق تقویت نشده MB12 در بارگذاری دوم دچار پارگی کامل می‌شود. با توجه به جدول الف پیوست و نتایج مود تغییر شکل، با افزایش جرم خرج، مودهای تغییر شکل اول (a) و اول (b) در جرم خرج‌های بالاتر و در تکرار بارگذاری در شماره‌های بالاتر مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در ورق تقویت نشده در بارگذاری سوم با جرم خرج ۲۵ گرم، تغییر مود شکست (حالت اول (a) شکست) مشاهده می‌شود؛ اما در نمونه تقویت‌شده با یک خط در تکرار سوم در جرم خرج ۳۵ گرم همان مود تغییر شکل اتفاق می‌افتد. در نمونه تقویت‌شده با دو خط جوش نیز همان مود شکست در تکرار سوم ۴۵ گرم مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر خط جوش و تعداد آن‌ها بر تغییرات مود شکست است.

نتیجه به‌دست‌آمده یکی از اهداف اصلی مقاله حاضر بوده که نشان می‌دهد بهره‌گیری از خط جوش و چینش آن چگونه روی مود تغییر شکل و مکانیسم شکست ورق فولادی اثر می‌گذارد.

در این مجموعه آزمایش‌ها، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تقویت نشده، تقویت‌شده با یک خط جوش و تقویت‌شده با دو خط جوش به‌صورت محدب (مود اول تغییر شکل [۲۸]) بوده و این بیانگر آن است که بار ایمپالسیو تولیدشده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود. به‌طور کلی شکل ۴ نشان می‌دهد: (۱) ناحیه محدب شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند؛ (۲) سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار کمی تغییر شکل غیرالاستیک شده که این ناشی از شرایط مرزی و محل قرارگیری پیچ‌ها است؛ (۳) نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار مشهود است و این نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است؛ (۴) لولاهای پلاستیک در امتداد خط‌های قطری کشیده شده روی نمونه از گوشه‌های ساختار تا مرکز آن گسترش می‌یابد. مطابق با شکل ۴ که برای ساختارهای مختلف تحت بارگذاری یکسان ۲۵ گرم در انفجار دوم و سوم به تصویر کشیده شده است، با افزودن خط جوش به نمونه، بیشترین خیز ورق پس از انفجار دوم و سوم برای نمونه‌های تقویت نشده MB2، تقویت‌شده با یک خط جوش MB15 و تقویت‌شده با دو خط جوش MB27 به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد؛ لذا در انفجارهای مکرر نیز خط جوش‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده عمل می‌کنند و باعث کاهش خیز ورق می‌شوند. این در صورتی است که در ورق تقویت نشده افزایش تعداد بارگذاری منجر به نازک‌شدگی خطوط مرزی با نگه‌دارنده‌ها می‌شود و حالت اول شکست در نمونه‌ها پدیدار می‌شود که این میزان نازک‌شدگی با افزایش جرم خرج افزایش یافته و حالت‌های دیگر شکست نیز در نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در نهایت منجر به پارگی کامل ورق در نمونه MB12 و مشاهده شدن حالت دوم شکست در این نمونه می‌شود.

شایان توجه است که در آزمایش‌های انجام شده برای جرم خرج ۲۵ گرم، اضافه شدن خط جوش‌ها به ورق از میزان نازک‌شدگی به میزان قابل‌توجهی در انفجارهای بعدی می‌کاهد. مشاهده دقیق‌تر تصویر ارائه‌شده برای بارگذاری سوم نشان می‌دهد که ساختار تقویت نشده MB3 دچار

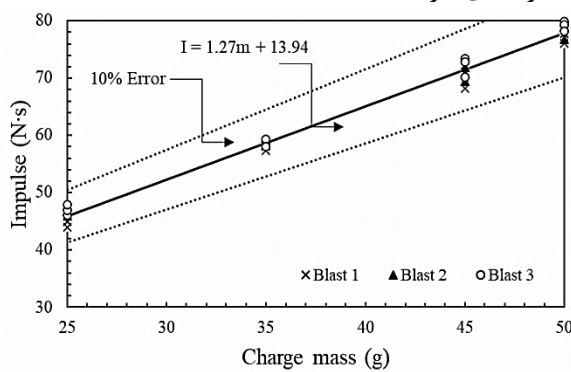
۲-۳-۲- تحلیل کمی و آماری نتایج

پس از تحلیل و بررسی نتایج تجربی به‌دست‌آمده در جدول الف پیوست، یکی از اساسی‌ترین پارامترهای مربوط به بارگذاری انفجاری، داشتن برآوردی از مقدار ایمپالس بار وارده برحسب جرم خرج بدون اندازه‌گیری آن است. این بدان جهت است که استفاده از سامانه آونگ بالستیک در کارهای تجربی بسیار دشوار بوده و تخمین میزان ایمپالس از مقدار جرم خرج برای حذف به‌کارگیری این سامانه در مطالعات آزمایشگاهی ستودنی است؛ بنابراین، برای این هدف ایمپالس‌های اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش برحسب جرم خرج برای هر سه ساختار ورق تقویت نشده، تقویت‌شده با یک خط و تقویت‌شده دو خط جوش به ترتیب در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های تجربی تطبیق خوبی با رابطه خطی برازش شده برای هر سه ساختار دارند و این رابطه را می‌توان در ادامه کارهای تجربی در این محدوده استفاده کرد. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام شده ایمپالس ناشی از انفجار یک گرم نائل به علت محاسبه میزان ایمپالس در حالت کلی، در مقدار ایمپالس لحاظ شده است.

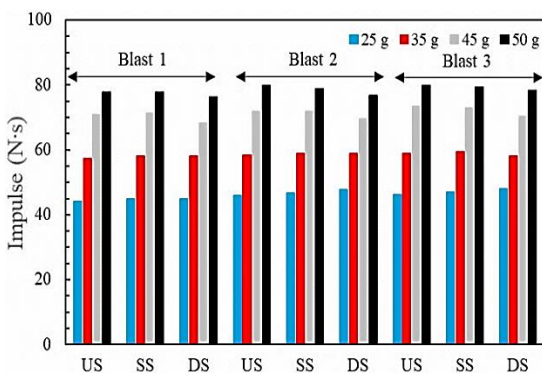
همان‌طور که در بخش تحلیل مودهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی نشان داده شد، ورق‌های فولادی هنگام قرار گرفتن در معرض بار انفجاری یکنواخت مکرر، دچار تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ شدند و پروفیل تغییر شکل آن‌ها به‌صورت گنبدی شکل بود. در شکل ۶، مقدار ایمپالس برحسب دفعات بارگذاری برای هر سه ساختار ورق تقویت نشده (US)، تقویت‌شده با یک خط (SS) و تقویت‌شده دو خط جوش (DS) نمایش داده شده است. بازه تغییرات جرم خرج از ۲۵ تا ۵۰ گرم نشان می‌دهد که تغییرات بسیار کمی در ایمپالس منتقل‌شده به نمونه آزمایشی برای هر تکرار انفجار در این سری از آزمایش‌ها وجود دارد و مشخص است که خطوط برازش شده روندی با گرادیان تقریباً صفر در بین انفجارهای اول تا سوم در جرم خرج‌های مختلف دارد. نتایج همچنین بیانگر تکرارپذیری بسیار خوب برای ایمپالس و جرم خرج انفجاری است. لازم به‌ذکر است که ناحیه ورق

