ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(04):265-280

An Experimental Investigation into Deformation Modes and Failure Mechanism of Welded Rectangular Plates under Repeated Blast Loading

ARTICLEINFO

Article Type
Original Research

Authors
Authors
Behtaj M.[1]
Babaei H.[1],
Mostofi T.[2]

How to cite this article
Behtaj M, Babaei H, Mostofi T, An Experimental Investigation into Deformation Modes and Failure Mechanism of Welded Rectangular Plates under Repeated Blast Loading. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(04):265-280.

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ghbabaei@guilan.ac.ir

Article History
Received: September 03, 2021
Accepted: November 21, 2021
ePublished: February 22, 2022

ABSTRACT

In this paper, the dynamic response of steel plates under repeated blasts loading using a ballistic pendulum system were investigated. In this regard, experiments were performed on three different configurations: unwelded, welded with single and double welding lines. To apply the dynamic load in a wide range, the plastic explosive charge (C4) in different masses of 25, 35, 45, and 50 g were used. Besides, to investigate the behavior of the structure under repeated loading, experiments were tested on up to 3 loads. Experimental observations demonstrate that with increasing charge mass, the large inelastic deformation with necking and tensile tearing around of the boundary were observed in higher charge masses and loading repetitions in higher numbers. For the unwelded plate, at the 3rd load with a charge mass of 25g, a change in the failure mode was observed (large inelastic deformation with necking around part of the boundary), however, for the welded plate with a single weld line, the same deformation mode occurred at the 3rd blast load by the charge mass of 35g. For the welded plate with two weld lines, the same failure mode was observed at the 3rd blast load by the charge mass of 45g. These observations indicate the effect of the weld line and its numbers on the variation of failure modes. The obtained result is one of the main objectives of the present study to show how using welding lines and their arrangements affect the deformation mode and the failure mechanism of steel plates.

Keywords Repeated Blast Loading, Welded Steel Plate, Experimental Study, Deformation Mode, Failure Mechanism

CITATIONLINKS

[1] Theoretical analysis on the effect of ... [2] Experimental and theoretical study on ... [3] Closed-form analytical analysis on ... [4] Effect of gas detonation on response of ... [5] Experimental investigation and ... [6] Structural impact [7] Deformation of thin plates subjected to ... [8] Suggestion of a new dimensionless number for ... [9] Blast loaded plates [10] Large transverse deformation of ... [11] Gas mixture detonation load on... [12] Deformation of mild steel plates subjected to ... [13] Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to ... [14] Repeated localized impulsive loading on ... [15] Response of structures to planar blast loads–A finite element ... [16] Assessment of blast loading effects–Types of explosion and... [17] Modelling the structural response of GLARE panels to ... [18] Numerical simulation and experimental validation of ... [19] The response of mild steel and armour steel plates to ... [20] Experimental and numerical studies on ... [21] Experimental and numerical studies on ... [22] The influence of material type on ... [23] Large inelastic deformation of aluminium alloy ... [24] Dynamic response of stiffened plates under repeated ... [25] Experimental and numerical study on ... [26] Experimental and numerical analysis of ... [27] Dynamic response of stiffened plate under ... [28] The deformation and tearing of ... [29] The deformation and tearing of ... [30] Experimental, theoretical, and numerical studies on ... [31] Theoretical and experimental analysis of ... [32] Experimental analysis of clamped AA5010 and ... [33] The response of circular plates to ... [34] Structural response of monolithic and ... [35] Grain Growth Mechanism in Welding of ... [36] Heat Affected Zone Toughness of Low Carbon ... [37] The Microstructure and Mechanical Properties of ... [38] Multi-objective optimum design of ANFIS for ... [39] Study on the response of circular thin plate under ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی مودهای تغییر شکل و سازوکار شکست ورق‌های چهارگوش جوش شده تحت بارگذاری انفجاری مکرر

منصور به تاج
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
هاشم بابایی*
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
توحید میرزابابای مستوفی
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران.

چکیده

در این مقاله، به بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورق‌های فولادی تحت بارگذاری انفجاری مکرر با سامانه آونگ بالستیک پرداخته شد. در این راستا، آزمایش‌های روی سه ساختار مختلف جوش نشده، جوش‌شده با یک و دو خط انجام شد. برای اعمال بار دینامیکی در محدوده گسترده، از خرج پلاستیکی (C4) در جرم ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم استفاده شد. همچنین، جهت بررسی رفتار سازه تحت بارگذاری مکرر، آزمایش‌ها تا ۳ مرتبه بارگذاری ادامه پیدا کرد. مشاهدات تجربی بیان می‌کند که با افزایش جرم خرج، مودهای تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ همراه با نازک شدگی و همچنین پارگی کششی در پیرامون ورق نمونه در جرم خرج‌های بالاتر و در تکرار بارگذاری در شماره‌های بالاتر مشاهده شد. در ورق تقویت نشده در بارگذاری سوم با جرم خرج ۲۵ گرم، تغییر مود تغییر شکل (تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ همراه با گلویی شدن جزئی) مشاهده شد؛ اما در نمونه جوش‌شده با یک خط در تکرار سوم در جرم خرج ۳۵ گرم همان مود تغییر شکل اتفاق افتاد. در نمونه جوش‌شده با دو خط جوش نیز همان مود شکست در تکرار سوم ۴۵ گرم مشاهده شد. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر خط جوش و تعداد آن‌ها بر تغییرات مود تغییر شکل و سازوکار شکست است. نتیجه به‌دست‌آمده یکی از اهداف اصلی مقاله حاضر بوده که نشان دهد بهره‌گیری از خط جوش و چینش آن چگونه روی مود تغییر شکل و سازوکار شکست ورق فولادی اثر می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها: بارگذاری انفجاری مکرر، ورق فولادی جوش شده، بررسی تجربی، مود تغییر شکل، سازوکار شکست.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰
*نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

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 اعمال‌شده 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 به‌منظور پیش‌بینی تخریب سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحقیقاتی بار انفجاری روی یک سازه که از پدیده‌های پیچیده مهندسی است 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 تقویت‌شده و ورق‌های چندلایه انجام‌شده است. 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 تقویت‌شده یا چندلایه تحت بارگذاری انفجاری چندمرحله‌ای یا مکرر است. البته بررسی منابع در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی روی مکرر بودن بارگذاری انجام‌شده است.

تحقیقات تجربی و تحلیلی توسط پژوهشگران در زمینه بررسی بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی روی سازه‌های چهارگوش در منابع[1-3] و سازه‌های دایره‌ای در منابع[4-5]، انجام‌شده است. جونز[6]، نوریک[7]، ژائو[8] و راجندران و[9]، به بررسی تحلیلی و تجربی اثر بار انفجاری بر روی ورق پرداختند. مطالعات بیشتر[10-14] به بررسی اثر شرایط مرزی ورق، سطح مواجه ورق (دایروی، مستطیلی و مربعی) و نوع بارگذاری‌های مختلف انفجاری با استفاده از نرم‌افزارهای اجزا محدود و آزمایش انجام‌شده است و مدل‌های تحلیلی نیز ارائه‌شده است. پژوهشگران دیگری[15-18] با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و آباکوس به مدل‌سازی بار انفجاری روی سازه پرداخته و پروفیل فشار بار انفجاری نسبت به زمان و مکان ارائه‌شده است. البته این شبیه‌سازی‌ها قبلاً با نتایج تجربی صحه‌گذاری شده است. با توجه به زمان‌بر بودن نحوه مدل‌سازی بالا، استفاده از روش کانوپ با لحاظ کردن شرایطی می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد[19]. معمولاً روش کانوپ تطابق خوبی با

