



بررسی تجربی و مدل سازی ریاضی پاسخ ورق های فلزی مدور تحت بارگذاری دینامیکی شدید پی در پی

مجتبی ضیاء شمایی^۱، هاشم بابایی*^۱، توحید میرزابابایی مستوفی^۲، حسین خدارحمی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳

کلمات کلیدی:

بارگذاری دینامیکی شدید
بارگذاری پی در پی
ورق مدور
مدل سازی ریاضی
تحلیل ابعادی

خلاصه: در پژوهش حاضر، رفتار پلاستیک ورق های مدور تحت بارگذاری دفعی مکرر بررسی شده است. در بخش تجربی از سامانه پاندول بالستیک جهت اعمال بار دینامیکی و ورق های آلایژ آلومینیوم استفاده شد. جهت بررسی پروفیل تغییر شکل و الگوی شکست نمونه ها، بار دینامیکی در محدوده وسیعی از ۶/۴۹ تا ۲۴/۶۹ نیوتن در ثانیه اعمال شد. جهت بررسی رفتار تحت بارگذاری مکرر، هر آزمایش تا ۵ دفعه بارگذاری ادامه پیدا کرد. مشاهدات تجربی بیانگر تغییر شکل پلاستیک بزرگ سازه همراه با نازک شدن نمونه های آزمایشی در مرزهای گیردار و همچنین پارگی برخی در همین ناحیه است. نتایج مشخص کرد که با افزایش تعداد دفعات انفجار و جرم خرج، خیز دائمی افزایش می یابد ولی خیز پیش رونده ورق به صورت نمایی کاهش می یابد. در بخش مدل سازی، با بهره گیری از روش تحلیل ابعادی، روابطی با فرم بسته بر مبنای اعداد بدون بعد به منظور پیش بینی بیشترین خیز دائمی ورق استخراج شد که بر اساس مراجع موجود، تاکنون در ادبیات موضوع ارائه نشده است. در این روابط، تأثیر پارامترهای مختلف مانند هندسه ورق، اینرسی بار اعمال شده و حساسیت ماده به نرخ کرنش در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی نشان داد که توافق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و پیش بینی های مدل حاصل شده است.

۱- مقدمه

مطالعه اثر بار انفجاری روی ساختارهای مختلف مورد توجه تعداد زیادی از محققان بوده است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نشان می دهد 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 می باشد. البته زمانی نیز یک سازه در برابر چند بارگذاری انفجاری در زمان های مختلف قرار می گیرد که با توجه به تغییرات به وجود آمده در ساختار سازه در بارگذاری انفجاری اول، بررسی رفتار آن سازه را در برابر بارگذاری های انفجاری بعدی پیچیده تر می شود؛ لذا مطالعه یک ساختار در مقابل بارگذاری انفجاری مکرر به منظور پیش بینی تخریب سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به توضیحات ارائه شده و احساس نیاز به تحقیق در این حوزه به علت بالابردن مقاومت انفجاری سازه ها در برابر بار انفجاری به خصوص در زمان حملات تروریستی و هوایی در صنایع نظامی، هدف کلی تحقیقات در سال های اخیر، مطالعه پاسخ دینامیکی ساختارها

تحت بارگذاری انفجاری چند مرحله ای یا مکرر است. البته بررسی منابع در این زمینه نشان می دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی روی مکرر بودن این نوع بارگذاری انجام شده است.

در منابع [۵-۱]، تحقیقات تجربی و تحلیلی توسط محققین در زمینه بررسی بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی روی سازه های چهار گوش و دایره ای مختلف پرداخته شده است. جونز [۶]، نوریکی [۷]، ژائو [۸] و راجندران و [۹]، به بررسی تحلیلی و تجربی اثر بار انفجاری بر روی ورق پرداختند. مطالعات بیشتر [۱۴-۱۰]، به بررسی اثر شرایط مرزی ورق، سطح مواجهه ورق (دایروی، مستطیلی، مربعی) و نوع بارگذاری های مختلف انفجاری با استفاده از نرم افزارهای المان محدود و آزمایش انجام شده است و مدل های تحلیلی نیز ارائه شده است. محققینی [۱۸-۱۵] با استفاده از نرم افزار اتوداین و آباکوس به مدل سازی بار انفجاری روی سازه پرداخته و پروفیل فشار بار انفجاری نسبت به زمان و مکان ارائه شده است. البته این شبیه سازی ها قبلاً با نتایج تجربی صحنه گذاری شده است. البته با توجه به زمان بردن نحوه مدل سازی بالا استفاده از روش کانوپ با لحاظ کردن شرایطی می تواند

* نویسنده عهده دار مکاتبات: ghbabaei@guilan.ac.ir

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 تی‌ان‌تی معادل می‌گردد و از اثرات انعکاس موج انفجاری روی سازه صرف‌نظر می‌گردد [۱۹].

در سال ۲۰۱۴، هنشیه و همکاران [۲۰] به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر بر روی ورق فولادی دایروی پرداختند. ورق دایروی مورد مطالعه آن‌ها از جنس فولاد با ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر بوده که توسط دستگاه آونگ بالستیک در معرض ۵ مرتبه بار انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت قرار گرفت. به‌طور کلی، تغییر شکل پلاستیک ورق‌ها به‌صورت نازک‌شدگی در قسمت‌های گیردار و گاهی هم به‌صورت پارگی بروز پیدا می‌کرد. با افزایش میزان و تعداد بار انفجاری انحراف بیشتری در میزان جابجایی ورق دیده می‌شد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش تعداد انفجار روی ورق، نرخ افزایش انحراف سطح ورق در نقطه میانی کاهش و سختی و یکرز ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد. در ادامه در سال ۲۰۱۷، ترانگ و همکاران [۲۱] به مطالعه تغییر شکل دائمی ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری دفعی مکرر ناشی از ضربه زننده پرداختند. در این تحقیق معادلات فرم بسته دقیق ساده‌ای برای پیش‌بینی تغییر شکل دائمی ناشی از بارگذاری دفعی مکرر از نتایج مطالعه پارامتریک به دست آوردند. در بخش مدل‌سازی تجربی بر مبنای اعداد بدون بعد، مؤثرترین تحقیقات انجام‌گرفته در ادبیات تحقیق در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود. در سال ۱۹۸۹، نوریک و همکارانش [۲۲] با فرض شکل مد متغیر در روش تقریبی و در نظر گرفتن هم‌زمان جابجایی‌های قائم و افقی، مدل‌هایی برای ورق‌های دایروی و مستطیلی ارائه کردند [۲۳] که در آن شکل مد در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. در سال ۲۰۰۰، لی و جونز، یک تحلیل بی‌بعد کلی برای پیش‌بینی رفتارهای دینامیکی و شکست ساختارهای مختلف ارائه کردند [۲۴]. در سال ۲۰۰۶، پارک و چو یک عدد بی‌بعد مشابه عدد بی‌بعد نوریک برای ورق‌های تک لایه تحت بار انفجاری یکنواخت ارائه کردند که در آن نسبت طول به عرض ورق نیز اضافه شده بود [۲۵]. در سال ۲۰۰۷، ژاکوب و همکارانش [۲۶] اثر فاصله استقرار و جرم خرج را بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بار انفجاری بررسی کردند.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه شکل‌دهی سازه‌ها تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر مربوط به ساختارهای تک‌لایه فولادی یا کامپوزیتی بوده و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی مکرر با توزیع

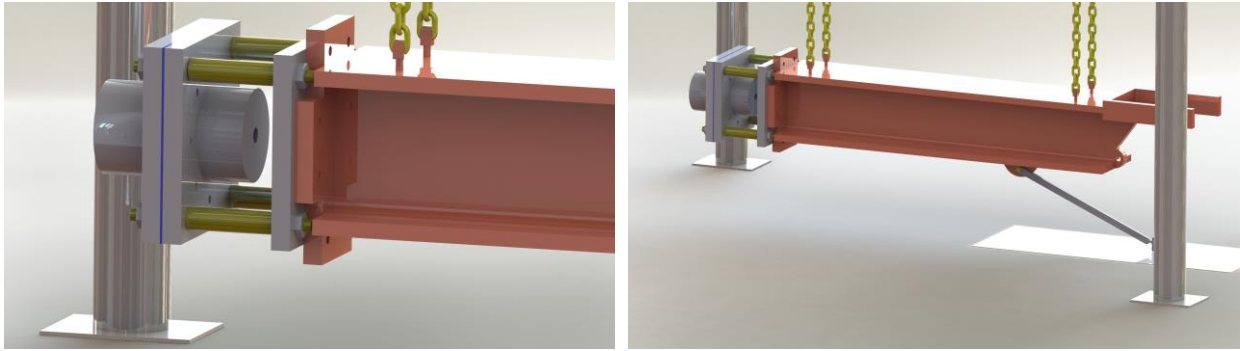
یکنواخت انجام نشده است. لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای دایره‌ای آلومینیومی به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه‌بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری و بررسی اثرگذاری آن‌ها روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش‌های مختلف تجربی و مدل‌سازی تجربی بر مبنای تحلیلی ابعادی به شرح زیر است: (۱) بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای آلومینیومی تک‌لایه تحت بار دینامیکی یکنواخت منفرد و مکرر و مقایسه عملکرد آن‌ها با ساختارهای چندلایه، (۲) ارائه اعداد بی‌بعد جدید جهت تحلیل ابعادی پاسخ پلاستیک ساختارهای تک‌لایه دایره‌ای تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر و تعمیم آن‌ها برای ساختارهای چندلایه. لازم به توضیح است که مدل‌های تجربی بر مبنای تحلیل ابعادی و از بی‌بعد سازی معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به دست می‌آیند.

۲- مطالعه تجربی

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

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

سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به‌وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به‌صورت افقی آویزان است. یک سمت پاندول قلم و کاغذ جهت ثبت حرکت پاندول نصب‌شده که دامنه حرکت رفت‌وبرگشت پاندول توسط قلم، روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده شده است، ثبت می‌شود. سمت دیگر پاندول یک صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر متصل است. روی این صفحه چهار میله فولادی به قطر ۱۵ میلی‌متر نصب‌شده که به‌صورت نر و ماده به گیره ورق متصل می‌شود. گیره ورق از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل شده است. وسط



شکل ۱. شماتیک سامانه آونگ بالستیک آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان

Fig. 1. Schematic of the ballistic pendulum at the Impact and Blast Laboratory of University of Guilan (IBLUG)



شکل ۲. لوله فولادی جهت ایجاد فاصله استقرار خرج تا ورق

Fig. 2. Mild steel blast tubes used for standoff distance

دیسکی به قطر ۳۵ میلی‌متر درآورده شده و روی صفحه پلی‌استری پهن شده است. در بخش دوم، برای تحریک ماده منفجره از چاشنی نمره ۸ نانل و به همراه دستگاه تحریک نانل استفاده می‌شود. در واحد شکل‌دهی، ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای بین دو صفحه فولادی ضخیم با ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده شده و با ۷ عدد پیچ M8 ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به‌صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده‌است. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌های انفجاری، توسط کولیس ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری شده‌است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس آلیاژ آلومینیوم (Al-1050) در ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد 250×250 میلی‌متر مربع برش زده شدند.