تحت بار انفجاری در طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

در ادامه، اثر افزایش جرم خرج بر بیشترین خیز دائمی هر سه ساختار تقویت نشده، تقویت‌شده با یک خط جوش و تقویت‌شده با دو خط جوش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور در شکل ۷ نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق برحسب جرم خرج و ایمپالس برای هر سه ساختار ترسیم شده است. در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی تقویت‌شده و نشده با بالا رفتن میزان خرج انفجاری و به‌تبع آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که مطابق با نمودارها، جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به‌صورت تک‌مرحله‌ای دارند.



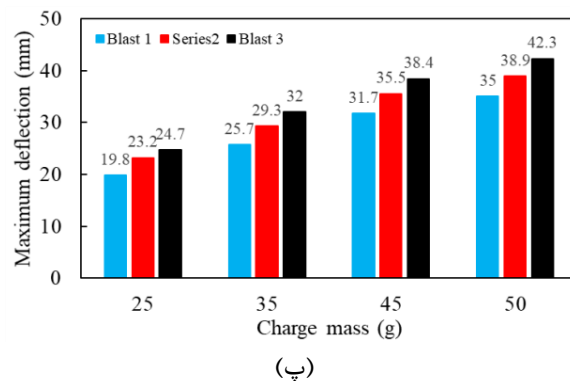
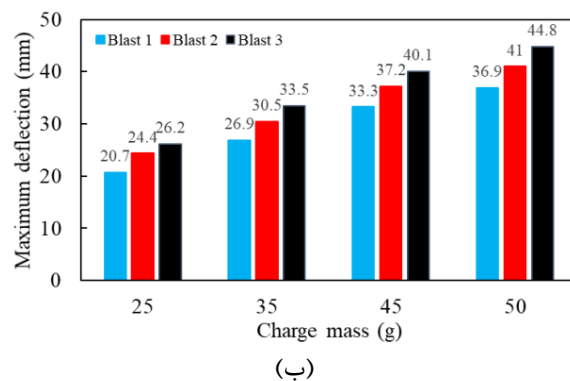
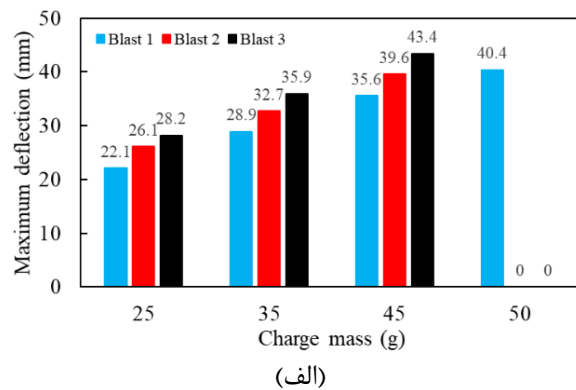
شکل (۵): رابطه بین ایمپالس و جرم خرج برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت



شکل (۶): رابطه بین جرم خرج و تعداد دفعات بارگذاری برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت

که این ورق قابلیت تحمل بارگذاری سوم برای جرم خرج ۵۰ گرم بیشتر را ندارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های تقویت شده با یک خط جوش نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۳۰٪، ۶۱٪ و ۷۸٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم در مقایسه با جرم خرج ۲۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای انفجار دوم به ترتیب ۲۵٪، ۵۲٪ و ۶۸٪ و برای انفجار سوم ۲۸٪، ۵۳٪ و ۷۱٪ است. همچنین، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های تقویت شده با دو خط جوش نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۳۰٪، ۶۰٪ و ۷۷٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم در مقایسه با جرم خرج ۲۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای انفجار دوم به ترتیب ۲۶٪، ۵۵٪ و ۶۸٪ و برای انفجار سوم ۳۰٪، ۵۵٪ و ۷۱٪ است.

همان‌طور که در بخش ۲-۳-۱ دیده شد، افزودن خط جوش به سازه اثر چشمگیری روی تغییر مود تغییر شکل و مکانیسم شکست ورق در مقایسه با نمونه تقویت نشده دارد؛ لذا در این قسمت، نتایج تجربی برای هر جرم خرج به صورت جداگانه تحلیل و بررسی می‌شود تا اثر این مطلب بیشتر مشخص گردد. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول الف پیوست، در حالت کلی مشاهده می‌شود که بیشترین خیز دائمی ورق‌های تقویت نشده نسبتاً بیشتر از ساختارهای تقویت شده است و با اضافه شدن خط جوش بیشترین خیز دائمی در دو ساختار دیگر به طور محسوسی کاهش می‌یابد. به طور دقیق‌تر، نتایج تجربی نشان می‌دهد که برای جرم خرج ۲۵ گرم در انفجار اول، افزودن یک و دو خط جوش به ورق منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۶٪ و ۱۰٪ در مقایسه با نمونه تقویت نشده می‌گردد. این در حالی است که این مقادیر در انفجار دوم به ترتیب ۷٪ و ۱۱٪ و در انفجار سوم ۷٪ و ۱۲٪ است. علاوه بر این، برای جرم خرج ۳۵ گرم در انفجار اول، افزودن یک و دو خط جوش به ورق منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۷٪ و ۱۱٪ در مقایسه با نمونه تقویت نشده می‌گردد. این در حالی است که این مقادیر در انفجار دوم به ترتیب ۷٪ و ۱۰٪ و در انفجار

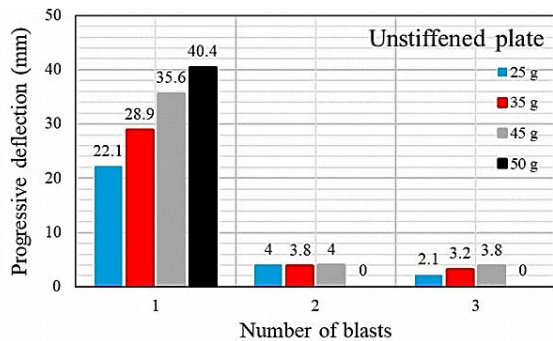


شکل (۷): رابطه بین جرم خرج و بیشترین خیز دائمی برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت؛ الف) ورق تقویت نشده، ب) ورق تقویت شده با یک خط جوش، پ) ورق تقویت شده با دو خط جوش.