نتایج تجربی دارد. درواقع در این روش جرم ماده منفجره با معادل جرم تی ان تی معادل می‌گردد و از اثرات انعکاس موج انفجاری روی سازه صرف‌نظر می‌گردد[19]. یون و همکاران[20]، به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت بر روی ورق فولادی چهارگوش مربعی و تقویت‌شده با ساختارهای تقویت‌شده با یک خط، دو خط موازی و دو خط عمودی پرداختند. ورق مربعی موردمطالعه آن‌ها از جنس فولاد باضخامت ۱۲ میلی‌متر بوده که در معرض بارگذاری انفجاری با توزیع یکنواخت قرار گرفت. ادامه این پژوهش توسط لانگدن و همکاران[21] ادامه پیدا کرد. در این پژوهش ورق‌ها ماشین‌کاری شده و بخش‌هایی به‌صورت تسمه بر روی ورق باقی‌مانده بودند و از این روش برای تقویت ورق استفاده کرده بودند. به‌طورکلی، تغییر شکل پلاستیک ورق‌ها به‌صورت نازک شدگی در قسمت‌های گیردار و گاهی هم به‌صورت پارگی بروز پیدا می‌کرد. با افزایش میزان و تعداد بار انفجاری انحراف بیشتری در میزان جابجایی ورق دیده می‌شد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش تعداد انفجار روی ورق، نرخ افزایش انحراف سطح ورق در نقطه میانی کاهش و سختی ویکرز ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۵، لانگدن و همکارانش[22] 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 مسلح، آلیاژ آلومینیوم، کامپوزیتی با رشته‌های تقویت‌شده پلیمری به‌صورت تجربی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای هر ماده، خیز دائمی مرکز ورق با افزایش ایمپالس به‌صورت 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 مسلح رفتار تردتری 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 مورداستفاده در ایمپالس پایین‌تری دچار شکستگی فیبر می‌شوند. در ادامه بوراک[23] در سال ۲۰۱۷ از ورق‌های آلومینیومی استفاده کرد که با استفاده از جوش اتصال انجام‌شده بود. این خطوط در مکان‌های مختلفی جوش داده‌شده بودند که به همین دلیل مناطق تحت تأثیر حرارت نیز موردبررسی قرارگرفته بودند. ورق‌های استفاده‌شده در این پژوهش آلومینیوم سری ۵۰۰۰ بوده است. در پژوهش منتشرشده توسط ژو و جونز[24]، به بررسی عددی پاسخ دینامیکی ساختارهای تقویت‌شده تحت بار ضربه‌ای غیریکنواخت و مکرر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌شده است. در این پژوهش، هندسه ورق به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته‌شده و به‌منظور کاهش حجم محاسبات و با استفاده از تقارن از مدل یک‌چهارم استفاده‌شده است. در این شبیه‌سازی، ورق‌های فلزی باضخامت‌های مختلف به‌صورت تغییر شکل‌پذیر مدل شده و مش موردنظر ساختار نیز از نوع اجزا خطی چهاروجهی جامد انتخاب‌شده است.

مقاله‌ای که توسط لیو و همکاران[25] در سال ۲۰۲۰ ارائه شد، رفتار پلاستیک و سازوکار شکست ورق آلومینیومی چهارگوش تقویت‌شده تخت برخورد یک ضربه زننده 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[26]، 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 در ناحیه تحت تأثیر گرما صورت می‌گیرد و بر حالت شکست ورق‌های آلومینیومی تأثیر دارد. همچنین در کاری که توسط ییینگ لی و همکاران[27] 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 مورد بررسی قرار گرفت. جالب‌توجه بود که تغییر شکل ابتدا کاهش‌یافته 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 تک لایه فولادی بوده[24-34] و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های فولادی تقویت‌شده با خط جوش تحت بار دفعی مکرر با توزیع یکنواخت انجام‌نشده است؛ بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای مستطیلی فولادی تقویت‌شده به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند میزان خرج انفجاری تا ورق، 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.

یکی از اهداف استفاده از خط جوش سبک‌سازی سازه است. این نوع بارگذاری به‌عنوان‌مثال در کشتی‌های اقیانوس‌پیما که در

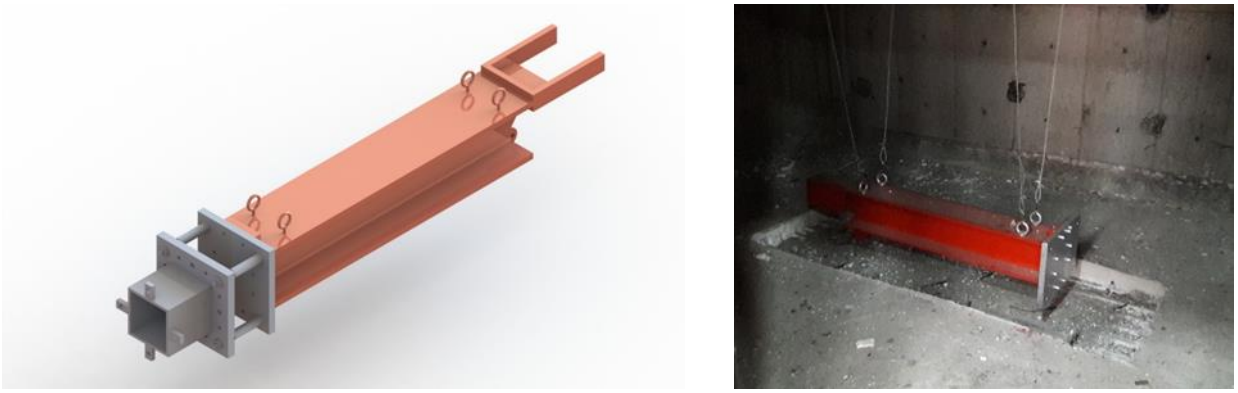
مسیر حرکت خود با اشیاء و کوه‌های یخ به‌طور مکرر برخورد می‌کنند، مشاهده می‌شود؛ بنابراین سبک بودن سازه یکی از اولویت‌ها می‌باشد. در استفاده از استیفنر وزن استیفنر و همچنین جوشکاری احتمالی در طرفین استیفنر باعث افزایش وزن سازه می‌شود.

۲- مواد و آزمایش‌های تجربی

در مطالعات تجربی فرآیند شکل‌دهی تحت بار دفعی، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارها و همچنین مقاومت انفجاری آن‌ها تحت آزمایش نسبت به بار دفعی اعمالی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ ازاین‌رو 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 موردبررسی قرار داد که تاکنون در پیشینه تحقیق در این زمینه مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر، از سامانه آونگ بالستیک ساخته‌شده در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان برای مطالعه تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ورق‌های چهارگوش فولادی تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر استفاده‌شده است (مطابق با شکل ۱).

سامانه آونگ بالستیک معمولا برای شکل دهی آزاد و بدون قالب انواع ورق‌ها مورد استفاده قرار می گیرد. در این سامانه آونگ از سقف آویزان است و دامنه حرکت رفت و برگشت آونگ توسط قلم روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده‌شده است، ثبت می‌شود. ورق‌ها نیز بین دو صفحه ضخیم ثابت می‌شوند. سامانه آزمایشی آونگ بالستیک شامل چهار بخش است: ۱) واحد اعمال بار انفجاری جایگذاری خرج، ۲) سامانه تحریک خرج انفجار با قابلیت کنترل از راه دور ۳) واحد اندازه‌گیری دامنه نوسان ٤) واحد شکل‌دهی و نگهدارنده‌ها. در بخش اعمال بار، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر قرار داده می‌شود. سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به‌وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به‌صورت افقی و تراز آویزان است و دامنه حرکت رفت‌وبرگشت آونگ توسط قلم روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده‌شده است، ثبت می‌گردد. مطابق با طرح‌واره سامانه، در انتهای سمت چپ، روی صفحه مربعی فولادی باضخامت ۲۵ میلی‌متر، چهار میله فولادی به شعاع ۷/۵ میلی‌متر نصب‌شده که به‌صورت نر و ماده به نگه‌دارنده نمونه آزمایشی متصل می‌شود. نگه‌دارنده نمونه آزمایشی از دو صفحه مربعی فولادی باضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل‌شده 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 تعبیه‌شده است. همچنین، رزوه‌هایی جهت نصب رابط‌های استقرار خرج در صفحه جلویی نگه‌دارنده نمونه آزمایشی در نظر گرفته‌شده است. در سمت راست 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 ۱۵۰×۲۵۰ میلی‌متر مربع و طول ۲۰۰ میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه است، استفاده‌شده است. شایان توجه است که با توجه به پیشینه[1-5]، درصورتی‌که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از نصف عرض ورق باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد.

