



اثر بارگذاری دفعی شدید روی عملکرد ساختارهای دولایه

توحید میرزابابای مستوفی^۱، محمد رضاصفت^۱، مصطفی سیاح بادخور^۱، هاشم بابایی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۶

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

مطالعه آزمایشگاهی

تغییر شکل پلاستیک

بارگذاری دفعی

بار غیریکنواخت

شبیه‌سازی عددی.

خلاصه: این مقاله به مطالعه تجربی، شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی ریاضی پاسخ دینامیکی ساختارهای دایره‌ای تک‌لایه و دولایه تحت بارگذاری دفعی موضعی می‌پردازد. در بخش تجربی، شش آزمایش روی پیکربندی‌های دولایه ساخته شده از ورق‌های مس-آلومینیوم (۲ میلی‌متر + ۲ میلی‌متر) در شرایط بارگذاری مختلف انجام شد. از نرم‌افزار تجاری آباکوس و یک زیر برنامه فرترن تعریف شده توسط کاربر برای تهیه مدل عددی استفاده شد. قانون ساختاری ویسکوپلاستیسیته جانسون-کوک و همچنین مدل آسیب آن در مدل عددی مورداستفاده قرار گرفت. مدل‌های عددی با استفاده از آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه و داده‌های موجود در ادبیات تحقیق، صحت‌سنجی شد. نشان داده شد که مدل‌های عددی به‌خوبی مکانیسم‌های تغییر شکل ورق در طول فرآیند بارگذاری را ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، یک مطالعه دقیق پارامتری روی ساختارهای فلزی دولایه ساخته شده از پنج لایه‌بندی مختلف از جمله ساختارهای آلومینیوم-آلومینیوم، فولاد-فولاد، فولاد-آلومینیوم، مس-آلومینیوم و مس-فولاد انجام شد. دو شعاع مختلف برای ورق و چهار قطر مختلف برای خرج انفجاری در نظر گرفته شد. پس از انجام مطالعه پارامتریک، یک مدل تجربی مبتنی بر اعداد بدون بعد جدید برای پیش‌بینی حداکثر انحراف عرضی ساختارهای دولایه ارائه شد. توافق کلی بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و پیش‌بینی‌های تجربی به دست آمد.

۱- مقدمه

تأمین چنین شرایطی بنا بر شرایط محیطی اکثر اوقات امکان‌پذیر نیست. با توجه به توضیحات ارائه شده، این موضوع نیازمند دستیابی به روش‌هایی نوآورانه و بهینه‌سازی شده مطابق با نیازهای معماری و همچنین راه‌حل‌های ایمنی است. باید در نظر داشت که فقط طراحی سازه بر مبنای اصول اولیه آن کافی نیست و ارزیابی موفق ساختارهای مقاوم تحت بارگذاری انفجاری نیازمند تسلط کافی بر فیزیک مسئله است. استفاده از صفحه‌های چندلایه و مرکب فلزی یکی از راهکارهای خلاقانه و درعین‌حال ساده جهت افزایش استحکام سازه‌ها است که کاربرد بسیار زیادی در سازه‌های هوافضا و وسایل نقلیه حمل‌ونقل دارند [۳]. ترتیب قرارگیری لایه‌ها از دیدگاه طراحی و انتخاب مناسب ماده برای این ساختارها بسیار حائز اهمیت است. در واقع پارامترهای بیان شده، نقش بسیار مهمی در بهبود عملکرد انفجاری سازه و کاهش

پیشرفت در زمینه مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت بار انفجاری یکنواخت و غیریکنواخت به سبب خطرناک و همچنین جنگ‌های موجود و اهمیت حفاظت از تجهیزات، بسیار زیاد شده است و در حالت کلی پژوهش‌های بسیار زیادی شامل ساخت تجهیزات قابل‌انعطاف و سبک در برابر بارهای انفجاری منفرد و مکرر صورت گرفته است [۱ و ۲]. لازم به ذکر است که یکی از راه‌حل‌های موجود برای ساخت این تجهیزات، طراحی مقاوم یک ساختار با الگوی خاص ضمن حفظ شرایط سبک‌وزنی در برابر بار دفعی و انفجاری است. بهترین گزینه برای کم‌کردن موج ناشی از انفجار مواد منفجره، افزایش فاصله آن‌ها از سازه موردنظر است؛ اما باید توجه داشت که

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghbabaei@guilan.ac.ir



وزن آن دارند [۴].