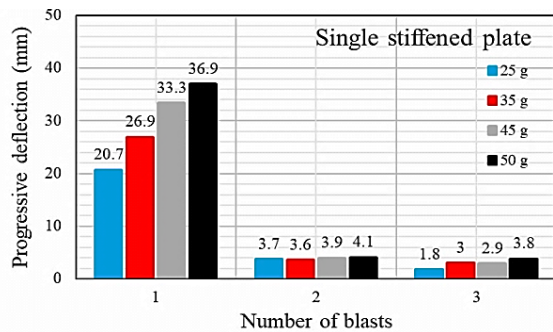
مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های تقویت نشده فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۳۱٪، ۶۱٪ و ۸۳٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم در مقایسه با جرم خرج ۲۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای انفجار دوم به ترتیب ۲۵٪ و ۵۲٪ و برای انفجار سوم ۲۷٪ و ۵۴٪ است. لازم به توضیح است

منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۲٪ و ۵٪ در انفجار دوم و ۲۴٪ و ۲۴٪ در انفجار سوم می‌گردد.

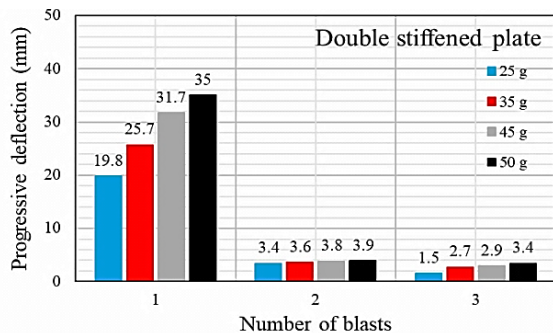
در این بخش، اثر بارگذاری انفجار یکنواخت مکرر بر بیشترین خیز دائمی هر سه ساختار تقویت نشده، تقویت‌شده با یک خط جوش و تقویت‌شده با دو خط جوش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور در شکل ۸ نمودار خیز دائمی تدریجی برحسب تعداد انفجار برای هر سه ساختار در جرم‌های مختلف ترسیم شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸): رابطه بین تعداد بارگذاری با خیز تدریجی دائمی برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت؛ الف) ورق تقویت نشده، ب) ورق تقویت‌شده با یک خط جوش، پ) ورق تقویت‌شده با دو خط جوش.

سوم ۷٪ و ۱۱٪ است. همچنین در جرم خرج بالاتر؛ یعنی، جرم خرج ۴۵ گرم، افزودن یک و دو خط جوش به ورق در انفجار اول منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۶٪ و ۱۱٪ در مقایسه با نمونه تقویت نشده می‌گردد. این در حالی است که این مقادیر در انفجار دوم به ترتیب ۶٪ و ۱۰٪ و در انفجار سوم ۸٪ و ۱۲٪ است. در نهایت در جرم خرج ۵۰ گرم در انفجار اول، افزودن یک و دو خط جوش به ورق منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۹٪ و ۱۳٪ در مقایسه با نمونه تقویت نشده می‌گردد. مقایسه بیشتر نتایج برای حالات بیان شده نشان می‌دهد که افزایش خط جوش در تمامی مراحل بارگذاری موجب بهبود مقاومت سازه در برابر بار انفجاری می‌شود و میزان بیشترین خیز دائمی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقایسه نتایج برای دو مورد تقویت‌شده با یک و دو خط جوش نشان می‌دهد که استفاده از دو خط جوش به جای یک خط جوش منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان تقریباً ۵٪ در تمامی حالت‌های بارگذاری می‌شود.

در ادامه و مطابق با نتایج ارائه‌شده در جدول الف پیوست، تغییرات خیز تدریجی با تعداد بارگذاری برای نمونه تحت بار انفجاری با جرم خرج‌های ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم تحلیل می‌گردد. شایان توجه است که منظور از خیز دائمی تدریجی همان میزان پیشرفت تغییر شکل در هر مرحله یا اختلاف بیشترین خیز دائمی نمونه آزمایشی بین دو بارگذاری متوالی است. در حالت کلی این نتیجه حاصل می‌شود که خیز تدریجی ورق‌های تقویت نشده نسبتاً بیشتر از ساختارهای تقویت‌شده است و با اضافه شدن خط جوش‌ها، خیز تدریجی نیز مشابه با بیشترین خیز دائمی در دو ساختار دیگر به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. به‌طور دقیق‌تر، نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن یک و دو خط جوش به ورق در مقایسه با نمونه تقویت نشده برای جرم خرج ۲۵ گرم منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۸٪ و ۱۵٪ در انفجار دوم و ۱۴٪ و ۲۹٪ در انفجار سوم می‌گردد. علاوه بر این، برای جرم خرج ۳۵ گرم، این موضوع منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۵٪ و ۵٪ در انفجار دوم و ۶٪ و ۱۶٪ در انفجار سوم می‌گردد. همچنین، برای جرم خرج ۴۵ گرم، این موضوع