در ادامه، برای فهم بهتر مطلب، در مورد نحوه اندازه‌گیری بیشترین خیز دائمی و ایمپالس توضیحاتی ارائه می‌گردد. پس از هر انفجار، نمونه از سامانه جدا شده و میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها توسط کولیس ارتفاع‌سنج در نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است. سپس، نمونه مجدد بر سامانه بسته شده و انفجار دوم انجام می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری ایمپالس، دامنه حرکت آونگ بالستیک پس از هر انفجار اندازه‌گیری می‌شود. دامنه نوسان اولیه پاندول که توسط قلم متصل به پاندول روي ورق ثبت می‌شود، نسبت مستقیمی با ایمپالس اعمال‌شده به نمونه دارد.



شکل ۱) تصویر طرح‌واره و واقعی سامانه آونگ بالستیک در آزمایشگاه ضربه و انفجار گیلان

با فرض ميرايي ويسكوز درحركت اعمال‌شده به نمونه دارد. با فرض ميرايي ويسكوز درحركت پاندول، معادله حركت پاندول به‌صورت زير است[38-39].

$$\ddot{X} + 2\beta\dot{X} + \omega_n X = 0 \quad (۱)$$

كه در آن

$$\beta = \frac{C}{2M} \quad (۲)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} \quad (۳)$$

ضريب ميرايي- M جرم كل (شامل: صفحه ورق، تير I شكل- گيره ورق و وزنه‌هاي تعادل)، T زمان پريود نوسان پاندول است. با اندازه‌گيري مدت‌زمان تعداد نوسان‌های مشخص پاندول، T پريود طبيعي نوسان تعيين مي‌شود. با به‌كار بردن شرايط مرزي،حل معادله ديفرانسيل (۱) به جواب زير منجر مي‌شود.

$$X = \frac{e^{-\beta t}\,\dot{x}_0 \sin(\omega_d t)}{\omega_d} \quad (۴)$$

كه در آن،$\dot{x}_0$ سرعت اوليه پاندول است.

$$\omega_d = \sqrt{(\omega_n^2 - \beta^2)} \quad (۵)$$

با در نظر گرفتنx_1 به‌عنوان مقدار جابجايي روبه‌جلو پاندول در لحظه $t = \frac{T}{4}$ و x_2 مقدار جابجايي رو به عقب در لحظه $t = \frac{3T}{4}$ و سپس با قرار دادن اين مقادير در معادله (۴) خواهيم داشت.

$$x_1 = \frac{\dot{x}_0 T}{2\pi} e^{-\frac{1}{4}\beta T} \quad (۶)$$

$$x_2 = \frac{\dot{x}_0 T}{2\pi} e^{-\frac{3}{4}\beta T} \quad (۷)$$

نسبت دو دامنه متوالي مطابق رابطه زير است:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\frac{1}{4}\beta T}}{e^{-\frac{3}{4}\beta T}} = e^{\frac{1}{2}\beta T} \quad (۸)$$

با گرفتن لگاريتم طبيعی از طرفين معادله اخير، ثابت ميرايي به دست می‌آيد كه ثابت ميرايي براي هر آزمون، مقداری مشخص است.

$$\beta = \frac{2}{T}\ln(\frac{x_1}{x_2}) \quad (۹)$$

x_1 (جابجايي به سمت جلو) بهترين تقريب براي محاسبه سرعت اوليه حركت پاندول است لذا با استفاده از معادله (۶) خواهيم داشت.

$$\dot{x}_0 = \frac{2\pi x_1 e^{\frac{1}{4}\beta T}}{T} \quad (۱۰)$$

و درنهايت مي‌توان ايمپالس را از رابطه زير محاسبه كرد.

$$I = M\,\dot{x}_0 \quad (۱۱)$$

x_1 و x_2، اولين جابجايي حركت نوساني به سمت جلو و عقب پاندول، از طريق اندازه‌گيري طول خط‌هايی كه توسط قلم و كاغذ ثبت‌شده قابل‌محاسبه است.

مطابق شكل ۲، لازم به ذكر است كه طول خطوط ΔR وΔL كه توسط قلم كاغذ ثبت‌شده، با جابجايي واقعي پاندول(x_1 و x_2) برابر نيست، اما از طريق اندازه اين خطوط و روابط زير مي‌توان جابجايي نوساني اوليه پاندول را محاسبه كرد.

مطابق شكل ۲، رابطه فاصله نقطه انتهايي تيرك پاندول تا نوك قلم در حالت سكون به‌صورت زير است.

$$d_1 = \sqrt{(Z^2 - a^2)} \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق a فاصله بين تيرك تا زمين و Z طول بازويي است كه قلم به آن متصل است. هنگامی‌كه پاندول در اولين نوسان به بيشترين فاصله از حالت تعادل خود مي‌رسد، فاصله نوك قلم تا نقطه انتهايي تيرك از رابطه زير محاسبه مي‌شود.

$$d_2 = \sqrt{(Z^2 - (a+y)^2)} \quad (۱۳)$$

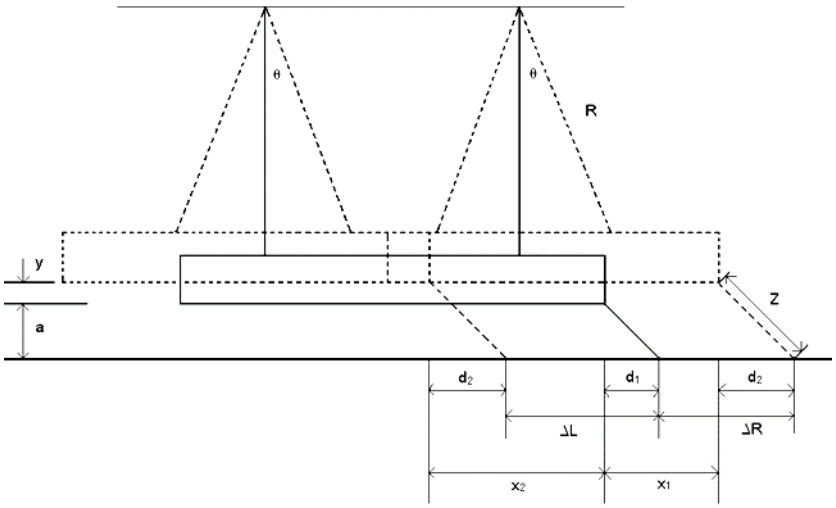
با فرض كوچك بودن زاويه نوسان و خطي بودن طول كمان داريم:

$$x_1 = R\theta \quad (۱۴)$$

$$y = \frac{R\theta^2}{2} \quad (۱۵)$$

با قرار دادن (۱۴) و (۱۵) در معادله (۱۳) خواهيم داشت:

$$d_2 = \sqrt{(Z^2 - (a + \left(\frac{{x_1}^2}{2R}\right))^2)} \quad (۱۶)$$



شكل ۲) طرح شماتيک حركت پاندول

بنابراین می‌توان روابط x_1 و x_2 را به‌صورت زیر نوشت بنابراین می‌توان روابط x_1 و x_2 را به‌صورت زیر نوشت

$$x_1 = \Delta R + d_1 - d_2 \quad (۱۷)$$

$$x_2 = \Delta L - d_1 + d_2 \quad (۱۸)$$

با قرار دادن روابط (۱۳) و (۱۶) در معادله (۱۷) و (۱۸) به ترتیب، مقادیر x_1 و x_2 برحسب ابعاد قابل اندازه‌گیری و ثبت شده، به‌دست می‌آیند:

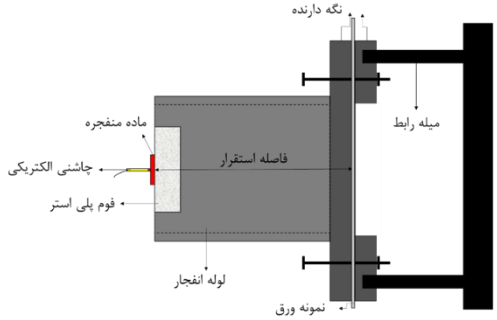
$$x_1 = \Delta R - \sqrt{(Z^2 - (a^2 + \frac{{x_1}^2}{2R})^2)} + \sqrt{Z^2 - a^2} \quad (۱۹)$$

$$x_2 = \Delta L - \sqrt{Z^2 - a^2} + \sqrt{(Z^2 - (a^2 + \frac{{x_1}^2}{2R})^2)} \quad (۲۰)$$

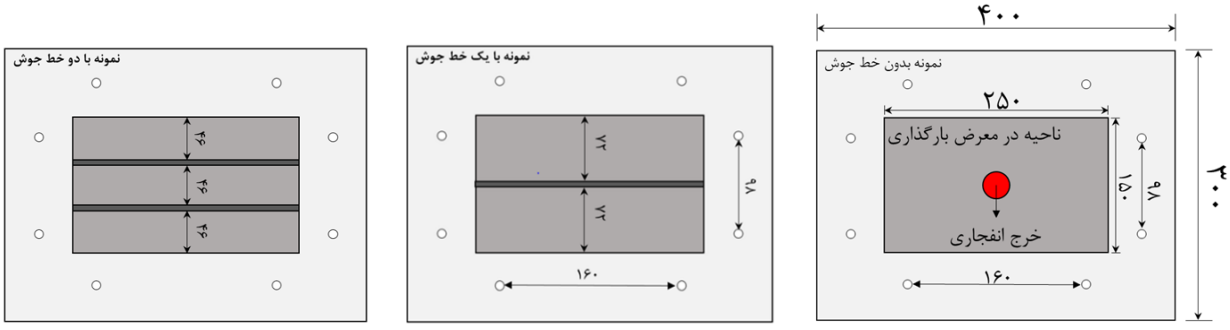
مطابق با طرح‌واره دوبعدی ارائه‌شده در شکل ۳، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۳۵ میلی‌متر قرار داده می‌شود. در تحقیق حاضر ماده منفجره به‌کار گرفته‌شده برای انجام آزمایش‌های تجربی PE4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری شکل بودن آن با دست به‌صورت دیسکی به قطر ۳۰ میلی‌متر درآورده شده و روی صفحه پلی‌استری پهن‌شده 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 ۸ نانل به جرم ۱ گرم و به همراه دستگاه تحریک نانل استفاده می‌شود. ورق‌های چهارگوش با سطح مواجهه مستطیلی ۱۵۰×۲۵۰ میلی‌متر مربع بین دو صفحه فولادی ضخیم باضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده‌شده و با ۸ عدد پیچ ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به‌صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته‌شده 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 مورد نیاز انفجار بسته به مود تغییر شکل و سازوکار شکست نمونه آزمایشی تا سه بار تکرار شد. وجود لوله در سامانه آونگ بالستیک انجام می‌شود که وجود این امر با عث می‌شود که انفجار در لوله مشابه انفجار یکنواخت در نظر گرفته شود.

مطابق با شکل ٤، ورق‌ها در سه الگو برای آزمون‌ها آماده‌سازی شدند. این سه الگو عبارت‌اند از: ورق فولادی تقویت نشده (بدون خط جوش)، ورق فولادی تقویت‌شده با یک خط جوش و ورق فولادی تقویت‌شده با دو خط جوش. تمام صفحات از جنس فولاد به ابعاد ۳۰۰×٤۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر بودند. شایان توجه است که از الکترود فولادی با قطر ۳ میلی‌متر به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده‌شده است. نمونه‌ها با استفاده از قوس‌های جوشکاری خودکار TIG و به دنبال روش‌های استاندارد ساخت و جوشکاری ساخته شدند.

عمل جوشکاري بر روي صفحات فلزی منجر به پدیده مهمی می‌شود که به‌عنوان منطقه تحت تأثیر گرما (HAZ) شناخته می‌شود. در پایان فرآیندهای جوشکاری به دلیل سرعت بالای سرد شدن، ساختار مارتنزیتی تشکیل می‌گردد. در این نواحی امکان ایجاد ترک در قطعه جوشکاری شده است. در فلزات و آلیاژهایی مانند فولادها تغییرات ریزساختاری قابل‌ملاحظه‌ای در ناحیه تحت تاثیر حرارت رخ می‌دهد که این تغییرات خواص مکانیکی و رفتار عملی اتصال جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین مشخص‌شده است که ریزساختارهای نهایی و خواص مکانیکی فولاد جوش داده‌شده به برخی از متغیرهای اندازه‌گیری کننده مانند درصد کربن و وجود عناصر دیگر مانند گوگرد یا فسفر بستگی دارد. فولادهای کم‌کربن، توانایی جوشکاری خوبی را از



شکل ۳) طرح‌واره دوبعدی نحوه قرارگیری نمونه آزمایشی، نگه‌دارنده و خرج انفجاری



شکل ۴) شماتیک دوبعدی نمونه‌های آزمایشی مختلف با سه الگو

خود نشان می‌دهند، زیرا می‌توان آن‌ها را بدون احتیاط‌های ویژه با استفاده از اکثر فرایندهای موجود جوش داد[35-37]. با توجه به توضیحیات ارائه‌شده، خواص مکانیکی دو ورق فولادی خام و جوش‌شده در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر، ورق‌های فولادی از شرکت فولاد مبارکه در ایران خریداری شده‌اند. در این سری از آزمایش‌ها، ضخامت‌های ۲ میلی‌متر برای صفحات فولادی در نظر گرفته شده است. ترکیبات شیمیایی صفحات آلیاژ فولاد در جدول ۱ ارائه شده است. خواص مکانیکی ورق فلزی مورداستفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک‌محوره روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی از جنس فولاد نرم تعیین‌شده 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، دو نمونه آزمایشگاهی از ضخامت ۲ میلی‌متر برای هر حالت تهیه شد. نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش برای نمونه آزمایشی در دو حالت خام و جوش‌شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. همچنین در جدول ۲، مقادیر تنش تسلیم استاتیکی، تنش نهایی و همچنین کرنش شکست، چگالی و مدول الاستیسیته برای هر دو حالت ارائه شده است.

جدول ۱) ترکیبات شیمیایی ورق‌های فولادی استفاده شده در تحقیق حاضر (درصد وزنی)

عنصر							
P	Mo	Cr	Si	Mn	C	Ni	Fe
۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۴۳	۰/۱۵۶	۰/۳۲۰	۰/۱۳۰	۰/۰۰۵	پایه

۳- بحث و بررسی نتایج تجربی

در جدول ۳، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ساختارهای فولادی تقویت نشده و تقویت‌شده با خط جوش تحت بار دفعی یکنواخت مکرر تا ۳ دفعه ارائه‌شده است. در این جدول، مقادیر جرم خرج انفجاری m، شماره هر انفجار B، ایمپالس ناشی از بارگذاری دفعی I، بیشترین خیز دائمی نمونه و همچنین مود تغییر شکل ورق ارائه‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام‌گرفته نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی تقویت‌شده و نشده تحت دفعی یکنواخت مکرر است که در آن اثر تغییر شدت بار اعمالی، چینش جوش و تعداد بارگذاری بررسی‌شده است.