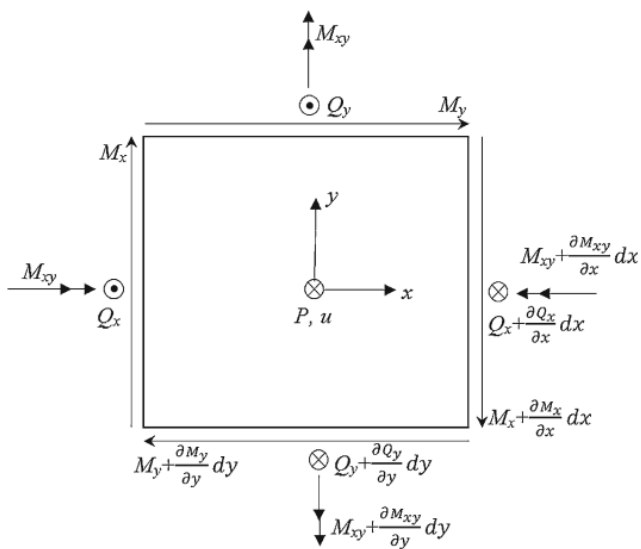
هر دو صفحه برحسب نوع تغییر شکل ورق منفذی جهت اعمال بار و خروج صفحه تعبیه شده‌است. همچنین در صفحه جلویی گیره ورق رزوه‌هایی جهت نصب لوله‌های استقرار خرج در نظر گرفته شده‌است. در برخی از موارد با بکاربردن لوله‌های بلند استقرار خرج، پاندول از حالت تعادل خارج می‌شود. برای رفع این مسئله در سمت دیگر آن از وزنه‌هایی جهت برقراری تعادل استفاده می‌شود.

در تحقیق حاضر از دو لوله به قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۲۰ میلی‌متر و طول‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه و همچنین یکنواخت کردن توزیع بار می‌باشد، استفاده شده‌است. طول‌های مختلف برای لوله این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر فاصله خرج روی میزان تغییر شکل پلاستیک سازه را بررسی نمود. شایان توجه است که با توجه به پیشینه [۷، ۱۲، ۱۹، ۲۲، ۲۳ و ۲۶]، در صورتی که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از شعاع باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد. نمونه‌هایی از این لوله‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده‌است. سامانه آزمایشی آونگ بالستیک شامل چهار بخش است: (۱) واحد اعمال بار انفجاری جایگذاری خرج، (۲) سیستم تحریک خرج انفجار با قابلیت کنترل از راه دور (۳) واحد اندازه‌گیری دامنه نوسان (۴) واحد شکل‌دهی و نگهدارنده‌ها. در بخش اعمال بار، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده می‌شود. در تحقیق حاضر ماده منفجره بکارگرفته شده برای انجام آزمایش‌های تجربی C4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری شکل‌بودن آن با دست به‌صورت

جدول ۱. گروه‌های آزمایشی

Table 1. Experimental groups

تعداد آزمایش	فاصله استقرار (mm)	جرم خرج (g)	نسبت ضخامت به قطر هر لایه	قطر مواجهه ورق (mm)	ضخامت هر لایه (mm)	گروه آزمایشی
۱۲	۳۰۰	۳ و ۲، ۱/۵	۰/۰۲	۱۰۰	۲	S2
۸	۳۰۰	۷/۵ و ۵	۰/۰۲	۱۰۰	۳	S3
۳	۲۰۰	۵	۰/۰۲	۱۰۰	۳	S3
۱۸	۲۰۰	۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵	۰/۰۲	۱۰۰	۲	D22
۵	۳۰۰	۱۰	۰/۰۲	۱۰۰	۲	D22
۱۶	۲۰۰	۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵	۰/۰۲	۱۰۰	۲	T222
۵	۳۰۰	۱۰	۰/۰۲	۱۰۰	۲	T222



شکل ۳. تحلیل نیرویی برای یک المان از ورق

Fig. 3. Free diagram for an element of a plate

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = Q_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = Q_y \quad (2)$$

نمونه‌های آزمایشی دارای سطح شکل‌گیری یا مواجهه دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر هستند.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده و مطابق با جدول ۱، ۶۷ ساختار تک‌لایه، دو لایه و سه لایه آلومینیومی در سه گروه‌بندی S، D و T به‌منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر طراحی و ساخته شده‌اند.

هر گروه آزمایشی تحت چندین بارگذاری با جرم خرج‌های ۱/۵، ۲، ۳، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم موردبررسی قرار گرفته‌است. شایان توجه است که در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته بر میزان اثر بارگذاری دفعی مکرر روی مقاومت انفجاری ساختارها است

۳- تحلیل و مدل‌سازی بی‌بعد

۳-۱- ارائه اعداد بی‌بعد برای ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بارگذاری انفجاری مکرر

با توجه به پیچیدگی هندسه ورق‌های دایره‌ای برای تحلیل، اعداد بی‌بعد ابتدا برای یک ورق مربعی استخراج و سپس این اعداد برای ورق‌های دایره‌ای تعمیم داده می‌شود. مطابق شکل ۳، تحلیل نیرویی برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به‌صورت روابط (۱) تا (۳) ارائه می‌شود که با جایگذاری رابطه (۱) و (۲) در (۳)، معادله به فرم رابطه (۴) تبدیل می‌گردد [۲۷-۲۹].

بزرگ ورق بوده، لذا افزودن نیروهای غشایی (N_x ، N_y ، N_{xy}) در معادله (۴) الزامی است و معادله (۴) به صورت معادله (۵) تغییر می‌کند [۲۹-۲۷].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} \\ & + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ & + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \end{aligned} \quad (5)$$

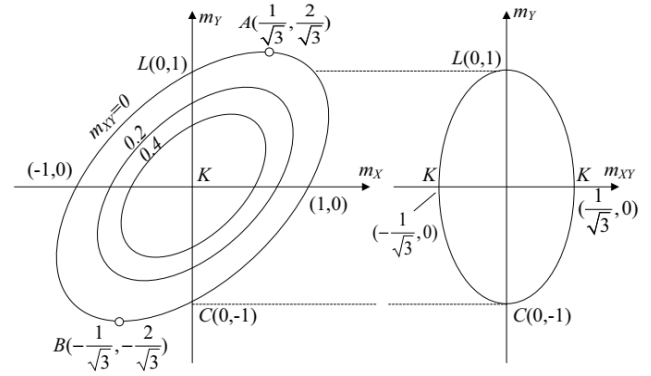
با معرفی نمودن پارامترهای بی‌بعد نظیر $X = x/L$ ، $Y = y/L$ ، $n_y = N_y/N_0$ ، $n_x = N_x/N_0$ ، $T = C_s t/H$ ، $W = w/H$ ، $n_{xy} = N_{xy}/N_0$ معادله حاکم بر ورق به فرم بی‌بعد معادله (۶) تبدیل می‌شود. در پارامترهای بی‌بعد ذکر شده، L نصف طول ورق مربعی، N_0 نیروی غشایی کاملاً پلاستیک که برابر است با $\sigma_0 H$ ، C_s سرعت صوت در محیط، X و Y مختصات بی‌بعد، T زمان بی‌بعد و W خیز بی‌بعد هستند. همچنین، m_x ، m_y و m_{xy} گشتاورهای خمشی بی‌بعد و n_x ، n_y و n_{xy} نیروهای غشایی بی‌بعد هستند.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} \\ & + 4 \left(n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = \\ & 4 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \left(\frac{\rho C_s^2}{\sigma_0} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_0} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

در ادامه، جهت افزودن اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش، رابطه ۵ به صورت معادله (۶) تغییر می‌کند.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + \\ & 4 \left(n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = \\ & 4 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \left(\frac{\rho C_s^2}{\sigma_d} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_d} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

همان‌طور که از معادله (۷) برمی‌آید، سه عبارت در سمت راست 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



شکل ۴. شماتیک معیار فون-مایسز

Fig. 4. Schematic of von Mises criterion

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + P = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \quad (4)$$

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 به عنوان نیروهای عامل در نظر گرفته می‌شوند، جریان پلاستیک دینامیکی ماده توسط گشتاورهای خمشی M_x ، M_y و M_{xy} کنترل می‌شود. بر این اساس شماتیک معیار عملکرد فون-مایسز در فضای نیروی سه‌بعدی عمومی برای جریان پلاستیک در شکل ۴ 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 است که به راحتی از رابطه $\sigma_0 H^2/4$ قابل محاسبه است [۲۹]. 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 ۴، 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

$$\psi_{c,s} = \left(\frac{R}{H}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi}\right)^{C_3} \quad (13)$$

لازم به توضیح است که اعداد بی بعد $\psi_{c,s}$ برای تحلیل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت پیشنهاد شده که از معادله بی بعد حاکم بر ورق استخراج شده‌اند. شایان توجه است که در تحلیل ابعادی ساختارهای دایره‌ای چند لایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر نسبت به تحلیل ابعادی ورق‌های تک‌لایه، کمیت‌های فیزیکی بیشتری وارد می‌شود. این کمیت‌ها شامل خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر لایه عقبی و جلویی یا حتی میانی و همچنین تعداد دفعات تکرار بارگذاری (n) که باید در تحلیل رفتار پلاستیک ساختارهای چند لایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی هر کدام از لایه‌های جلویی، میانی و عقبی به ضخامت آن لایه برای ساختارهای دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی دینامیکی یکنواخت مکرر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{W_0}{H} = C_0' \cdot \psi_{c,s}^r \quad (14)$$

$$\frac{W_0}{H_b} = C_0'' \cdot \psi_{c,m}^r \quad (15)$$

که در آن‌ها

$$\psi_{c,s}^r = \left(\frac{R}{H}\right)^{C_1} \cdot \left(n \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi}\right)^{C_3} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \psi_{c,m}^r = & \left(\frac{R}{H_f}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{R}{H_m}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{R}{H_b}\right)^{C_3} \cdot \\ & \left(n \frac{\rho_f V_{0,f}^2}{\sigma_{0,f}}\right)^{C_4} \cdot \left(n \frac{\rho_m V_{0,m}^2}{\sigma_{0,m}}\right)^{C_5} \cdot \\ & \left(n \frac{\rho_b V_{0,b}^2}{\sigma_{0,b}}\right)^{C_6} \cdot \left(\frac{1}{\xi_f}\right)^{C_7} \cdot \left(\frac{1}{\xi_m}\right)^{C_8} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{C_9} \end{aligned} \quad (17)$$