گرم، ۱۲٪ و ۲۰٪ برای جرم خرج ۴۵ گرم و ۱۱٪ و ۲۱٪ برای جرم خرج ۵۰ گرم در مقایسه با انفجار اول می‌گردد. همچنین ساختار تقویت‌شده با یک خط جوش قابلیت تحمل بارگذاری مکرر را داشته و در انفجار سوم حالت اول (b) شکست؛ یعنی تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ همراه با گلوبی شدن کامل در پیرامون مرز ورق را تجربه می‌کند که نشان‌دهنده جلوگیری از پارگی ورق با افزودن خط جوش به سازه است. همچنین افزایش تعداد بارگذاری منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۸۲٪ و ۵۱٪ برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۸۷٪ و ۱۷٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۸۸٪ و ۲۶٪ برای جرم خرج ۴۵ گرم و ۸۹٪ و ۷٪ برای جرم خرج ۵۰ گرم در مقایسه با مرحله قبلی انفجار می‌گردد. علاوه بر این، برای ساختارهای تقویت‌شده با دو خط جوش، افزایش تعداد بارگذاری منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۱۷٪ و ۲۵٪ در انفجار دوم و سوم برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۱۴٪ و ۲۵٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۱۲٪ و ۲۱٪ برای جرم خرج ۴۵ گرم و ۱۱٪ و ۲۱٪ برای جرم خرج ۵۰ گرم در مقایسه با انفجار اول می‌گردد. همچنین ساختار تقویت‌شده با دو خط جوش نیز قابلیت تحمل بارگذاری مکرر را داشته و در انفجار دوم حالت اول (b) شکست؛ یعنی تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ همراه با گلوبی شدن کامل در پیرامون مرز ورق را تجربه می‌کند که نشان‌دهنده جلوگیری از پارگی ورق با افزودن خط جوش به سازه است. همچنین افزایش تعداد بارگذاری منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۸۳٪ و ۵۶٪ برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۸۶٪ و ۲۵٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۸۸٪ و ۲۴٪ برای جرم خرج ۴۵ گرم و ۸۹٪ و ۱۳٪ برای جرم خرج ۵۰ گرم در مقایسه با مرحله قبلی انفجار می‌گردد.

۳- مدل سازی

۳-۱- 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 عددی، شناسایی سیستم مبتنی بر اطلاعات ورودی و خروجی موردنظر است. حاصل این شناسایی یک تابع

مطابق با شکل، همان‌طور که انتظار می‌رفت، خیز دائمی تدریجی برای تمامی نمونه‌های آزمایشی تقریباً از یک روند نمایی کاهشی پیروی می‌کند، به طوری که بیشترین تغییر در خیز دائمی در بارگذاری اول و کمترین آن در آخرین بارگذاری رخ می‌دهد. این نوع رفتار؛ یعنی روند کاهشی تغییر شکل مرحله‌ای، به دلیل رفتار مواد نمونه مورد آزمایش است که پس از هر چرخه بارگذاری انفجار با کار سختی مواجه می‌شوند. شایان توجه است که بخش دیگری از این کاهش نمایی خیز تدریجی نمونه به تغییر شکل بیشتر ورق در مرحله بعدی بارگذاری و افزایش فاصله انفجار از مرکز ورق و همچنین تغییر هندسه سازه است. برای صفحات تحت بارگذاری انفجاری، نمونه‌ها فشارهای زیادی را تجربه می‌کنند که منجر به سخت شدن مواد و تنش‌های پسماند می‌شود. علاوه بر این، نتایج تجربی روشن می‌کند که تنش‌های پسماند و اثر کار سختی پس از بار انفجار اضافی در افزایش مشابه بیشتر افزایش می‌یابد و تأثیر قابل توجهی بر بیشترین خیز دائمی دارد. مطابق با شکل و نتایج جدول تجربی، این نتیجه حاصل می‌شود که برای ساختارهای تقویت نشده، افزایش تعداد بارگذاری منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۱۸٪ و ۲۸٪ در انفجار دوم و سوم برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۱۳٪ و ۲۴٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۱۱٪ و ۲۲٪ برای جرم خرج ۴۵ گرم در مقایسه با انفجار اول می‌گردد. همچنین ساختار تقویت نشده قابلیت تحمل بارگذاری مکرر در جرم خرج ۵۰ گرم را نداشته و در انفجار دوم حالت دوم (a) شکست؛ یعنی افزایش بیشترین خیز ورق با افزایش ایمپالس همراه با پارگی کامل در پیرامون مرز را تجربه می‌کند. همچنین افزایش تعداد بارگذاری منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۸۲٪ و ۴۸٪ برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۸۷٪ و ۱۶٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم و ۸۹٪ و ۵٪ برای جرم خرج ۴۵ گرم در مقایسه با مرحله قبلی انفجار می‌گردد. این در صورتی است که برای ساختارهای تقویت‌شده با یک خط جوش، افزایش تعداد بارگذاری منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۱۸٪ و ۲۷٪ در انفجار دوم و سوم برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۱۳٪ و ۲۵٪ برای جرم خرج ۳۵

تقریبی ریاضی است. این تابع چندجمله‌ای، رابطه‌ای میان ورودی‌ها و خروجی و مدلی برای سیستم است [۲۹]. به طور کلی مسائل شناسایی سیستم بدین گونه مطرح می‌گردد که فرض می‌شود که رابطه خروجی (y) یک سیستم ناشناخته با m ورودی آن به صورت 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) به دست می‌آید [۲۹].

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

عمل شناسایی سیستم را می‌توان انجام داد که حاصل آن تقریب تابع \hat{f} می‌باشد. که به موجب 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].

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

آنچه به طور معمول به عنوان 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 به صورت تابع خطی و یا غیرخطی از متغیرهای ورودی سیستم باشد [۲۹].

شبکه GMDH، شبکه‌ای خودسازمان‌ده و یک‌سویه است که از چندین لایه و هر لایه نیز از چندین عصب تشکیل شده است. تمامی عصب‌ها از یک ساختار مشابه برخوردار می‌باشند، همگی آن‌ها دارای دو ورودی و یک خروجی‌اند و 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]. در رابطه ۵، $i=1,2,3,\dots,N$ 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 $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{2}$) اند.

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

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 j ام (y_{ij}^*) ملاک و معیاری برای حذف مجموعه‌ای از عصب‌ها در یک لایه است که در رابطه (۶) نشان داده شده است [۲۹].

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

در رابطه بالا $j \in \{1, 2, 3, \dots, C_m^2\}$ است که در آن m تعداد عصب‌های گزینش‌شده در لایه قبلی است.

نگاشتی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط این نوع از شبکه‌های عصبی برقرار می‌شود به صورت تابع غیرخطی ولترا، به فرم رابطه (۷) است [۲۹].

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

+...

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

شبه معکوس ماتریس غیرعادی A، از روش تجزیه مقادیر تکینه (SVD) استفاده می‌شود [۲۹].

۳-۲- ارائه اعداد بی‌بعد برای مسئله حاضر

یکی از مشکلات موجود در مراجع قبلی [۷ و ۸]، 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 انجام شده روی تحلیل ابعادی رفتار پلاستیک-دینامیکی و شکست سازه‌های متفاوت اعم از تیر، ورق و پوسته‌ها تحت بارگذاری دینامیکی [۳۰-۳۴] 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 نشان داده‌شده در شکل ۹ 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

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

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 مطلوب $\{(x_{ip}, x_{iq}), i=1, 2, \dots, N\}$ به همین خاطر تابع f را بر اساس قاعده کمترین مربعات خطا، طبق رابطه (۹) ارائه شده است [۲۹].