لازم به توضیح است که در سال ۱۹۷۳، منکس و اپات برای نخستین بار در بررسی تجربی خود روی رفتار سازه تحت بارهای دفعی، سه حالت شکست مجزای زیر را مشاهده نمودند:

حالت اول شکست (Mode I): تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ

حالت دوم شکست (Mode II): پارگی کششی در لبه‌ها

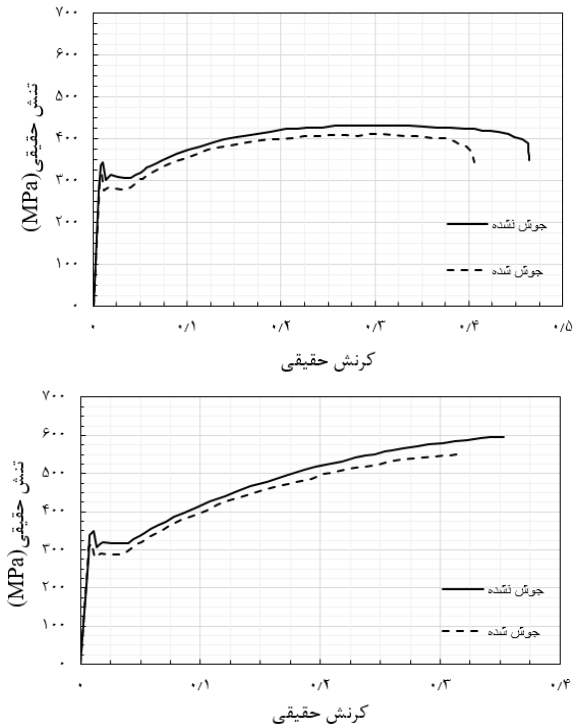
حالت سوم شکست (Mode III): گسیختگی برشی در لبه‌ها

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:

حالت اول (a) شکست (Mode Ia): تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ همراه با گلویی شدن جزئی در پیرامون مرز ورق

حالت اول (b) شکست (Mode Ib): تغییر شکل غیر الاستیک 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 پیداکرده تا تمام مرز ورق را در بربگیرد (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. هنگامی‌که پارگی در



شکل ۵) منحنی‌های تنش-کرنش برای ماده استفاده‌شده در این تحقیق: الف) مهندسی، ب) حقیقی

جدول ۲) خواص مکانیکی ورق‌های فولادی استفاده‌شده در تحقیق حاضر

ماده	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش شکست (MPa)	کرنش شکست –	ضریب پواسون –	چگالی (kg/m3)	مدول یانگ (GPa)
فولاد خام	۳۵۰	۴۳۲/۲	۳۹۰/۸	۰/۴۶۳	۰/۳	۷۸۹۰	۲۰۰
فولاد جوش‌شده	۳۱۸/۵	۴۱۱/۶	۳۸۰/۴	۰/۳۹۷	۰/۳	۷۸۹۰	۲۰۰

جدول ۳) نتایج آزمایش‌ها

نام آزمایش	نوع ساختار	m (g)	تعداد بارگذاری	B	I (N·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		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		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		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	تقویت‌شده (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		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		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		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	تقویت‌شده (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		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		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		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

قسمتی از مرز ورق ظاهر می‌گردد، حد پایین حالت دوم شکست در ورق رخداده و به‌عنوان حالت دوم شکست (Mode II*): شناخته می‌شود. با توجه به توضیحات بالا حالت دوم شکست به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

حالت دوم (*) شکست (Mode II*): تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ همراه با پارگی جزئی در پیرامون مرز ورق

حالت دوم (a) شکست (Mode IIa): افزایش بیشترین خیز ورق با افزایش ایمپالس همراه با پارگی کامل در پیرامون مرز

حالت دوم (b) شکست (Mode IIb): کاهش بیشترین خیز ورق با افزایش ایمپالس همراه با پارگی کامل در پیرامون مرز

۳-۱- مودهای تغییر شکل و سازوکار شکست

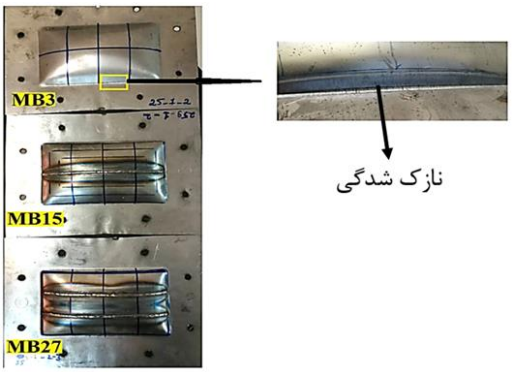
در این قسمت از پژوهش، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مودهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر عوامل تجربی مانند، افزایش جرم خرج انفجاری، نوع چینش خط جوش‌ها و افزایش تعداد بارگذاری انفجاری بر بیشترین خیز دائمی تقویت‌شده و تقویت نشده، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.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

نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارها در شکل ٦ و ٧ نشان داده‌شده است.

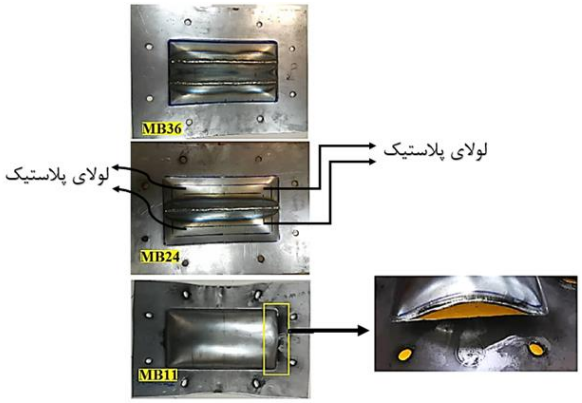
در این مجموعه آزمایش‌ها، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تقویت نشده، تقویت‌شده با یک خط جوش و تقویت‌شده با دو خط جوش به‌صورت محدب (مود اول تغییر شکل[28]) بوده و این بیانگر آن است که بار دفعی تولید شده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود.

به‌طورکلی شکل ٦ نشان می‌دهد: ١) ناحیه محدب شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند؛ ٢) سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار کمی تغییر شکل غیر الاستیک شده که این ناشی از شرایط مرزی و محل قرارگیری پیچ‌ها است؛ ٣) نازک شدگی در طول مرزهای گیردار مشهود است و این نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است؛ ٤) لولاهای پلاستیک در امتداد خط‌های قطری کشیده شده روی نمونه از گوشه‌های ساختار تا مرکز آن گسترش می‌یابد.

مطابق با شکل ٦ که برای ساختارهای مختلف تحت بارگذاری یکسان ٢٥ 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



شکل ۶) الگوی تغییر شکل و سازوکار شکست برای نمونه‌های آزمایشی تحت بار انفجاری ۲۵ گرم



شکل ۷) الگوی تغییر شکل و سازوکار شکست برای نمونه‌های آزمایشی تحت بار انفجاری ۵۰ گرم