شایان توجه است که رابطه (۱۷) برای یک ساختار سه‌لایه غیر هم‌جنس

فشار دینامیکی متناسب است با ρV_0^2 [۳۰]. این موضوع نشان‌دهنده آن است که پاسخ یک ورق با هر هندسه‌ای تحت بار دینامیکی باید بر مبنای سه عدد فوق‌الذکر بیان گردد. لذا در ادامه می‌توان مقدار کمی تنش تسلیم دینامیکی را بر حسب نرخ کرنش متوسط، ضرایب ماده و هندسه ورق در معادله وارد کرد. اکنون با به‌کارگیری معادله ساختاری کوپر-سیموندز [۳۰-۳۲] و همچنین استفاده از مقدار نرخ کرنش متوسط برای یک ورق دایره‌ای [۳۰]، عدد بی بعد اثر نرخ کرنش ξ به صورت معادله ۱۰ تعریف می‌گردد [۳۲-۳۴].

$$\sigma_d = \sigma_0 \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_m}{D}\right)^{\frac{1}{q}}\right) = \sigma_0 \left(1 + \xi \left(\frac{W_0}{H}\right)^{\frac{1}{q}}\right) \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{V_0 W_0}{3\sqrt{2}R^2} = \frac{I W_0}{3\sqrt{2}\pi\rho H R^4} \quad (9)$$

$$\xi = \left(\frac{I}{3\sqrt{2}\pi\rho R^4 D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (10)$$

با جایگذاری معادلات (۸) و (۱۰) در معادله (۷) و همچنین تغییر طول ورق مربعی به شعاع دایره‌ای، تحلیل ابعادی برای معادله بی بعد حاکم بر ورق دایره‌ای تحت بار دینامیکی یکنواخت منجر می‌شود به:

$$\frac{W_0}{H} = f\left(\frac{R}{H}, \frac{P}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi}\right) = f\left(\frac{R}{H}, \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi}\right) \quad (11)$$

در نهایت، رابطه بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت بر حسب عدد بی بعد $\psi_{c,s}$ برابر است با:

$$\frac{W_0}{H} = C_0 \cdot \psi_{c,s} \quad (12)$$

که در آن

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iN}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (21)$$

شناسایی سیستم و تعیین تابع f باید به گونه‌ای انجام شود که مربع اختلاف میان خروجی واقعی و پیش‌بینی شده حداقل باشد که در رابطه (۲۲) ارائه شده است.

$$\sum_{i=1}^M [\hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iN}) - y_i]^2 \rightarrow \min \quad (22)$$

در مدل‌سازی با استفاده از روش تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد $\pi = \{\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_N\}$ با استفاده از متغیرهای فیزیکی و حقیقی سیستم $\{y, X\} = \{y, x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ تشکیل می‌شود. رابطه بین پارامترهای بی‌بعد به صورت معادله (۲۳)، توسط تابع \hat{f} برقرار می‌شود.

$$\hat{\pi}_{0i} = \hat{f}(\pi_{1i}, \pi_{2i}, \pi_{3i}, \dots, \pi_{Ni}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (23)$$

به طوری که تابع \hat{f} بر اساس رابطه (۲۴) تعیین می‌شود.

$$\sum_{i=1}^M [\hat{f}(\pi_{1i}, \pi_{2i}, \pi_{3i}, \dots, \pi_{Ni}) - \hat{\pi}_{0i}]^2 \rightarrow \min \quad (24)$$

برای استخراج مدل، تابع f به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\pi_0 = C_0 \cdot (\pi_1)^{C_1} \cdot (\pi_2)^{C_2} \cdot (\pi_3)^{C_3} \cdot \dots \cdot (\pi_N)^{C_N} \quad (25)$$

ضرایب مجهول در معادله فوق به گونه‌ای تعیین می‌شود که قاعده کمترین مربعات خطا (معادله ۲۴) برقرار باشد. با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین معادله (۲۵) نتیجه می‌شود:

$$\ln(\pi_0) = \ln(C_0) + C_1 \ln(\pi_1) + C_2 \ln(\pi_2) + \dots + C_N \ln(\pi_N) \quad (26)$$

در نتیجه لازم است که یک دستگاه معادله جبری خطی که شامل $K = N + 1$ مجهول و M معادله است، حل شود. (M تعداد زوج داده‌های ورودی-خروجی است و یا به عبارتی تعداد آزمایش‌های تجربی است).

تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت ارائه شده که دارای سه لایه با سه ماده مختلف است که باید اثر خواص مکانیکی، ضخامت و همچنین حساسیت ماده به نرخ کرنش به معادلات اضافه گردد. این موضوع بدان معناست که برای یک ساختار سه لایه هم‌جنس که در آن ضخامت لایه‌ها برابر باشند ضرورتی بر اضافه کردن اعداد بی‌بعد مربوط لایه‌های میانی و جلویی نیست و رابطه (۱۷) به صورت رابطه (۱۸) ساده می‌گردد.

$$\mu_{c,m}^r = \left(\frac{R}{H_b}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{n}{M} \cdot \frac{\rho_b V_{0,b}^2}{\sigma_{0,b}}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{C_3} \quad (18)$$

لازم به توضیح است که عدد بی‌بعد $\mu_{c,m}^r$ برای تحلیل ورق‌های چندلایه هم‌جنس دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت مکرر با ضخامت یکسان پیشنهاد شده که در آن M تعداد لایه‌ها است. اکنون، هدف به دست آوردن ضرایب مجهول در معادلات (۱۶) و (۱۸) برای ورق‌های تک‌لایه و چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت مکرر است که این مقادیر به راحتی از روش تجزیه مقادیر منفرد بهینه شده قابل محاسبه هستند. این روش در قسمت بعدی به تفصیل بیان شده است.

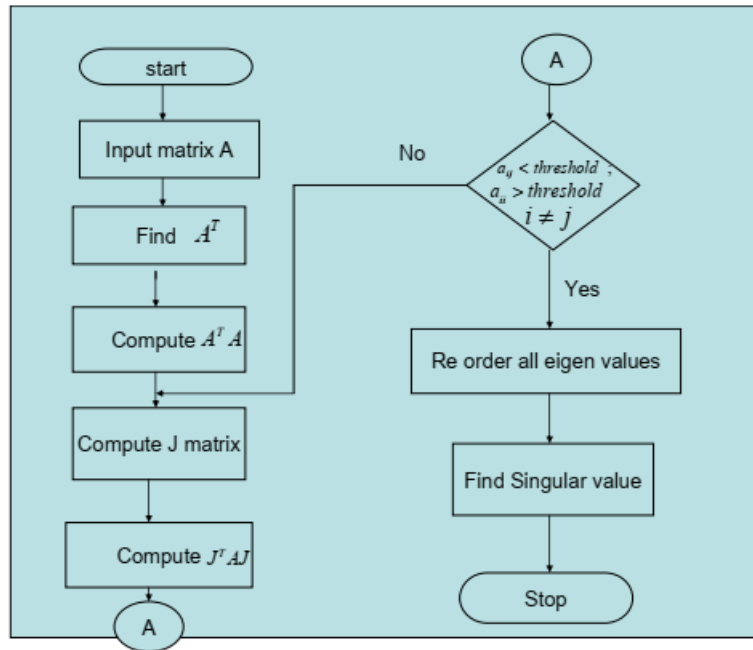
۳-۲- روش تجزیه مقادیر منفرد

به طور کلی هدف از مدل‌سازی، پیدا کردن یک تابع ریاضی \hat{f} است که به موجب آن می‌توان رفتار یک سیستم واقعی f را به صورت تقریبی پیش‌بینی و توصیف کرد. بدین منظور تلاش بر این است تا به ازای هر بردار ورودی معلوم $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ ، مقدار خروجی \hat{y} به گونه‌ای تعیین شود که تا حد امکان به خروجی واقعی سیستم ناشناخته y نزدیک باشد (N تعداد ورودی‌های سیستم است)؛ بنابراین با داشتن M نمونه از این زوج داده‌های چندورودی-تک‌خروجی می‌بایست رابطه زیر برقرار باشد [۲۷، ۳۵]:

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iN}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (19)$$

اکنون به ازای هر بردار ورودی معلوم رابطه (۲۰)، مقادیر خروجی \hat{y}_i را با استفاده از تابع f پیش‌بینی کرد:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iN}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (20)$$



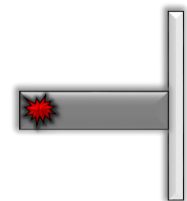
شکل ۵. فلوجارت روش حل ریاضی

Fig. 5. Flowchart of the mathematical solution method

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۲ میلی‌متری

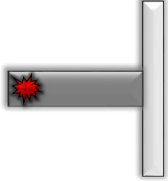
Table 2. Experimental results for 2 mm thick single-layered plates

شماتیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	S2R5M1.5B1H300		۱	۱/۵	۶/۶۱	۳۰۰	۶/۶
	S2R5M1.5B2H300		۲	۱/۵	۶/۴۹	۳۰۰	۸/۱
	S2R5M1.5B3H300	۵	۳	۱/۵	۶/۷۸	۳۰۰	۹/۲
	S2R5M1.5B4H300		۴	۱/۵	۶/۵۳	۳۰۰	۹/۹
	S2R5M1.5B5H300		۵	۱/۵	۶/۶۸	۳۰۰	۱۰/۵
	S2R5M2B1H300		۱	۲	۸/۲۶	۳۰۰	۸/۰
	S2R5M2B2H300		۲	۲	۸/۴۳	۳۰۰	۹/۷
	S2R5M2B3H300	۵	۳	۲	۸/۳۲	۳۰۰	۱۱/۲
	S2R5M2B4H300		۴	۲	۸/۴۶	۳۰۰	۱۲/۵
	S2R5M2B5H300		۵	۲	۸/۱۷	۳۰۰	پارگی
	S2R2M3B1H300		۱	۳	۱۰/۸۳	۳۰۰	۱۱/۵
	S2R2M3B2H300	۲	۲	۳	۱۱/۱۲	۳۰۰	پارگی



جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۲ میلی‌متری

Table 2. Experimental results for 2 mm thick single-layered plates

شما تیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	S3R5M5B1H300		۱	۵	۱۴/۹۸	۳۰۰	۹/۰
	S3R5M5B2H300		۲	۵	۱۵/۰۷	۳۰۰	۱۰/۴
	S3R5M5B3H300	۵	۳	۵	۱۵/۱۶	۳۰۰	۱۱/۷
	S3R5M5B4H300		۴	۵	۱۴/۸۷	۳۰۰	۱۲/۵
	S3R5M5B5H300		۵	۵	۱۵/۱۵	۳۰۰	۱۳/۲
	S3R3M7.5B1H300		۱	۷/۵	۱۹/۱۲	۳۰۰	۱۲/۳
	S3R3M7.5B2H300	۳	۲	۷/۵	۱۹/۳۳	۳۰۰	۱۵/۰
	S3R3M7.5B3H300		۳	۷/۵	۱۹/۰۱	۳۰۰	پارگی