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

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.

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

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].

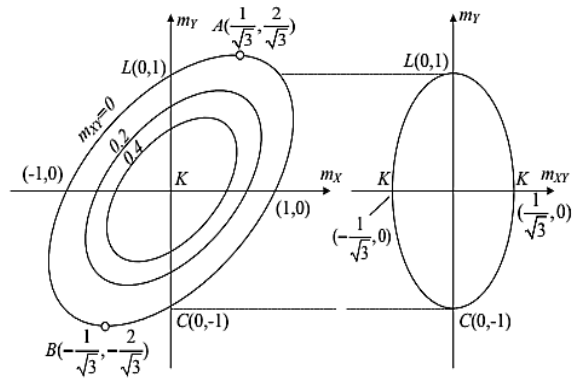
$$a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}^T \quad (12)$$

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

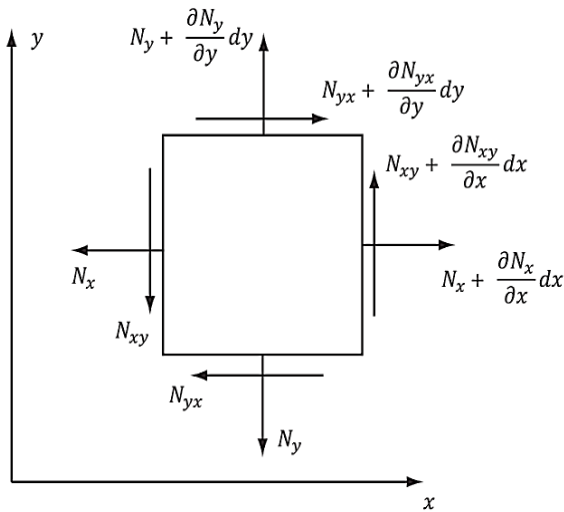
و بردار Y مقادیر خروجی نیز از رابطه (۱۴) به دست آمده است [۲۹].

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

برای حل معادله لازم است که شبه معکوس ماتریس غیرمربعی A محاسبه گردد. به همین خاطر برای محاسبه



(الف)



(ب)

شکل (۱۰): (الف) شماتیک معیار فون-مایز؛ (ب) دیاگرام آزاد نیروهای غشایی در یک المان از ورق

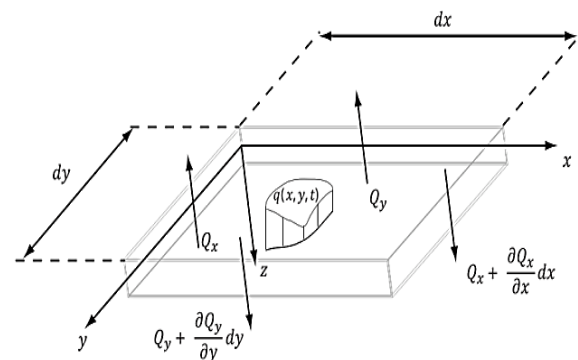
با تعریف پارامترهای بی‌بعد $X = x/L$ ، $Y = y/H$ ، $n_{xy} = N_{xy}/N_0$ ، $n_y = N_y/N_0$ ، $n_x = N_x/N_0$ ، $W = w/H$ و $T = C_s t/H$ معادله حاکم بر ورق مربعی به فرم بی‌بعد تبدیل می‌شود (معادله ۱۶).

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

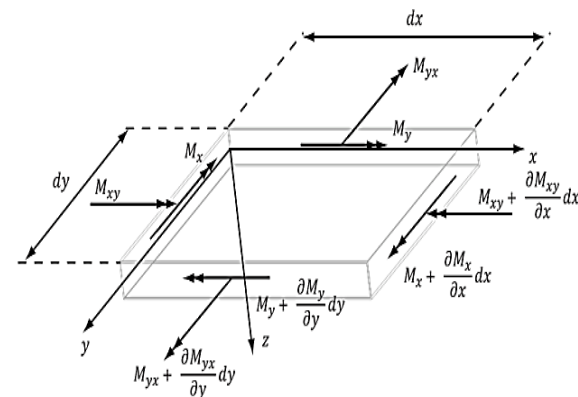
در تعاریف بالا، L نصف طول ورق مربعی، M_0 گشتار خمشی کاملاً پلاستیک، N_0 نیروی غشایی کاملاً پلاستیک، C_s سرعت صوت در محیط، X و Y مختصات بی‌بعد،

فون-مایز 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 به راحتی از رابطه $\sigma_0 H^2/4$ قابل محاسبه است.

در یک ورق مربعی کاملاً گیردار در لبه‌های مرزی، لولا پلاستیکی در دو قطر و چهار مرز گیردار روی محیط ورق شکل می‌گیرد و مقدار نیروی تعمیم‌یافته باید در نقاط L و C در شکل ۱۰ الف، ۱ باشد. 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. مطابق شکل ۱۰ ب، معادله ۱۵ به صورت (۱۶) تغییر می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل (۹): دیاگرام آزاد در یک المان از ورق؛ (الف) نیروهای برشی و (ب) گشتاورهای خمشی

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/σ_d که فشار دینامیکی متناسب است با ρV_0^2 . اکنون با به‌کارگیری معادله ساختاری کوپر-سیموندز و استفاده از تقریب جونز [۳۰ و ۳۱] 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 ξ به صورت معادله ۱۹ تعریف می‌گردد. با جایگذاری معادلات ۱۸ و ۱۹ در معادله ۱۷، تحلیل ابعادی برای معادله بی‌بعد حاکم بر ورق منجر می‌شود به رابطه (۲۰):

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

$$\xi = \left(\frac{I}{12\sqrt{2}\rho L^2 B^2 D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (19)$$

$$\frac{W_0}{H} = f \left(\frac{L}{H}, \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi} \right) \quad (20)$$

حال در ادامه جهت نزدیک نمودن تحلیل به صورت مسئله حاضر؛ یعنی ورق مستطیلی با خط جوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر، نسبت بی‌بعد B/H برای در نظر گرفتن ابعاد ورق در هر دو جهت طولی و عرضی به عدد بی‌بعد اول L/H اضافه می‌شود. همچنین، با ایده از عدد بی‌بعد

$$\frac{W_0}{H} = f \left(\frac{n_B L B}{H^2}, \frac{n_w n_B L_w B_w}{H_w^2}, \frac{n_B^2 \rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi_B} \right) \quad (21)$$

که در آن

$$\xi_B = \left(\frac{n_B I}{12\sqrt{2}\rho L^2 B^2 D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (22)$$

اکنون، رابطه فوق را می‌توان به صورت رابطه (۲۳) در نظر گرفت.

$$Y = \frac{W_0}{H} = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (23)$$

برای محاسبه مدل بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت برای ورق‌های چهارگوش با خط جوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر از داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این معادلات داده‌های ورودی (X_1, X_2, X_3, X_4) و Y داده‌ی خروجی شبکه است و حل معادلات با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد است [۳۲-۳۷].