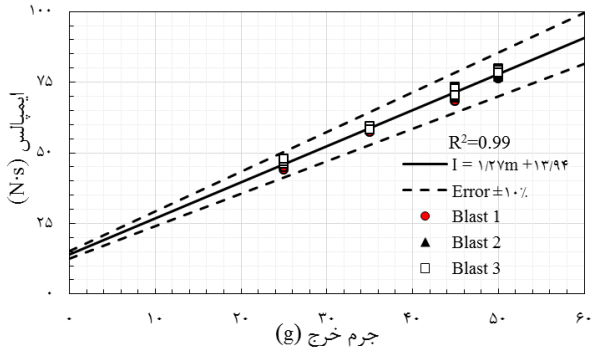
طرز چشمگیری کاهش می‌یابد؛ لذا در انفجارهای مکرر نیز خط جوش‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده عمل می‌کنند و باعث کاهش خیز ورق می‌شوند. این در صورتی است که در ورق تقویت نشده افزایش تعداد بارگذاری منجر به نازک شدگی خطوط مرزی با نگه‌دارنده‌ها می‌شود و حالت اول شکست در نمونه‌ها پدیدار می‌شود که این میزان نازک شدگی با افزایش جرم خرج افزایش‌یافته و حالت‌های دیگر شکست نیز در نمونه‌ها مشاهده می‌شود که درنهایت منجر به پارگی کامل ورق در نمونه MB12 و مشاهده شدن حالت دوم شکست در این نمونه می‌شود. شایان توجه است که در آزمایش‌های انجام‌شده برای جرم خرج ۲۵ گرم، اضافه شدن خط جوش‌ها به ورق از میزان نازک شدگی به میزان قابل‌توجهی در انفجارهای بعدی می‌کاهد. مشاهده دقیق‌تر تصویر ارائه‌شده برای بارگذاری سوم نشان می‌دهد که ساختار تقویت نشده MB3 دچار 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 غیر الاستیک گردید. شایان‌ذکر است که این نازک شدگی با افزایش جرم خرج در نمونه‌های تقویت‌شده نیز مشاهده می‌شود. مطابق با شکل ٧ که برای ساختارهای مختلف تحت بارگذاری یکسان ٥٠ 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 نازک شدگی در لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مود از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام‌شده توسط یوان و نوریک[29] است. شایان توجه است که اثر اضافه نمودن خط جوش به سازه کاملاً در این سری از آزمایش مشهود 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 ٣ 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. به‌عنوان‌مثال 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 دهد بهره‌گیری از خط جوش و چینش آن چگونه روی مود تغییر شکل و سازوکار شکست ورق فولادی اثر می‌گذارد.

۳-۲- رابطه ایمپالس با جرم خرج

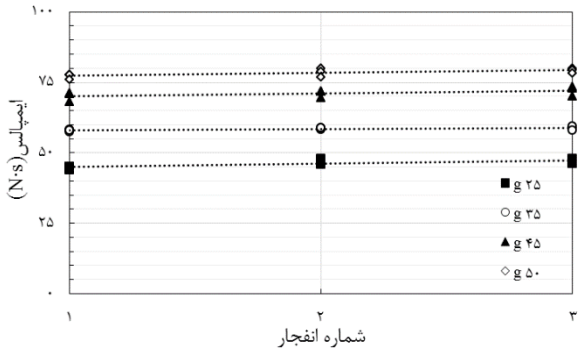
پس از تحلیل و بررسی نتایج تجربی به‌دست‌آمده در جدول ۳، یکی از اساسی‌ترین عوامل مربوط به بارگذاری انفجاری، داشتن برآوردی از مقدار ایمپالس بار وارده برحسب جرم خرج بدون اندازه‌گیری آن است. این بدان جهت است که استفاده از سامانه آونگ بالستیک در کارهای تجربی بسیار دشوار بوده و تخمین میزان ایمپالس از مقدار 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 ۸ نشان داده‌شده 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 انجام‌شده ایمپالس ناشی از انفجار یک گرم نائل به علت محاسبه میزان ایمپالس در حالت کلی، در مقدار ایمپالس لحاظ شده است.

۳-۳- رابطه ایمپالس با تعداد دفعات بارگذاری

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 غیر الاستیک بزرگ شدند و پروفیل تغییر شکل آن‌ها به‌صورت گنبدی شکل بود. در شکل ۹، مقدار ایمپالس برحسب دفعات بارگذاری برای هر سه ساختار نمایش داده‌شده 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 به ذکر است که ناحیه ورق تحت بار انفجاری در طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته‌شده است.



شکل ۸) رابطه بین ایمپالس و جرم خرج برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت



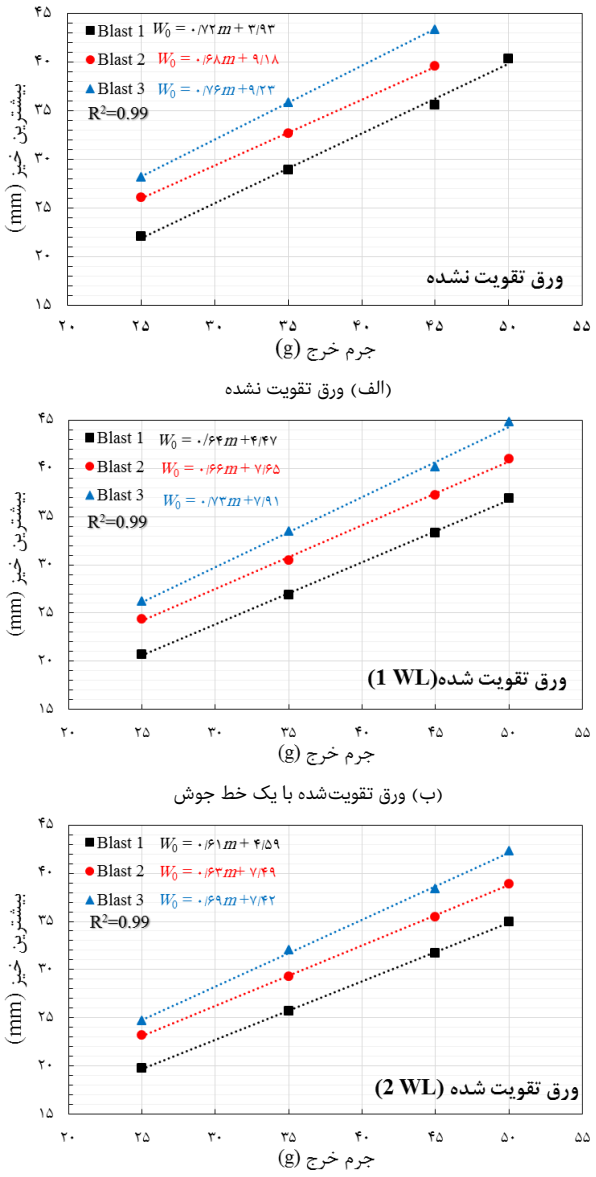
شکل ۹) رابطه بین ایمپالس و تعداد دفعات بارگذاری برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت

۳-۴- رابطه جرم خرج با بیشترین خیز دائمی

در این بخش، 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 ۱۰ نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق برحسب جرم خرج و ایمپالس برای هر سه ساختار ترسیم‌شده است.

در حالت کلی، در شکل ۱۰، 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. مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ورق‌های تقویت نشده فولادی باضخامت ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۳۱ % ، ٦١ % و ۸۳ % به ترتیب در جرم خرج‌های ۳۵، ٤٥ 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 ٥٤٪ است. لازم به توضیح است که این ورق قابلیت تحمل بارگذاری سوم برای جرم خرج ۵۰ گرم بیشتر را ندارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ورق‌های تقویت‌شده 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، ٤٥ 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 به‌دست‌آمده برای ورق‌های تقویت‌شده 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، ٤٥ و ۵۰ گرم در مقایسه با جرم خرج ۲۵ گرم می‌شود؛ همچنین این مقادیر برای