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۳ میلی‌متری

Table 3. Experimental results for 3 mm thick single-layered plates

شما تیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	D33R5M5B1H200		۱	۵	۱۲/۳۴	۲۰۰	۸/۲
	D33R5M5B2H200		۲	۵	۱۲/۴۶	۲۰۰	۹/۸
	D33R5M5B3H200	۵	۳	۵	۱۲/۲۲	۲۰۰	۱۱
	D33R5M5B4H200		۴	۵	۱۲/۳۷	۲۰۰	۱۱/۳
	D33R5M5B5H200		۵	۵	۱۲/۵۴	۲۰۰	۱۱/۸
	D33R5M7.5B1H200		۱	۷/۵	۱۶/۱۱	۲۰۰	۱۱/۰
	D33R5M7.5B2H200		۲	۷/۵	۱۶/۲۵	۲۰۰	۱۳/۹
	D33R5M7.5B3H200	۵	۳	۷/۵	۱۶/۲۸	۲۰۰	۱۵/۹
	D33R5M7.5B4H200		۴	۷/۵	۱۶/۰۳	۲۰۰	۱۷/۱
	D33R5M7.5B5H200		۵	۷/۵	۱۶/۱۹	۲۰۰	۱۸/۲
	D33R5M10B1H200	۵	۱	۱۰	۲۰/۲۶	۲۰۰	۱۳/۸
	D33R5M10B2H200		۲	۱۰	۲۰/۴۳	۲۰۰	۱۸/۱
	D33R5M10B3H200		۳	۱۰	۲۰/۳۵	۲۰۰	۱۹/۹
	D33R5M10B4H200		۴	۱۰	۲۰/۳۹	۲۰۰	۲۱/۵
	D33R5M10B5H200		۵	۱۰	۲۰/۱۱	۲۰۰	پارگی
	D33R5M12.5B1H200	۳	۱	۱۲/۵	۲۴/۴۴	۲۰۰	۱۷/۰
	D33R5M12.5B2H200		۲	۱۲/۵	۲۴/۵۹	۲۰۰	۲۲/۳
	D33R5M12.5B3H200		۳	۱۲/۵	۲۴/۵۷	۲۰۰	پارگی

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های دو لایه ۳+۳ میلی‌متری

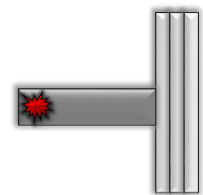
Table 4. Experimental results for 3+3 mm thick double-layered plates

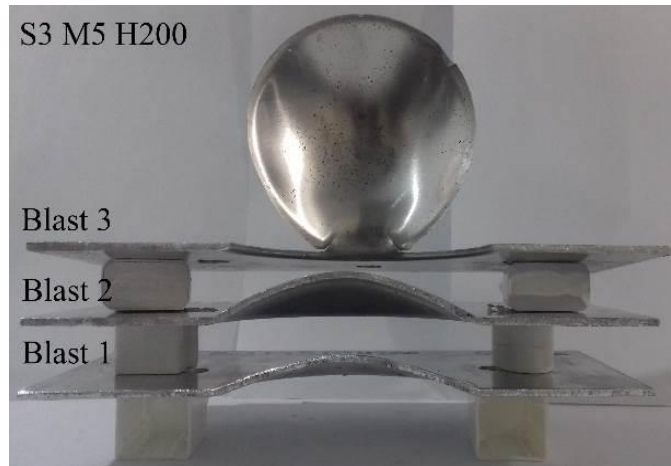
خیز (mm)	فاصله استقرار (mm)	ایمپالس (N·s)	جرم خرج (g)	شماره انفجار	تعداد دفعات انفجار	کد آزمایش	شماتیک ساختار	
۸/۲	۲۰۰	۱۲/۳۴	۵	۱		D33R5M5B1H200		
۹/۸	۲۰۰	۱۲/۴۶	۵	۲		D33R5M5B2H200		
۱۱	۲۰۰	۱۲/۲۲	۵	۳	۵	D33R5M5B3H200		
۱۱/۳	۲۰۰	۱۲/۳۷	۵	۴		D33R5M5B4H200		
۱۱/۸	۲۰۰	۱۲/۵۴	۵	۵		D33R5M5B5H200		
<hr/>								
۱۱/۰	۲۰۰	۱۶/۱۱	۷/۵	۱		D33R5M7.5B1H200		
۱۳/۹	۲۰۰	۱۶/۲۵	۷/۵	۲		D33R5M7.5B2H200		
۱۵/۹	۲۰۰	۱۶/۲۸	۷/۵	۳	۵	D33R5M7.5B3H200		
۱۷/۱	۲۰۰	۱۶/۰۳	۷/۵	۴		D33R5M7.5B4H200		
۱۸/۲	۲۰۰	۱۶/۱۹	۷/۵	۵		D33R5M7.5B5H200		
<hr/>								
۱۳/۸	۲۰۰	۲۰/۲۶	۱۰	۱		D33R5M10B1H200		
۱۸/۱	۲۰۰	۲۰/۴۳	۱۰	۲	۵	D33R5M10B2H200		
۱۹/۹	۲۰۰	۲۰/۳۵	۱۰	۳		D33R5M10B3H200		
۲۱/۵	۲۰۰	۲۰/۳۹	۱۰	۴		D33R5M10B4H200		
پارگی	۲۰۰	۲۰/۱۱	۱۰	۵		D33R5M10B5H200		
<hr/>								
۱۷/۰	۲۰۰	۲۴/۴۴	۱۲/۵	۱	۳	D33R5M12.5B1H200		
۲۲/۳	۲۰۰	۲۴/۵۹	۱۲/۵	۲		D33R5M12.5B2H200		
پارگی	۲۰۰	۲۴/۵۷	۱۲/۵	۳		D33R5M12.5B3H200		

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های سه لایه ۲+۲+۲ میلی‌متری

Table 5. Experimental results for 2+2+2 mm thick triple-layered plates

شما تیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	T222R5M5B1H200		۱	۵	۱۲/۳۹	۲۰۰	۹/۰
	T222R5M5B2H200		۲	۵	۱۲/۵۳	۲۰۰	۱۰/۸
	T222R5M5B3H200	۵	۳	۵	۱۲/۳۷	۲۰۰	۱۱/۹
	T222R5M5B4H200		۴	۵	۱۲/۶۱	۲۰۰	۱۲/۹
	T222R5M5B5H200		۵	۵	۱۲/۴۸	۲۰۰	۱۳/۶
	T222R5M7.5B1H200		۱	۷/۵	۱۶/۳۲	۲۰۰	۱۱/۷
	T222R5M7.5B2H200		۲	۷/۵	۱۶/۱۶	۲۰۰	۱۴/۹
	T222R5M7.5B3H200	۵	۳	۷/۵	۱۶/۴۲	۲۰۰	۱۶/۶
	T222R5M7.5B4H200		۴	۷/۵	۱۶/۰۵	۲۰۰	۱۷/۸
	T222R5M7.5B5H200		۵	۷/۵	۱۶/۲۸	۲۰۰	پارگی
	T222R4M10B1H200	۴	۱	۱۰	۲۰/۳۵	۲۰۰	۱۴/۴
	T222R4M10B2H200		۲	۱۰	۲۰/۵۶	۲۰۰	۱۸/۸
	T222R4M10B3H200		۳	۱۰	۲۰/۲۱	۲۰۰	۲۰/۶
	T222R4M10B4H200		۴	۱۰	۲۰/۴۸	۲۰۰	پارگی
	T222R2M12.5B1H200	۲	۱	۱۲/۵	۲۴/۶۹	۲۰۰	۱۸/۰
	T222R2M12.5B2H200		۲	۱۲/۵	۲۴/۵۸	۲۰۰	پارگی





شکل ۶. نمونه‌ای از ساختارهای تک‌لایه آلومینیومی تغییر شکل یافته

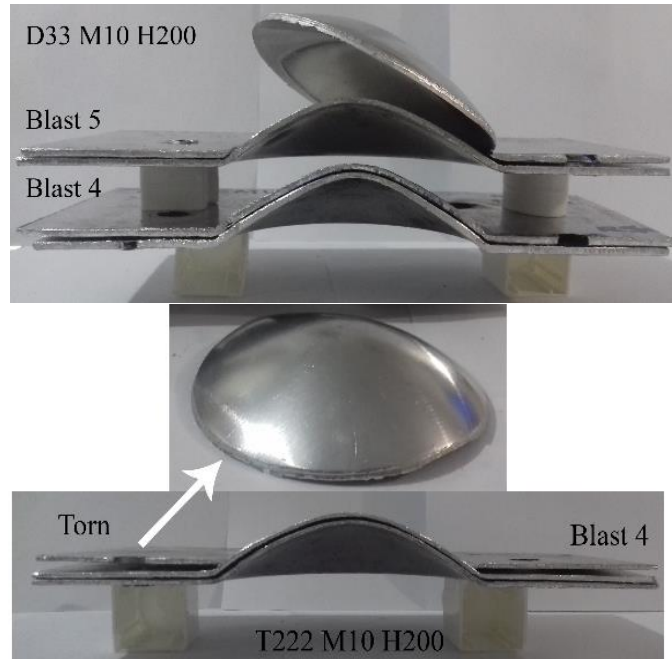
Fig. 6. A typical deformed shape of a single-layered aluminum specimen

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به صورت گنبدی شکل یا محدب (مد اول تغییر شکل [۳۶]) بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولیدشده، به صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود. شایان‌ذکر است که تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ لایه جلویی، انرژی قابل توجهی از انفجار ماده منفجره را جذب می‌کند و انرژی جنبشی منتقل شده بر سطح لایه عقبی، موجب تغییر شکل دائمی آن می‌شود. به‌طور کلی شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند: (۱) ناحیه گنبدی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای گیردار حرکت می‌کنند (۲) سطحی از ساختار که بین دو نگاه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند (۳) نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است. علاوه بر موارد بالا، مطابق با شکل ۸ و شکل ۹ برای مواردی که در آن نمونه آزمایشی در معرض بار انفجاری مکرر قرار دارد یا شدت نیروی انفجاری افزایش یافته‌است، نازک‌شدگی و همچنین پاره‌شدن در لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مد از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام‌شده توسط تیلینگ‌اسمیت و نوریک [۳۶] است. پارگی در مرزها هنگامی که ورق تحت بار انفجاری مکرر قرار دارد مشابه با حالت گسیختگی برشی یا shear failure است. شایان توجه است که گسیختگی برشی مشاهده‌شده در این سری از آزمایش‌ها از نظر ماهیت کاملاً متفاوت با حالت گسیختگی

نشان‌دهنده سه‌لایه بودن ساختار و اعداد بعد از آن به ترتیب ضخامت هر لایه است. همچنین حرف R بیانگر تعداد کل دفعات بارگذاری، حرف M بیانگر میزان جرم خرج، حرف B بیانگر شماره بارگذاری از تعداد کل دفعات بارگذاری و حرف H بیانگر فاصله خرج انفجاری تا ورق یا همان فاصله استقرار خرج است. در ادامه، تأثیر عوامل مختلف از جمله میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار گرفته‌است.