۳-۳- نتایج مدل‌سازی

در مدل‌سازی فرآیند بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های چهارگوش با خط جوش از ۲۴ دسته داده ورودی-خروجی آن به‌عنوان ورودی شبکه عصبی از نوع GMDH استفاده شده است. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند که شامل دسته داده‌های آموزشی و پیش‌بینی هستند؛ بنابراین، ۱۷ دسته داده برای آموزش شبکه و ۷ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، نسبت بیشترین خیز دائمی ورق‌های چهارگوش با خط جوش به ضخامت آن با

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 ۱۱ توافق خوبی بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی مشاهده می‌شود به طوری که ۹۶٪ نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند. نتایج روش مدل‌سازی انجام شده برای فرآیند بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های چهارگوش با خط جوش، 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 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 چهارگوش با خط جوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تجربی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تقویت نشده و تقویت‌شده با یک و دو خط جوش در برابر بارگذاری انفجاری مکرر پرداخته شده است. دلیل و انگیزه تحقیق حاضر آن است که تاکنون، تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه شکل‌دهی سازه‌ها تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر مربوط به ساختارهای تک‌لایه فولادی بوده و هنوز تحقیقی روی ورق‌های فولادی تقویت‌شده با خط جوش تحت بار ایمپالسیو مکرر با توزیع یکنواخت انجام نشده است؛ بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای مستطیلی فولادی تقویت‌شده به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند میزان خرج انفجاری، ترکیب چینش خط جوش، اثر تکرار بارگذاری انفجاری و بررسی اثرگذاری آن‌ها روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه، می‌تواند از اهمیت بالایی

استفاده از ۷ سری معادلات زیر به دست می‌آید. لازم به توضیح است که این معادلات به‌صورت شبکه به یکدیگر متصل هستند. مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل ریاضی به‌دست‌آمده از شبکه عصبی از نوع GMDH و خروجی‌های تجربی در ۲۴ داده ورودی-خروجی فرآیند بارگذاری انفجاری مکرر روی ورق‌های چهارگوش با خط جوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

$$G_1 = -4639 + 3011X_3 + 15950X_4 + 28.85X_3^2 - 13970X_4^2 - 3145X_3X_4 \quad (24)$$

$$G_2 = 0.174 - 0.015X_2 + 1.306G_1 - 7.49 \times 10^{-6}X_2^2 - 1.759 \times 10^{-2}G_1^2 + 1.072 \times 10^{-3}X_2G_1 \quad (25)$$

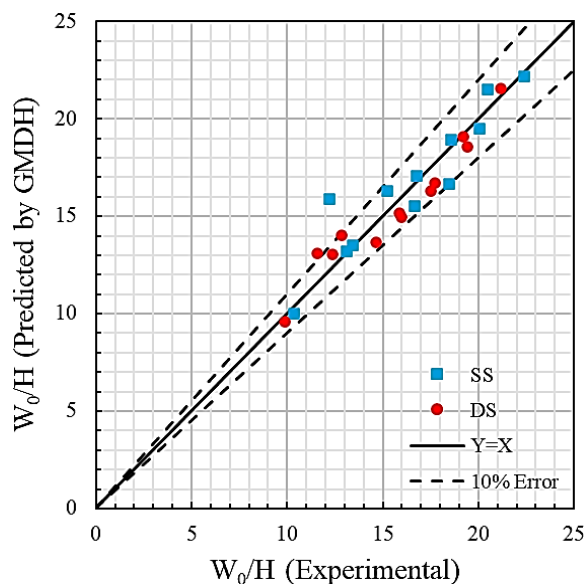
$$G_3 = 1.434 \times 10^{-4} + 3.515 \times 10^{-3}X_1 + 2.734 \times 10^{-3}G_2 - 2.975 \times 10^{-7}X_1^2 + 0.046G_2^2 - 6.495 \times 10^{-5}X_1G_2 \quad (26)$$

$$G_4 = 22.36 + 12.24X_3 - 2.948G_3 + 0.439X_3^2 + 0.1582G_3^2 - 0.7907X_3G_3 \quad (27)$$

$$G_5 = -27.26 + 183.1X_4 - 3.984G_4 - 278.2X_4^2 - 0.1833G_4^2 + 14.48X_4G_4 \quad (28)$$

$$G_6 = -1.629 + 3.255G_2 - 20020G_5 - 0.4857G_2^2 - 0.2740G_5^2 + 0.7516G_2G_5 \quad (29)$$

$$G_7 = 0.6207 + 4.498G_5 - 36770G_6 + 0.8632G_5^2 + 1.280G_6^2 - 21360G_5G_6 \quad (30)$$



شکل (۱۱): مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه‌شده

توسط روش شبکه عصبی GMDH

برخوردار باشد. همچنین یادآور می‌شود که با توجه به پیشینه پژوهش ارائه شده تاکنون مدلی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ورق‌های فولادی چهارگوش با خط جوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر ارائه نشده است؛ لذا در بخش مدل‌سازی، این مطلب می‌تواند جزو نوآوری‌های پژوهش حاضر محسوب شود. در این تحقیق، با بی‌بعدسازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق، اعداد بی‌بعد برای تحلیل ابعادی فرآیند شکل‌دهی ورق‌های چهارگوش تحت بار دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی پیشنهاد شد. استخراج مستقیم اعداد پیشنهادی از معادلات تعادل دینامیکی نشان‌دهنده آن است که این اعداد کاملاً معنای فیزیکی دارند. از مزیت‌های اصلی این روش می‌توان به سازمان‌دهی کارهای تجربی، پیشگیری از آزمایش‌های تکراری، بررسی و شناخت اثر هر یک از متغیرهای وابسته به فرآیند و همچنین تحلیل و تجزیه داده‌های آزمایشگاهی اشاره کرد.