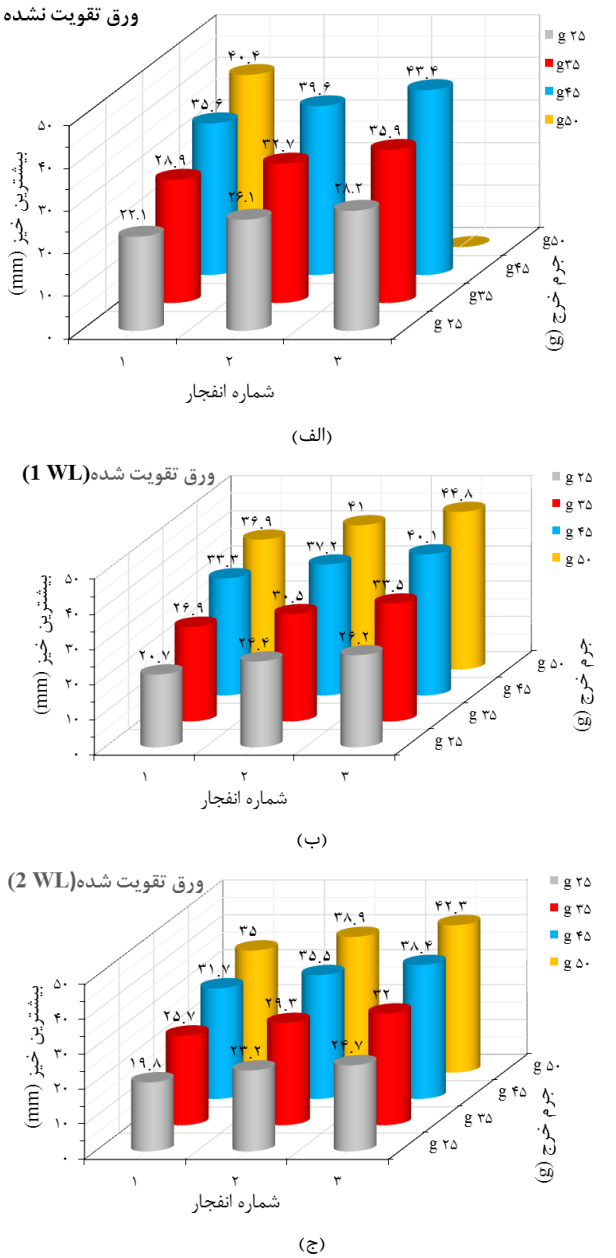
انفجار دوم به ترتیب ۲۶ % ، ۵۵ % و ۶۸ % و برای انفجار سوم ۳۰ % ، ۵۵ % و ۷۱ % است.



شکل ۱۰) رابطه بین ایمپالس و جرم خرج برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت

۵-۳- رابطه تعداد خط جوش با بیشترین خیز دائمی و خیز تدریجی

همان‌طور که در بخش ۳-۱ دیده شد، افزودن خط جوش به سازه اثر چشم‌گیری روی تغییر مود تغییر شکل و سازوکار شکست ورق در مقایسه با نمونه تقویت نشده دارد؛ لذا در این بخش، نتایج تجربی برای هر جرم خرج به‌صورت جداگانه تحلیل و بررسی می‌شود تا اثر این مطلب بیشتر مشخص گردد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، در شکل ۱۱، تغییرات بیشترین خیز دائمی با تعداد بارگذاری برای نمونه تحت بار انفجاری با جرم خرج‌های ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم به تصویر کشیده شده است.



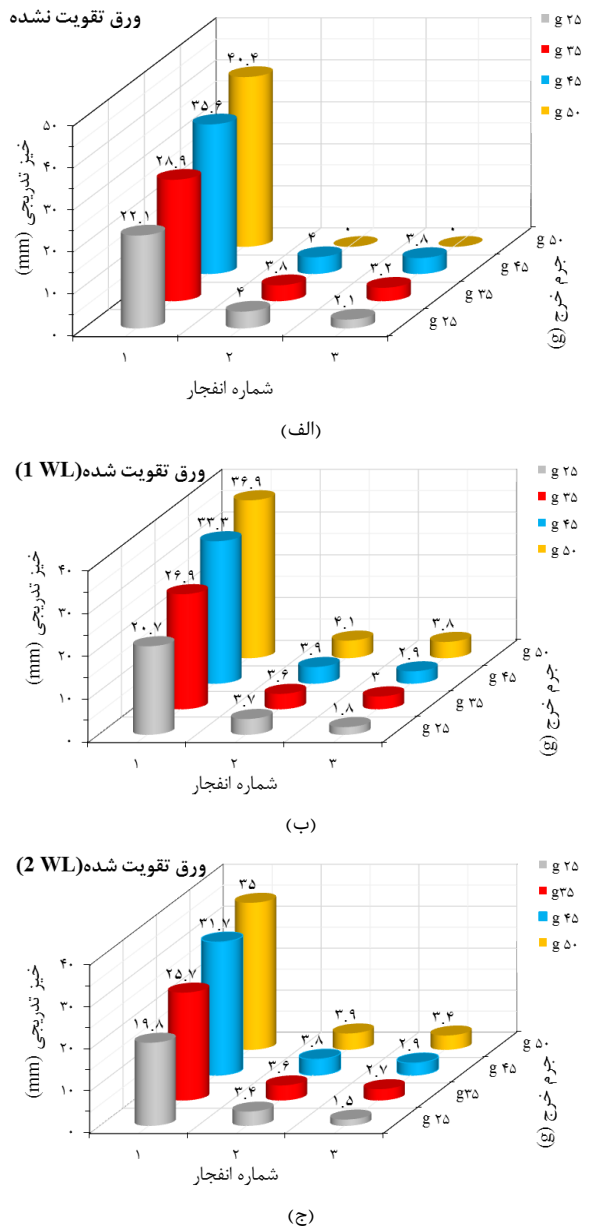
شکل ۱۱) رابطه بین تعداد خط جوش با بیشترین خیز دائمی برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت؛ الف) ورق تقویت نشده، ب) ورق تقویت‌شده با یک خط جوش، ج) ورق تقویت‌شده با دو خط جوش.

در حالت کلی مشاهده می‌شود که بیشترین خیز دائمی ورق‌های تقویت نشده نسبتاً بیشتر از ساختارهای تقویت‌شده است و با اضافه شدن خط جوش‌ها بیشترین خیز دائمی در دو ساختار دیگر به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. به‌طور 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 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 بیان‌شده 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 به‌جای یک خط جوش منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان تقریباً ۵ % در تمامی حالت‌های بارگذاری می‌شود.

در ادامه و در شکل ۱۲، تغییرات خیز تدریجی با تعداد بارگذاری برای نمونه تحت بار انفجاری با جرم خرج‌های ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ گرم به تصویر کشیده شده است. 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 مشاهده می‌شود که خیز تدریجی ورق‌های تقویت نشده نسبتاً بیشتر از ساختارهای تقویت‌شده است و با اضافه شدن خط جوش‌ها، خیز تدریجی نیز مشابه با بیشتـــــرین 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 منجر به کاهش خیز تدریجی به میزان ۲ % و ۵ % در انفجار دوم و ۲۴ % و ۲۴ % در انفجار سوم می‌گردد. علاوه بر تنش‌های پسماند و کار سختی که پس از هر انفجار اتفاق می‌افتد، یکی دیگر از دلایل این‌که در ورق‌های دارای خط جوش خیز ورق کمتر است این است که خط جوش باعث افزایش ضخامت ورق و در نتیجه افزایش ممان ورق می‌شود که مقاومت بیشتری نسبت به ورق بدون خط جوش در برابر انفجار از خود