در این قسمت از تحقیق، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند، افزایش جرم خرج انفجاری، افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، نوع لایه‌بندی و افزایش تعداد لایه‌ها و تعداد بارگذاری انفجاری بر بیشترین خیز دائمی ساختار تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی یکنواخت مکرر نشان می‌دهد که در طول ۵۴ آزمایش، تمامی ساختارها به‌غیر از ۸ نمونه سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده‌است.



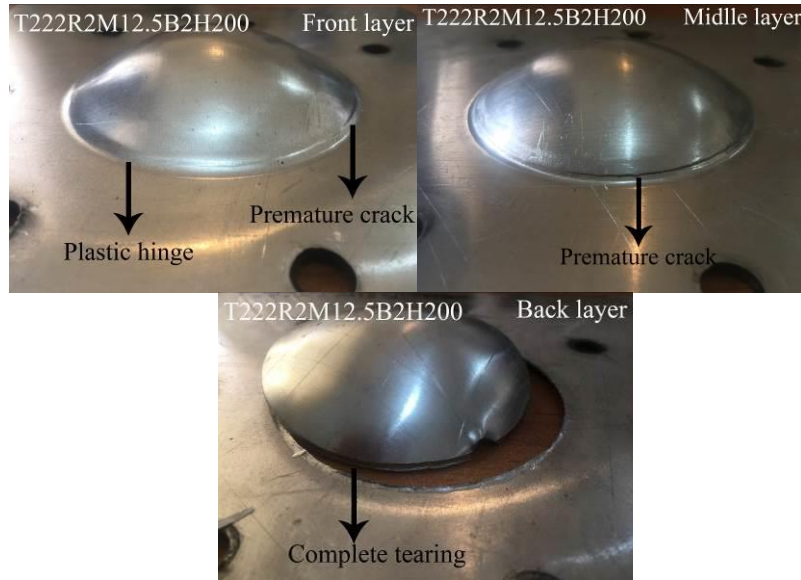
شکل ۷. نمونه‌ای از ساختارهای چندلایه آلومینیومی تغییر شکل یافته

Fig. 7. A typical deformed shape of a multi-layered aluminum specimen



شکل ۸. نمونه‌ای از ساختارهای دولایه آلومینیومی پاره شده و در معرض گلوپی شدن

Fig. 8. Typical deformed shapes of double-layered aluminum specimens being torn and exposed to necking



شکل ۹. نمونه‌ای از ساختارهای سه‌لایه آلومینیومی پاره‌شده

Fig. 9. A typical fractured shape of a triple-layered aluminum specimen

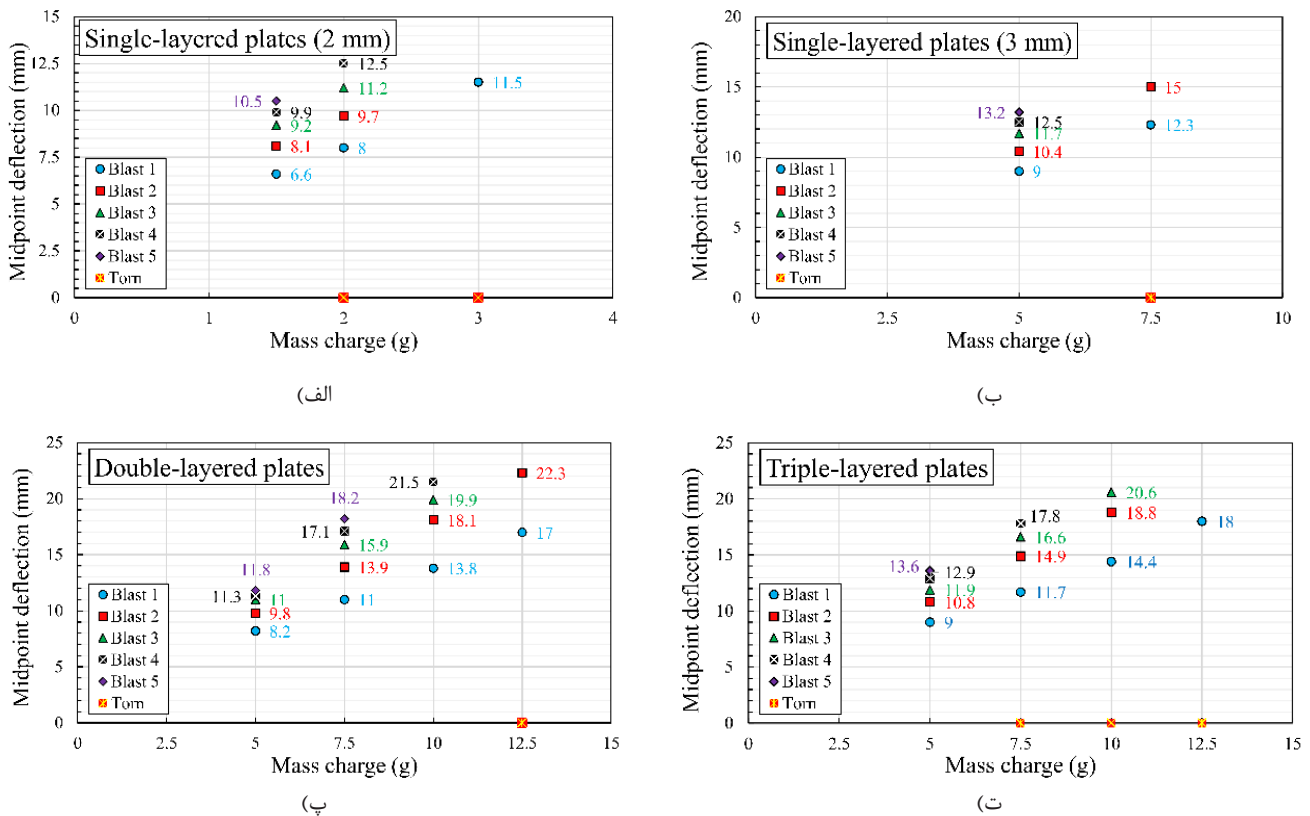
به‌طوری‌که مطابق با جداول ۲ و ۳، جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به‌صورت تک‌مرحله‌ای دارند. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ورق‌های تک‌لایه با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۲۱/۲٪ و ۷۴/۲٪ به ترتیب در جرم خرج‌های ۲ گرم و ۳ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم می‌شود. همچنین این مقادیر برای جرم خرج‌های ۲ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم در انفجار دوم، سوم و چهارم به ترتیب منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۱۹/۸٪، ۲۱/۷٪ و ۲۶/۳٪ می‌شود و ورق قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای جرم خرج‌های بیشتر از ۳ گرم را ندارد. در مقابل، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ورق‌های تک‌لایه با ضخامت ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش یک میلی‌متری ضخامت ورق منجر به تحمل بار انفجاری مکرر در محدوده بزرگ‌تری می‌شود و آستانه تحمل ورق تا جرم خرج ۷/۵ گرم بالا می‌رود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۶/۷٪ در جرم خرج ۷/۵ گرم می‌شود؛ هرچند ورق قابلیت تحمل بار انفجاری حاصل از انفجار جرم خرج ۱۰ گرمی را ندارد. همچنین این مقدار برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۴۴/۲٪ در جرم خرج ۷/۵

برشی (مد تغییر شکل سوم) می‌باشد که قبلاً توسط تیلینگ‌اسمیت و نوریک [۳۶] تعریف شده‌است. این به دلیل آن است که نمونه پاره‌شده با کاهش تدریجی جابجایی در منطقه مرکزی همراه بوده‌است. همچنین در این سری از آزمایش‌ها، مد تغییر شکل برش کششی یا tensile shearing که به‌طور معمول ایمپالس‌های پایین در بارگذاری انفجاری منفرد رخ می‌دهد، مشاهده نشد.

۴-۲- تحلیل آماری و کمی نتایج تجربی

۴-۲-۱- رابطه بین بیشترین خیز دائمی و جرم خرج

اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی مکرر به تحلیل نتایج تجربی کمی به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود (لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام‌شده در این بخش، جرم خرج ۱ گرم نائل لحاظ نشده‌است). به همین منظور در اولین گام، تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری با توجه به جدول ۲ و ۳ و شکل ۱۰ تحلیل می‌گردد. در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی با بالارفتن میزان جرم انفجاری و به‌تبع آن بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد



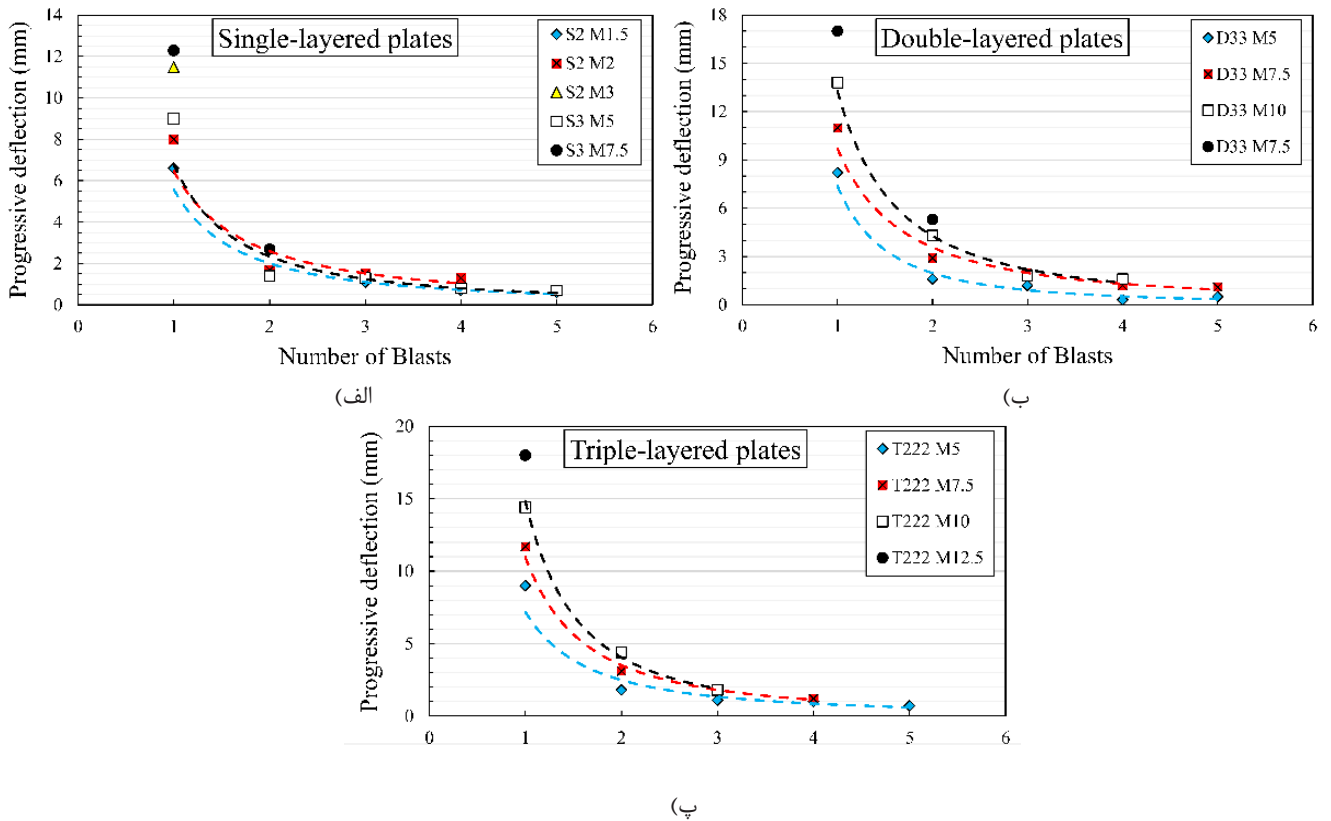
شکل ۱۰. تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب جرم خرج: الف) ورق تک لایه ۲ میلی متری، ب) ورق تک لایه ۳ میلی متری، پ) ورق دو لایه با ضخامت ۳+۳ میلی متر، ت) ورق سه لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی متر