در حالت کلی، 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 انفجار رخ می‌دهد و در بارگذاری‌های بعدی 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 بار بارگذاری مکرر و تغییر هندسه سازه 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 جابه‌جایی نقطه میانی ورق می‌شود. در حالت کلی، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تقویت‌شده و تقویت نشده با بالا رفتن میزان خرج انفجاری و در نتیجه آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد، به طوری که جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به صورت تک‌مرحله‌ای دارند. هر سه ساختار تقویت نشده و تقویت‌شده با یک و دو خط جوش، در جرم خرج ۲۵، ۳۵ و ۴۵ گرم تا بارگذاری سوم را تحمل کردند. البته خیز میانی ورق در ساختارهای تقویت‌شده کمتر بود. ساختار تقویت نشده در جرم خرج ۵۰ گرم برخلاف ساختارهای تقویت‌شده (تک‌خط و یا دوخط)

قابلیت تحمل انفجار دوم را ندارد و دچار پارگی می‌شود؛ بنابراین، این نتیجه حاصل شد که علی‌رغم اثرات حرارت شدید جوش، با استفاده از خط جوش می‌توان مقاومت انفجاری سازه را افزایش داد. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش جرم خرج، مودهای تغییر شکل اول (a) و اول (b) در جرم خرج‌های بالاتر و در تکرار بارگذاری در شماره‌های بالاتر مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در ورق تقویت نشده در بارگذاری سوم با جرم خرج ۲۵ گرم، تغییر مود شکست (حالت اول (a) شکست) مشاهده می‌شود؛ اما در نمونه تقویت‌شده با یک خط در تکرار سوم در جرم خرج ۳۵ گرم همان مود تغییر شکل اتفاق می‌افتد. در نمونه تقویت‌شده با دو خط جوش نیز همان مود شکست در تکرار سوم ۴۵ گرم مشاهده می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر خط جوش و تعداد آن‌ها بر تغییرات مود شکست است. نتیجه به‌دست‌آمده یکی از اهداف اصلی مقاله حاضر بوده که نشان می‌دهد بهره‌گیری از خط جوش و چینش آن چگونه روی مود تغییر شکل و مکانیسم شکست ورق فولادی اثر می‌گذارد. همچنین، نمودار ایمپالس برحسب تعداد انفجارها نشان می‌دهد با افزایش تعداد انفجارها به ذکرشده، شیب‌های خطی ناچیزی کاهش می‌یابد، باین‌حال، این تفاوت ناچیز است. به‌طور دقیق‌تر می‌توان بیان کرد که به دلیل تغییر شکل پلاستیکی نمونه‌ها در طول هر فرآیند، بین ایمپالس برای بارگذاری هر انفجار در جرم خرج ثابت، تفاوت کمی وجود دارد. این تغییرات، مساحت سطح انفجار را تغییر می‌دهد و باعث تغییر کوچکی در ایمپالس پس از هر بارگذاری انفجار می‌شود.

در بخش مدل‌سازی، از روش شبکه عصبی برای ارائه یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختار فلز-پلیمر تحت بار ایمپالس استفاده شد. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند، به طوری که ۱۷ دسته داده برای آموزش شبکه و ۷ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شد. نتایج حاصل‌شده بیان‌گر توافق خوب بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی است به طوری که ۹۶٪ نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار

[10] Rudrapatna N, Vaziri R, Olson M. Deformation and failure of blast-loaded square plates. *International journal of impact engineering*. 1999;22(4):449-67.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Rezasefat M, Mirzababaie 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 the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(7):1449-71.

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

[15] Børvik T, Hanssen A, Langseth M, Olovsson L. Response of structures to planar blast loads—A finite element engineering approach. *Computers & Structures*. 2009;87(9-10):507-20.

[16] 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.

[17] Zheng C, Kong X-s, Wu W-g, Xu S-x, Guan Z-w. Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;113:144-60.

[18] Spranghers K, Vasilakos I, Lecompte D, Sol H, Vantomme J. Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;54:83-95.

[19] 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.

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 چهارگوش با خط جوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر استفاده کرد.

۶- مراجع

[1] 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.

[2] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain*. 2017;53(4):e12235.

[3] 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.

[4] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate—experimental and theoretical. *Struct Eng Mech*. 2015;56(4):535-48.

[5] 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.

[6] Jones N. *Structural impact*: Cambridge university press; 2012.

[7] Yuen SCK, Nurick G, Langdon G, Iyer Y. Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III—an update 25 years on. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;107:108-17.

[8] Zhao Y-P. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. *Archive of Applied Mechanics*. 1998;68(7-8):524-38.

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

- International Journal of Impact Engineering. 2014;74:3-15.
- [31] Jones N. Influence of strain-hardening and strain-rate sensitivity on the permanent deformation of impulsively loaded rigid-plastic beams. International Journal of Mechanical Sciences. 1967;9(12):777-96.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Taleh 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.
- [36] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. Thin-Walled Structures. 2017;112:118-24.
- [37] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2020;234(2):246-54.
- [20] Yuen SCK, Nurick G. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load. International Journal of Impact Engineering. 2005;31(1):55-83.
- [21] Langdon G, Yuen SCK, Nurick G. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part II: localised blast loading. International Journal of Impact Engineering. 2005;31(1):85-111.
- [22] Langdon G, Lee W, Louca L. The influence of material type on the response of plates to air-blast loading. International Journal of Impact Engineering. 2015;78:150-60.
- [23] Cerik BC. Damage assessment of marine grade aluminium alloy-plated structures due to air blast and explosive loads. Thin-Walled Structures. 2017;110:123-32.
- [24] Zhu L, Shi S, Jones N. Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts. International Journal of Impact Engineering. 2018;117:113-22.
- [25] Liu B, Liu K, Villavicencio R, Dong A, Guedes Soares C. Experimental and numerical analysis of the penetration of welded aluminium alloy panels. Ships and Offshore Structures. 2021;16(5):492-504.
- [26] Xu S, Wen H, Liu B, Guedes Soares C. Experimental and numerical analysis of dynamic failure of welded aluminium alloy plates under air blast loading. Ships and Offshore Structures. 2020:1-10.
- [27] Li Y, Ren X, Zhao T, Xiao D, Liu K, Fang D. Dynamic response of stiffened plate under internal blast: Experimental and numerical investigation. Marine Structures. 2021;77:102957.
- [28] 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.
- [29] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Namazi N, Rahmanpoor A. Dynamic compaction of cold die Aluminum powders. Geomech Eng. 2016;10:109-24.
- [30] Jones N. Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings.