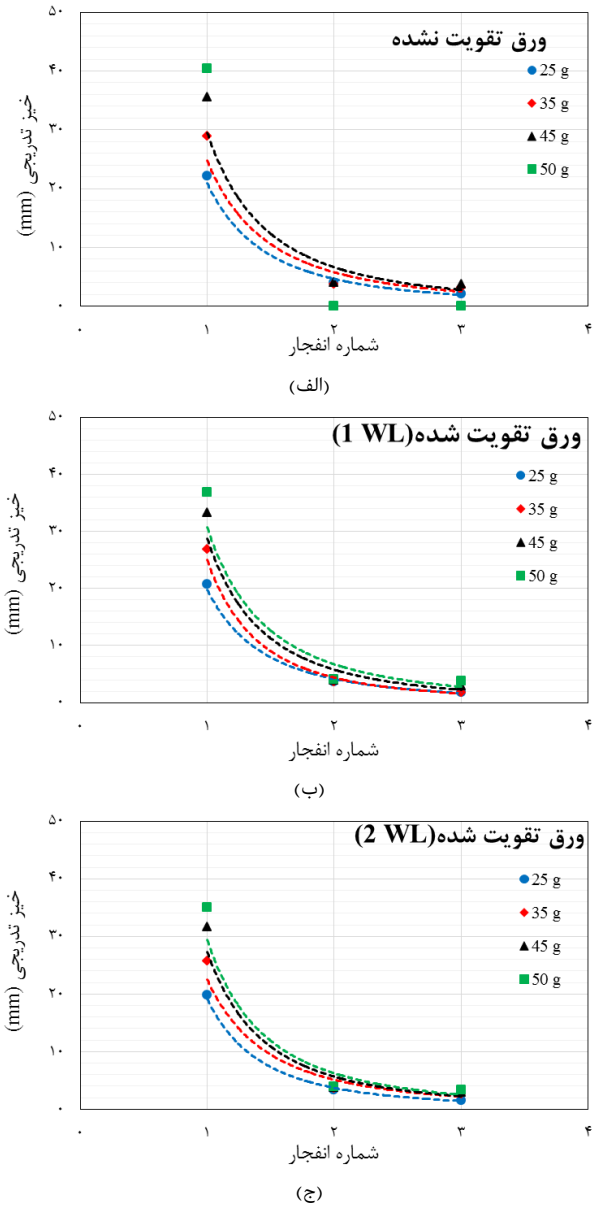


شکل ۱۲) رابطه بین تعداد خط جوش با خیر تدریجی برای ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت؛ الف) ورق تقویت نشده، ب) ورق تقویت‌شده با یک خط جوش، ج) ورق تقویت‌شده با دو خط جوش.

نشان می‌دهد. باید توجه کرد که این افزایش مقاومت علی رغم اثرات حرارت بالای جوش اتفاق می افتد.

۶-۳- رابطه تعداد بارگذاری و بیشترین خیز دائمی

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 موردبررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور در شکل ۱۳ نمودار خیز دائمی تدریجی برحسب تعداد انفجار برای هر سه ساختار در جرم خرج‌های مختلف ترسیم شده است.



شکل ۱۳) رابطه بین تعداد بارگذاری با بیشترین خیز 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.

مطابق با شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود، خیز دائمی تدریجی برای تمامی نمونه‌های آزمایشی تقریباً از یک‌روند نمایی کاهشی پیروی می‌کند به‌طوری‌که 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. 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 ۱۱ و نتایج جدول۳ 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 ۲٤٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۱۱٪ و ۲۲٪ برای جرم خرج ٤٥ 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 ٤٨ % برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۸۷ % و ١٦ % برای جرم خرج ۳۵ گرم و ۸۹ % و ۵ % برای جرم خرج ٤٥ گرم در مقایسه با مرحله قبلی انفجار می‌گردد. این در صورتی است که برای ساختارهای تقویت‌شده با یک خط جـوش، 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 گرم، ۱۲٪ و ۲۰٪ برای جرم خرج ٤٥ 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 غیر الاستیک بزرگ همراه با گلویی 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 ۲٦ % برای جرم خرج ٤٥ 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، ۱٤٪ و ۲۵٪ برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۱۲٪ و ۲۱٪ برای جرم خرج ٤٥ 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 غیر الاستیک بزرگ همراه با گلویی 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 ٥٦ % برای جرم خرج ۲۵ گرم، ۸٦ % و ۲۵ % برای جرم خرج ۳۵ گرم، ۸۸ % و ۲٤ % برای جرم خرج ٤٥ گرم و ۸۹ % و

۱۳ % برای جرم خرج ۵۰ گرم در مقایسه با مرحله قبلی انفجار می‌گردد.

۴- 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 پرداخته‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که خیز دائمی ورق در نقطه میانی با افزایش تعداد بارگذاری انفجاری، افزایش می‌یابد به‌طوری‌که بیشترین مقدار در اولین بارگذاری و 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 دانست. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر دفعه بارگذاری انفجاری در ورق افزایش‌یافته 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 درنتیجه آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به‌صورت 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 (تک خط و یا دو خط) 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. به‌عنوان‌مثال 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 دهد بهره‌گیری از خط جوش و چینش آن چگونه روی مود تغییر شکل و سازوکار شکست ورق فولادی اثر می‌گذارد. همچنین، نمودار ایمپالس برحسب تعداد انفجارها نشان می‌دهد با افزایش تعداد انفجارها به ذکرشده، شیب‌های خطی ناچیزی کاهش می‌یابد. بااین‌حال، 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.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: این مقاله هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

سهم نویسندگان: منصور به تاج (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی، نگارنده مقدمه، تحلیلگر آماری (۶۰%)، هاشم بابایی (نویسنده دوم)، روش‌شناس، پژوهشگر کمکی (۱۵%)، توحید میرزابابای مستوفی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی، نگارنده بحث (۲۵%).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین‌شده است.

۵- منابع

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- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020 ;234(5):1102-11.

6- Jones N. Structural impact. Cambridge university press; 2012.

7- Yuen SC, Nurick GN, Langdon GS, 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 YP. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and

plates. Archive of Applied Mechanics. 1998 ;68(7):524-38.
9- Rajendran R, Lee JM. Blast loaded plates. Marine Structures. 2009 ;22(2):99-127.
10- 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.
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- Yuen SC, Nurick GN, Verster W, Jacob N, Vara AR, Balden VH, Bwalya D, Govender RA, Pittermann M. Deformation of mild steel plates subjected to large-scale explosions. International journal of impact engineering. 2008 ;35(8):684-703.
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 AG, 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- Soutis C, Mohamed G, Hodzic A. Modelling the structural response of GLARE panels to blast load. Composite Structures. 2011 ;94(1):267-76.
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 LA, Langdon GS, Curry RJ, 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.
20- Yuen SC, Nurick GN. 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 GS, Yuen SC, Nurick GN. 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 GS, Lee WC, Louca LA. 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. Large inelastic deformation of aluminium alloy plates in high-speed vessels subjected to slamming. Journal of Marine Science and Technology. 2017 :301-12.
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, Dong A, Villavicencio R, Liu K, Guedes Soares C. Experimental and numerical study on the penetration of stiffened aluminium alloy plates punched by a hemi-cylindrical indenter. Ships and Offshore Structures. 2020 :1-4.
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 :1-0.
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 RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. International Journal of Impact Engineering. 1991 ;11(1):77-91.
29- Teeling-Smith RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. International Journal of Impact Engineering. 1991 ;11(1):77-91.
30- Safari KH, Zamani J, Khalili SM, Jalili S. Experimental, theoretical, and numerical studies on the response of square plates subjected to blast loading. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2011 ;46(8):805-16.
31- Ashani JZ, Ghamsari AK. Theoretical and experimental analysis of plastic response of isotropic circular plates subjected to underwater explosion loading. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe. 2008 ;39(2):171-5.
32- Zamani J, Safari KH, Ghamsari AK, Zamiri A. Experimental analysis of clamped AA5010 and steel plates subjected to blast loading and underwater explosion. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2011 ;46(3):201-12.
33- Henchie TF, Yuen SC, Nurick GN, Ranwaha N, Balden VH. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study. International Journal of Impact Engineering. 2014 ;74:36-45.
34- 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.
35- Akselsen OM, Grong Ø, Ryum N, Christensen N. HAZ grain growth mechanisms in welding of low carbon microalloyed steels. Acta Metallurgica. 1986 ;34(9):1807-15.

36- Thaulow C, Paauw AJ, Gunleiksrud Å, Naess OJ. Heat affected zone toughness of a low carbon microalloyed steel. Metal construction. 1985 ;17(2):94R-9R.
37- Olabi AG, Hashmi MS. The microstructure and mechanical properties of low carbon steel welded components after the application of PWHTs. Journal of materials processing technology. 1996 ;56(1-4):88-97.
38- Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh SH, 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.
39- Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M. Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. Geomechanics & engineering. 2015;9(2):207-18.