Fig. 10. Variations of maximum permanent deflection versus charge mass: a) 2 mm thick single-layered plate; b) 3 mm thick single-layered plate; c) 3+3 mm thick double-layered plate; d) 2+2+2 mm thick triple-layered plate

آلومینیومی به میزان ۳۴/۱٪، ۶۸/۳٪ و ۱۰۷/۳٪ به ترتیب در جرم خرج های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می شود. همچنین این مقادیر برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم به ترتیب برابر با ۴۱/۸٪، ۸۴/۷٪ و ۱۲۷/۶٪ به ترتیب در جرم خرج های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم؛ در انفجار سوم برابر با ۴۴/۵٪ و ۸۰/۹٪ به ترتیب در جرم خرج های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار چهارم برابر با ۵۱/۳٪ و ۹۰/۳٪ در جرم خرج های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار پنجم برابر با ۵۴/۲٪ در جرم خرج های ۷/۵ گرم می شود. در مقابل، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق های سه لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی متر نشان می دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۰/۰٪ و ۶۰/۰٪

گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می شود و ورق قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای جرم خرج های بیشتر از ۷/۵ گرم را ندارد.

نتایج برای ساختارهای چندلایه نیز مشابه با ورق های تک لایه با توجه به جدول ۴ و ۵ تحلیل می گردد. در حالت کلی، بیشترین خیز دائمی ورق های چند لایه آلومینیومی نیز با بالا رفتن میزان جرم انفجاری و به تبع آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می یابد به طوری که مطابق با این جداول، جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به صورت تک مرحله ای دارند. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق های دو لایه با ضخامت ۳+۳ میلی متر نشان می دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق



شکل ۱۱. تغییرات خیز دائمی جلورونده (افزایشی) برحسب تعداد دفعات انفجار: (الف) ورق تک لایه ۲ و ۳ میلی متری، (ب) ورق دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی متر، (پ) ورق سه لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی متر

Fig. 11. Variations of progressive deflection versus the number of blasts: a) 2 mm and 3 mm thick single-layered plates; b) 3+3 mm thick double-layered plate; c) 2+2+2 mm thick triple-layered plate.

تک لایه ۲ میلی متری هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱/۵ گرم است، نشان می دهد که این ساختار ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۷٪، ۳۹/۴٪، ۵۰/۰٪ و ۵۹/۱٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۷٪، ۱۳/۶٪، ۷/۶٪ و ۶/۱٪ نسبت به دفعه قبلی شده و تقریباً یک روند نمایی کاهش را طی می کند. دلیل روند نمایی کاهش خیز را می توان ناشی از کار سختی ماده ورق بعد از هر بار بارگذاری مکرر دانست. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر بار بارگذاری انفجاری در ورق افزایش می یابد و انباشته می گردد و سبب کاهش روند افزایشی تغییر

۱۰۰/۰٪ به ترتیب در جرم خرج های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می شود. همچنین این مقادیر برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم به ترتیب برابر با ۳۷/۹٪ و ۷۴/۱٪ به ترتیب در جرم خرج های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار سوم برابر با ۳۹/۵٪ و ۷۳/۱٪ به ترتیب در جرم خرج های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار چهارم برابر با ۳۸/۰٪ در جرم خرج های ۷/۵ گرم می شود و ساختار در جرم خرج های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دو لایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.

۴-۲-۲ رابطه بین تعداد بارگذاری و بیشترین خیز دائمی

مطابق با جدول ۲ و ۳ و شکل ۱۱، مقایسه نتایج تجربی برای ورق

نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۲۶/۳\%$ ، $۱۴/۴\%$ ، $۷/۵\%$ و $۶/۴\%$ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۰ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دو لایه با ضخامت $۳+۳$ میلی‌متر تنها ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۳۱/۲\%$ ، $۴۴/۲\%$ و $۵۵/۸\%$ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۳۱/۲\%$ ، $۹/۹\%$ و $۸/۰\%$ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. در نهایت نتایج نشان می‌دهند که برای ساختار دو لایه هنگامی که جرم خرج انفجاری $۱۲/۵$ گرم است، این ساختار تنها ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۳۱/۲\%$ در دفعه دوم می‌شود.

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

جابجایی نقطه میانی ورق می‌گردد. همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۲ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۲ میلی‌متری ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۲۱/۳\%$ ، $۴۰/۰\%$ و $۵۶/۳\%$ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۲۱/۳\%$ ، $۱۵/۴\%$ و $۱۱/۶\%$ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. علاوه بر این، مطابق با جدول ۲ و ۳، مقایسه نتایج تجربی برای ورق تک لایه ۳ میلی‌متری هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۱۵/۶\%$ ، $۳۰/۰\%$ ، $۳۸/۹\%$ و $۴۶/۷\%$ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۱۵/۶\%$ ، $۱۲/۵\%$ ، $۶/۸\%$ و $۵/۶\%$ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری $۷/۵$ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۲۲/۰\%$ در دفعه دوم می‌شود.

مطابق با جدول ۴، نتایج تجربی بیان‌گر آن است که ساختار دو لایه آلومینیومی با ضخامت $۶(۳+۳)$ میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و $۱۲/۵$ گرم ندارد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دو لایه با ضخامت $۳+۳$ میلی‌متر ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۱۹/۵\%$ ، $۱۲/۲\%$ ، $۲/۷\%$ و $۴/۴\%$ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری $۷/۵$ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دو لایه با ضخامت $۳+۳$ میلی‌متر همچنان ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $۲۶/۳\%$ ، $۴۴/۵\%$ ، $۵۵/۵\%$ و $۶۵/۴\%$ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین

جدول ۶. نتایج تجربی بیشتر برای ساختارهای تک و چندلایه

Table 6. Further experimental results for single- and multi-layered plates

کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
S3R3M5B1H200		۱	۵	۲۰۰	۱۸/۲
S3R3M5B2H200	۳	۲	۵	۲۰۰	۲۱/۸
S3R3M5B3H200		۳	۵	۲۰۰	پارگی
D33R5M10B1H300		۱	۱۰	۳۰۰	۶/۸
D33R5M10B2H300		۲	۱۰	۳۰۰	۸/۳
D33R5M10B3H300	۵	۳	۱۰	۳۰۰	۹/۱
D33R5M10B4H300		۴	۱۰	۳۰۰	۹/۹
D33R5M10B5H300		۵	۱۰	۳۰۰	۱۰/۸
T222R5M10B1H300	۵	۱	۱۰	۳۰۰	۷/۶
T222R5M10B2H300		۲	۱۰	۳۰۰	۹/۰
T222R5M10B3H300		۳	۱۰	۳۰۰	۹/۹
T222R5M10B4H300		۴	۱۰	۳۰۰	۱۰/۷
T222R5M10B5H300		۵	۱۰	۳۰۰	۱۱/۶

روی بیشترین خیز ساختار، به تجزیه و تحلیل اثر فاصله استقرار خرج از سطح نمونه روی خیز دائمی با انجام آزمایش روی ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی پرداخته می‌شود. بدین منظور، مطابق با جدول ۶، سیزده آزمایش جدید روی ورق تک لایه ۳ میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج ۵ گرمی در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از سطح ورق و ساختارهای دو لایه ۶ (۳+۳) میلی‌متری و سه لایه ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج ۱۰ گرمی در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از سطح ورق انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲ و جدول ۶ برای ساختارهای تک‌لایه و در فاصله استقرارهای ۳۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش ۱۰۰ میلی‌متری فاصله خرج از سطح ورق، منجر به کاهش خیز دائمی ورق آلومینیومی ۳ میلی‌متری به میزان ۵۰/۵٪ و ۵۲/۳٪ به ترتیب در انفجارهای اول و دوم می‌گردد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش ۵۰٪ درصدی فاصله استقرار موجب می‌شود تا نمونه آزمایشی بتواند بار انفجاری مکرر را تا دفعات بیشتری تحمل کند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده برای ساختارهای

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

۴-۲-۳- رابطه بین فاصله استقرار خرج و بیشترین خیز دائمی اکنون، پس از تحلیل کمی نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی مکرر و بررسی اثر بار مکرر

نشان می‌دهند و دیگر یک رابطه صعودی بین اختلاف بیشترین خیز دائمی ساختارهای چند لایه و تعداد انفجار برقرار نیست.

۴-۲-۵- رابطه بین ایمپالس و جرم خرج

پس از تحلیل آماری نتایج تجربی به دست آمده در جداول ۲ تا ۵، یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به بارگذاری انفجاری، داشتن تخمینی از میزان ایمپالس بار وارده برحسب جرم خرج است؛ لذا بدین منظور ایمپالس‌های اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش برحسب جرم خرج برای دو ساختار تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های تجربی انحراف بسیار اندک و قابل‌اغماضی از دو رابطه خطی برازش شده برای دو ساختار تک‌لایه و چندلایه دارند و این دو رابطه قابلیت استفاده در ادامه کارهای تجربی در این محدوده را دارند. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام شده در این بخش، ایمپالس ناشی از انفجار ۱ گرم نائل به علت محاسبه میزان ایمپالس در حالت کلی، در مقدار ایمپالس لحاظ شده است.