پیوست:

جدول الف: نتایج آزمایش‌ها

نام آزمایش	نوع ساختار	m (g)	تعداد بارگذاری	n_B	$I (N \cdot s)$	بیشترین خیز (mm)	مود تغییر شکل
MB1	تقویت نشده	۲۵	۳	۱	۴۴	۲۲/۱	حالت اول شکست
MB2		۲۵		۲	۴۵/۹	۲۶/۱	حالت اول شکست
MB3		۲۵		۳	۴۶/۱	۲۸/۲	حالت اول (a) شکست
MB4		۳۵	۳	۱	۵۷/۴	۲۸/۹	حالت اول شکست
MB5		۳۵		۲	۵۸/۳	۳۲/۷	حالت اول شکست
MB6		۳۵		۳	۵۸/۸	۳۵/۹	حالت اول (a) شکست
MB7		۴۵	۳	۱	۷۰/۸	۳۵/۶	حالت اول شکست
MB8		۴۵		۲	۷۱/۹	۳۹/۶	حالت اول (a) شکست
MB9		۴۵		۳	۷۳/۴	۴۳/۴	حالت اول (b) شکست
MB10		۵۰	۳	۱	۷۷/۸	۴۰/۴	حالت اول (b) شکست
MB11		۵۰		۲	۷۹/۸	-	حالت دوم (a) شکست
MB12		۵۰		۳	۷۹/۹	-	حالت دوم شکست
MB13	تقویت شده (یک خط جوش)	۲۵	۳	۱	۴۴/۹	۲۰/۷	حالت اول شکست
MB14		۲۵		۲	۴۶/۸	۲۴/۴	حالت اول شکست
MB15		۲۵		۳	۴۶/۹	۲۶/۲	حالت اول شکست
MB16		۳۵	۳	۱	۵۸/۲	۲۶/۹	حالت اول شکست
MB17		۳۵		۲	۵۸/۹	۳۰/۵	حالت اول شکست
MB18		۳۵		۳	۵۹/۳	۳۳/۵	حالت اول شکست
MB19		۴۵	۳	۱	۷۱/۲	۳۳/۳	حالت اول شکست
MB20		۴۵		۲	۷۱/۹	۳۷/۲	حالت اول شکست
MB21		۴۵		۳	۷۲/۸	۴۰/۱	حالت اول (a) شکست
MB22		۵۰	۳	۱	۷۷/۷	۳۶/۹	حالت اول شکست
MB23		۵۰		۲	۷۸/۹	۴۱/۰	حالت اول (a) شکست
MB24		۵۰		۳	۷۹/۳	۴۴/۸	حالت اول (b) شکست
MB25	تقویت شده (دو خط جوش)	۲۵	۳	۱	۴۴/۹	۱۹/۸	حالت اول شکست
MB26		۲۵		۲	۴۷/۸	۲۳/۲	حالت اول شکست
MB27		۲۵		۳	۴۷/۹	۲۴/۷	حالت اول شکست
MB28		۳۵	۳	۱	۵۸/۱	۲۵/۷	حالت اول شکست
MB29		۳۵		۲	۵۸/۹	۲۹/۳	حالت اول شکست
MB30		۳۵		۳	۵۸/۱	۳۲/۰	حالت اول شکست
MB31		۴۵	۳	۱	۶۸/۲	۳۱/۷	حالت اول شکست
MB32		۴۵		۲	۶۹/۵	۳۵/۵	حالت اول شکست
MB33		۴۵		۳	۷۰/۲	۳۸/۴	حالت اول (a) شکست
MB34		۵۰	۳	۱	۷۶/۱	۳۵/۰	حالت اول شکست
MB35		۵۰		۲	۷۶/۸	۳۸/۹	حالت اول (a) شکست
MB36		۵۰		۳	۷۸/۲	۴۲/۳	حالت اول (a) شکست



Uniform Blast Loading on Stiffened Rectangular Plates by Welding Line: Experimental Investigation and Modelling Using GMDH Neural Network

Mansoor Behtaj¹, Hashem Babaei^{2*}, Tohid Mirzababaie Mostofi³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

HIGHLIGHTS

- Experiments were performed on three different structures: unstiffened, stiffened with one and two welding lines.
- Dynamic loads in a wide range were applied up to 3 loads by 25, 35, 45, and 50 g charge masses.
- The Group Method of Data Handling (GMDH) neural network was used to present a mathematical model.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 9 September 2021

Received in revised form: 27 November 2021

Accepted: 6 January 2022

Available online: 10 January 2022

*Correspondence:

ghbabaei@guilan.ac.ir

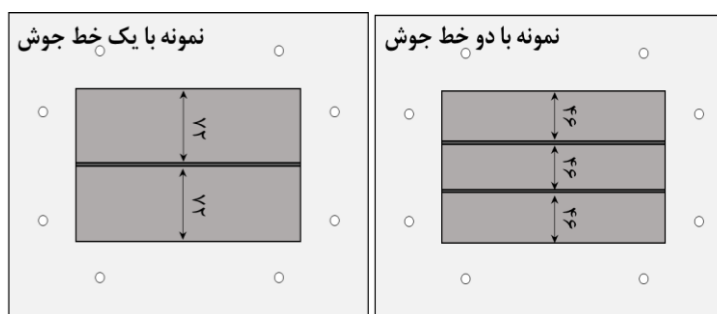
How to cite this article:

M. Behtaj, H. Babaei, T.M. Mostofi. Uniform blast loading on stiffened rectangular plates by welding line: Experimental investigation and modelling using GMDH neural network. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(2):15-35.

Keywords:

Blast loading,
Repeated loading
Stiffened plate
Welding line
Modelling

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

In the present study, the dynamic response of rectangular steel plates under repeated impulsive loading was investigated. In this regard, experiments were performed on three different structures: unstiffened, stiffened with one and two welding lines. To investigate the deformation modes and the failure mechanism of the experimental specimens, dynamic loads in a wide range were applied up to 3 loads by 25, 35, 45, and 50 g charge masses. Experimental observations demonstrate that with increasing charge mass, the Mode Ia and Mode Ib are observed in a higher charge mass and loading repetitions in a higher number. For the unstiffened plate, at the 3rd load with a mass of 25g, a change Mode Ia is observed, however, the same deformation mode occurs for the stiffened plate with a single and two weld lines at the 3rd blast load by 35g and 45 g charge mass, respectively. These observations indicate the effect of the weld line and its numbers on the variation of failure modes. Furthermore, in the numerical modeling section, the Group Method of Data Handling (GMDH) neural network was used to present a mathematical model based on dimensionless numbers to predict the maximum permanent deflection of tested specimens. Good agreement between the proposed model and the corresponding experimental results is obtained and all data points are within the $\pm 10\%$ error range for every two pattern.