۴-۲-۶- رابطه بین ایمپالس و تعداد دفعات بارگذاری

همان‌طور که در بخش تحلیل مودهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی نشان داده شد، ورق‌های آلومینیومی هنگام قرارگرفتن در معرض بار انفجاری یکنواخت مکرر، دچار تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ شدند و پروفیل تغییر شکل آن‌ها به صورت گنبدی شکل بود. در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ به ترتیب مقدار ایمپالس بر حسب دفعات بارگذاری برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه نمایش داده شده است که بازه تغییرات جرم خرج در این نمودارها از ۵ گرم تا ۵/۱۲ گرم می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که تغییرات بسیار کمی در ایمپالس منتقل شده 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 پنجم 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 گرفته شده است.

۴-۳- نتایج مدل‌سازی عددی

در بخش سوم، دو عدد بی‌بعد $\psi_{c,s}^r$ و $\mu_{c,m}^r$ به ترتیب برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دینامیکی

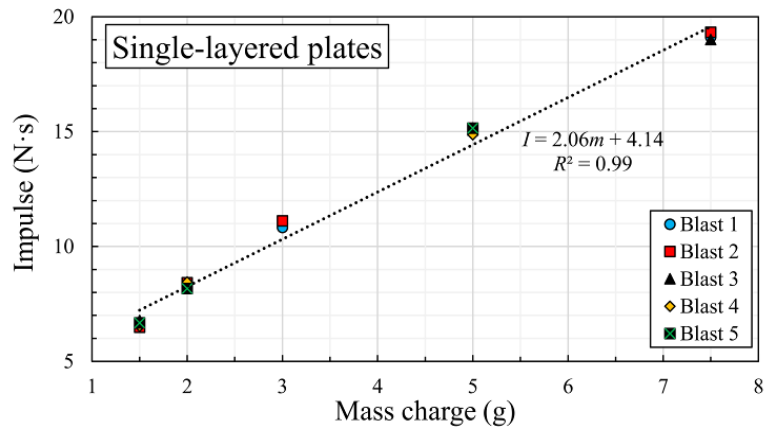
دولایه که افزایش ۱۰۰ میلی‌متری فاصله خرج، منجر به کاهش خیز دائمی ساختار دولایه به میزان $۶۱/۸\%$ ، $۶۷/۵\%$ ، $۷۴/۷\%$ ، $۷۲/۷\%$ و $۶۸/۵\%$ به ترتیب در انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌گردد. این مقادیر برای ساختارهای سه‌لایه به ترتیب برابر است $۵۳/۹\%$ ، $۶۵/۶\%$ ، $۶۷/۷\%$ و $۶۶/۴\%$.

۴-۲-۴- رابطه بین تعداد لایه و بیشترین خیز دائمی

اکنون، پس از بررسی اثر فاصله استقرار خرج روی بیشترین خیز ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی منفرد و مکرر، به تجزیه و تحلیل افزایش تعداد لایه در ساختارهای چند لایه روی خیز دائمی پرداخته می‌شود. بدین منظور با توجه به جداول ۴ و ۵، تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار به ترتیب در جرم خرج‌های ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم مقایسه می‌شود.

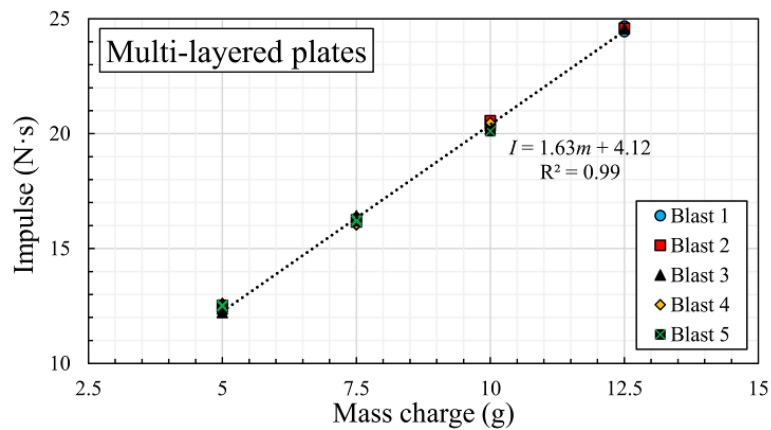
مطابق با جداول ۴ و ۵، برای جرم خرج ۵ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان $۹/۸\%$ ، $۱۰/۲\%$ ، $۱۱/۲\%$ ، $۱۴/۲\%$ و $۱۵/۳\%$ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌گردد و این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است ساختارهای سه لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دولایه داشته باشد اما با بالا رفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد و این پدیده به این علت است که با افزایش تعداد لایه در ساختارهای هم‌جنس، ضخامت هر لایه کاهش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش مقاومت خمشی سازه می‌گردد.

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



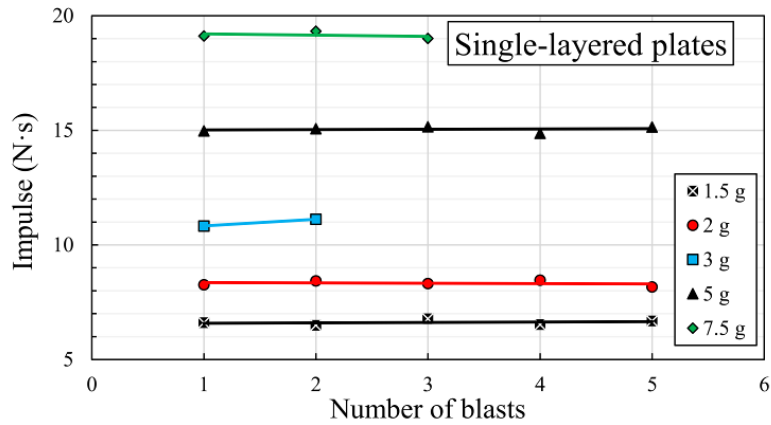
شکل ۱۲. نمودار میزان ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرار ۳۰۰ میلی‌متر

Fig. 12. The graph of impulse versus charge mass for single-layered specimens at the stand-off distance of 300 mm



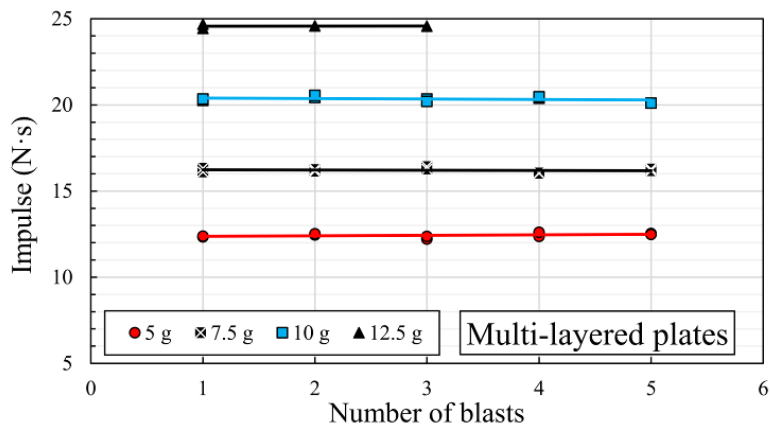
شکل ۱۳. نمودار میزان ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج برای ساختارهای چندلایه در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متر

Fig. 13. The graph of impulse versus charge mass for multi-layered specimens at the stand-off distance of 200 mm



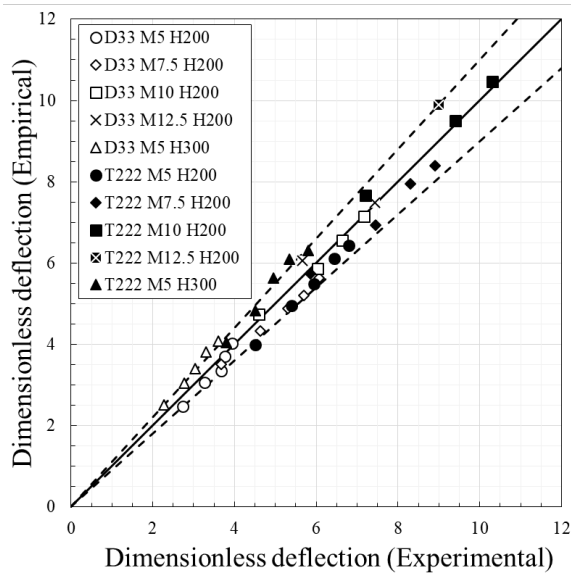
شکل ۱۴. نمودار میزان ایمپالس برحسب تعداد دفعات بارگذاری برای ساختارهای تک لایه در فاصله استقرار ۳۰۰ میلی متر

Fig. 14. The graph of impulse versus the number of blasts for single-layered specimens at the standoff distance of 300 mm



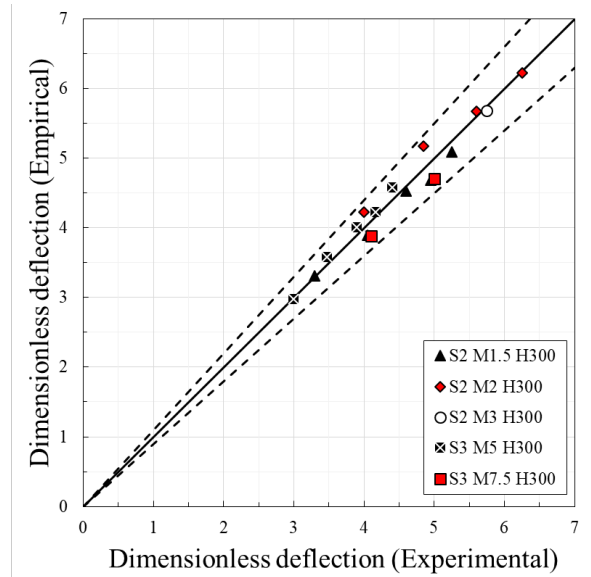
شکل ۱۵. نمودار میزان ایمپالس برحسب تعداد دفعات بارگذاری برای ساختارهای چندلایه در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی متر

Fig. 15. The graph of impulse versus the number of blasts for multi-layered specimens at the standoff distance of 200 mm



شکل ۱۷. مقایسه بین پیش‌بینی مدل تجربی در معادله ۳۷ و مقادیر تجربی برای ساختارهای چندلایه تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر

Fig. 17. The comparison between the predicted results by Eq. (37) and corresponding experimental results for multi-layered plates under repeated blast loading



شکل ۱۶. مقایسه بین پیش‌بینی مدل تجربی در معادله ۳۶ و مقادیر تجربی برای ساختارهای تک‌لایه تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر

Fig. 16. The comparison between the predicted results by Eq. (36) and corresponding experimental results for single-layered plates under repeated blast loading

که در آن

$$\psi_{c,s}^r = \left(\frac{R}{H}\right)^{1.95} \cdot \left(n \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{0.26} \cdot \left(\frac{1}{\xi}\right)^{2.29} \quad (38)$$

$$\mu_{c,m}^r = \left(\frac{R}{H_b}\right)^{0.87} \cdot \left(\frac{n \cdot \rho_b V_{0,b}^2}{M \cdot \sigma_{0,b}}\right)^{0.29} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{2.94} \quad (39)$$

برای تمامی نتایج تجربی ارائه‌شده در جداول ۲ تا ۶ برای ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر، خیز نرمال‌شده (نسبت خیز به ضخامت ورق) به‌دست‌آمده از پیش‌بینی مدل‌های تجربی ارائه‌شده در معادلات (۳۶) و (۳۷) برحسب نتایج تجربی متناظر با آن‌ها به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نمایش داده شده‌است. در این اشکال، خط ممتد مشکی‌رنگ با شیب ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل نتایج مدل‌سازی و تجربی ارائه‌شده در تحقیق حاضر است. همچنین، محدوده بین دو خط‌چین مشکی‌رنگ بافاصله، محدوده‌ای است که در آن خطای پیش‌بینی کمتر از ۱۰٪ است و جهت سنجش میزان دقت مدل تجربی

یکنواخت مکرر ارائه شدند. در اولین گام از بخش حاضر، داده‌های تجربی موجود در جدول ۲ تا ۵ به فرم سه دو عدد بی‌بعد $\psi_{c,s}^r$ و $\mu_{c,m}^r$ تبدیل شدند. لازم به توضیح است که برای محاسبه عدد بی‌بعد نرخ کرنش از ضرایب موجود در مرجع [۳۰] برای ورق آلومینیومی استفاده شد و مقدار تنش تسلیم ورق نیز ۱۱۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. در گام بعدی، روش تجزیه مقادیر منفرد برای تعیین ضرایب مجهول معادلات (۱۶) و (۱۸) و درنهایت استخراج معادلات تجربی برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر بکار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از روش ریاضی پیشنهادی برای ضرایب مجهول در معادلات بالا، به‌صورت معادلات (۳۶) و (۳۷) است:

$$\frac{W_0}{H} = 0.0017 \cdot \psi_{c,s}^r \quad (36)$$

$$\frac{W_0}{H_b} = 0.027 \cdot \mu_{c,m}^r \quad (37)$$

پیشنهادی رسم شده است. مطابق با شکل‌های ارائه شده، تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی مدل و مقادیر تجربی مشاهده می‌شود به طوری که برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه، به ترتیب ۱۰۰٪ و ۹۷٪ از کل نقاط تجربی در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند.

۵- نتیجه‌گیری

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

- در حالت کلی، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی با بالارفتن میزان خرج انفجاری و به تبع آن بالارفتن 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
- ساختار سه لایه در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دولایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.
- ساختار دولایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۳+۳) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد. همچنین برای ساختار دولایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار تنها ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪ در دفعه دوم می‌شود.
- ساختار سه لایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه سوم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد که نشان می‌دهد در مقایسه با ساختارهای دولایه یک دفعه بارگذاری انفجاری کمتری تحمل می‌کند و افزایش تعداد

لایه‌ها از این دیدگاه مؤثر نیست. همچنین برای ساختار سه لایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار بارگذاری مکرر را تحمل نمی‌کند و مقاومت انفجاری ضعیف‌تری در مقایسه با ساختار دولایه در برابر بار انفجاری مکرر دارد.

- نتایج تجربی برای جرم خرج ۵ گرم نشان داد که افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز می‌گردد.
- این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است ساختارهای سه لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دو لایه داشته باشد اما با بالارفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد.
- نتایج تجربی برای جرم خرج ۷/۵ و ۱۰ گرم نشان داد که افزایش تعداد لایه همچنان منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار می‌شود؛ اما رفتاری کاملاً متفاوت با هنگامی که ورق تحت انفجار خرج ۵ گرمی قرار دارد از خود نشان می‌دهد به طوری که با افزایش جرم خرج به تبع آن افزایش ایمپالس انفجار، ساختارهای چندلایه با تعداد لایه بیشتر مقاومت انفجاری بهتری از خود نشان می‌دهند و دیگر یک رابطه صعودی بین اختلاف بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه و تعداد انفجار برقرار نیست.

علاوه بر این، در تحقیق حاضر سعی شد تا برخلاف روند موجود در ادبیات تحقیق برای ارائه روابط تجربی به منظور پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر، یک بیان مناسب برای پیشنهاد اعداد بی‌بعد بر مبنای تحلیل ابعادی ارائه شود. به همین جهت در اولین قدم، معادلات حاکم بر ورق چهارگوش تحت بار دینامیکی نوشته و اثرات نیروهای غشایی به آن افزود شد. در گام بعدی، با تعریف پارامترهایی بی‌بعد برای بیشترین خیز دائمی، هندسه ساختار، گشتاورهای خمشی و نیروهای غشایی، این معادله به فرم بی‌بعد تبدیل شد. در نهایت، معادله دیفرانسیل بی‌بعد شده بیانگر سه جنبه تأثیرگذار بر پاسخ دینامیکی سازه، یعنی؛ هندسه ساختار، نسبت بار دینامیکی اعمالی به مقاومت ماده و توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک بود که هر کدام از این جنبه‌ها به عنوان یک عدد بی‌بعد بیان شد. در ادامه، با تغییر عدد بی‌بعد مربوط به هندسه چهارگوش به دایره‌ای، اعداد بی‌بعد برای ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر ارائه شد. شایان توجه است که مدل حاضر تنها قادر به پیش‌بینی داده‌های تجربی پاره نشده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که

Archive of Applied Mechanics, 68(7-8) (1998) 524-538.

- [9] R. Rajendran, J. Lee, Blast loaded plates, Marine Structures, 22(2) (2009) 99-127.
- [10] N. Rudrapatna, R. Vaziri, M. Olson, Deformation and failure of blast-loaded square plates, International journal of impact engineering, 22(4) (1999) 449-467.
- [11] N. Rudrapatna, R. Vaziri, M. Olson, Deformation and failure of blast-loaded stiffened plates, International Journal of Impact Engineering, 24(5) (2000) 457-474.
- [12] S.C.K. Yuen, G. Nurick, W. Verster, N. Jacob, A. Vara, V. Balden, D. Bwalya, R. Govender, M. Pittermann, Deformation of mild steel plates subjected to large-scale explosions, International journal of impact engineering, 35(8) (2008) 684-703.
- [13] M. Rezasefat, T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Ziya-Shamami, M. Alitavoli, 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, 233(7) (2019) 1449-1471.
- [14] M. Rezasefat, T.M. Mostofi, T. Ozbakkaloglu, Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates, Thin-Walled Structures, 144 (2019) 106332.
- [15] T. Børvik, A. Hanssen, M. Langseth, L. Olovsson, Response of structures to planar blast loads—A finite element engineering approach, Computers & Structures, 87(9-10) (2009) 507-520.
- [16] I.G. Cullis, J. Schofield, A. Whitby, Assessment of blast loading effects—Types of explosion and loading effects, International journal of pressure vessels and piping, 87(9) (2010) 493-503.
- [17] C. Soutis, G. Mohamed, A. Hodzic, Modelling the structural response of GLARE panels to blast load, Composite Structures, 94(1) (2011) 267-276.
- [18] K. Spranghers, I. Vasilakos, D. Lecompte, H. Sol, J. Vantomme, Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions, International Journal of Impact

تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی مدل و مقادیر تجربی وجود دارد به طوری که برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه، به ترتیب ۱۰۰٪ و ۹۷٪ از کل نقاط تجربی در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند.

منابع

- [1] H. Babaei, T.M. Mostofi, S.H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, Struct Eng Mech, 56(4) (2015) 535-548.
- [2] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, 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, 109 (2016) 367-376.
- [3] T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation, Strain, 53(4) (2017) e12235.
- [4] T.M. Mostofi, A. Golbaf, A. Mahmoudi, M. Alitavoli, H. Babaei, 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, 123 (2018) 48-56.
- [5] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, 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, 234(5) (2020) 1102-1111.
- [6] N. Jones, Structural impact, Cambridge university press, 2012.
- [7] S.C.K. Yuen, G. Nurick, G. Langdon, Y. Iyer, Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III—an update 25 years on, International Journal of Impact Engineering, 107 (2017) 108-117.
- [8] Y.-P. Zhao, Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates,

- and uniform impulsive loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(5) (2017) 939-950.
- [28] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling, *Thin-Walled Structures*, 118 (2017) 1-11.
- [29] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, G. Lu, D. Ruan, Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load, *International Journal of Impact Engineering*, 125 (2019) 93-106.
- [30] N. Jones, Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings, *International Journal of Impact Engineering*, 74 (2014) 3-15.
- [31] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(3) (2017) 490-496.
- [32] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 107 (2016) 257-265.
- [33] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, S. Hosseinzadeh, 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*, 112 (2017) 118-124.
- [34] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Study on the response of circular thin plate under low velocity impact, *Geomechanics and Engineering*, 9(2) (2015) 207-218.
- [35] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates Engineering, 54 (2013) 83-95.
- [19] N. Mehreganian, L. Louca, G. Langdon, R. Curry, N. Abdul-Karim, The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques, *International Journal of Impact Engineering*, 115 (2018) 81-93.
- [20] T.F. Henchie, S.C.K. Yuen, G. Nurick, N. Ranwaha, V. Balden, The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, 74 (2014) 36-45.
- [21] D.D. Truong, H.-J. Jung, H.K. Shin, S.-R. Cho, Response of low-temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(6) (2018) 670-682.
- [22] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: experimental studies, *International journal of impact engineering*, 8(2) (1989) 171-186.
- [23] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part I: Theoretical considerations, *International Journal of Impact Engineering*, 8(2) (1989) 159-170.
- [24] Q. Li, N. Jones, On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members, *Archive of Applied Mechanics*, 70(4) (2000) 245-254.
- [25] B.-W. Park, S.-R. Cho, Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and stiffened plates under explosion loadings, *International Journal of Impact Engineering*, 32(10) (2006) 1721-1736.
- [26] N. Jacob, G. Nurick, G. Langdon, The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads, *Engineering Structures*, 29(10) (2007) 2723-2736.
- [27] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, E. Armoudli, On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized

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

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*, 234(2) (2020) 231-245.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ziya-Shamami, H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, H. Khodarahmi, Experimental investigation and mathematical modeling of the response of circular metallic plates under successive intense dynamic loading, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 4023-4050.

DOI: [10.22060/mej.2021.19334.7001](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19334.7001)