در زمینه اثر بارگذاری انفجاری با توزیع یکنواخت و غیریکنواخت روی ورق‌های تک لایه فلزی، تحقیقات ابتدایی توسط نوریک و مارتین در سال ۱۹۸۹ انجام شد. آن‌ها با انجام دو سری کار آزمایشگاهی کامل به بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های فولادی با هندسه دایروی و چهارگوش تحت بار انفجاری با شرایط مرزی کاملاً گیردار پرداختند [۵ و ۶]. یوان و نوریک در سال ۲۰۰۰، اهمیت ضخامت ورق تحت بارهای انفجاری غیریکنواخت را با توجه به شکست ماده بررسی نمودند [۷]. ژاکوب و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثر فاصله استقرار و جرم خرج را بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار از جنس فولاد نرم تحت بار انفجاری پرداختند [۸]. بابایی و درویره در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ به بررسی تجربی، تحلیلی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی گیردار فولادی، مسی و آلومینیومی تحت شرایط بارگذاری انفجاری یکنواخت و غیریکنواخت پرداختند. آن‌ها کارهای تجربی متعددی با به‌کاربردن پاندول بالستیک به همراه لوله‌های فولادی به‌عنوان فاصله استقرار خرج در اندازه‌های ۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر انجام دادند [۹ و ۱۰]. گرتو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به تحلیل تجربی ورق‌های مربعی تحت بار انفجاری در سه نوع مختلف شکل‌دهی انفجاری در هوای آزاد، در محیط کاملاً بسته و در محیط نیمه‌باز پرداختند. با انفجار نمونه‌ها در یک‌فاصله استقرار ثابت و همچنین تغییر جرم خرج‌های پلاستیکی کروی، اثر ضخامت ورق و نوع محیط بارگذاری بر میزان تغییر شکل نهایی هدف بررسی شد. نتایج تجربی به‌دست‌آمده تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق را ۱ تا ۱۸ برابر ضخامت آن نشان داد. آن‌ها برای پیش‌بینی میزان خیز ورق‌های مورد آزمایش خود، اعداد بی‌بعد ارائه‌شده توسط نوریک را برای هر سه نوع بارگذاری اصلاح کردند [۱۱]. لانگدن و همکاران در سال ۲۰۱۵ به مطالعه تجربی تأثیر خواص ماده بر پاسخ دینامیکی ورق تحت بارگذاری انفجار آزاد در هوا پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که برای هر ماده، خیز دائمی مرکز ورق با افزایش ایمپالس به‌صورت خطی رابطه دارد تا منجر به پارگی گردد [۱۲]. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به انجام آزمایش‌های تجربی در رابطه با پاسخ دینامیکی و شکست ورق‌های فلزی تک لایه تحت بارهای دفعی مبتنی بر آب پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که در صورتی که ورق تحت بارگذاری دفعی مبتنی بر آب قرار داشته باشد، میزان

خیز ورق در مقایسه با انفجار آزاد در هوا تقریباً ۵۳٪ کاهش می‌یابد [۱۳ و ۱۴]. اون و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی آزمایشگاهی اثر فاصله محل قرارگیری خرج بر رفتار پلاستیک ورق‌های مربعی شکل‌پذیر تحت بارگذاری انفجاری آزاد با خرج کروی شکل پرداختند [۱۵]. در ادامه و در سال ۲۰۱۷، او و همکارانش به بررسی تجربی و عددی پاسخ دینامیکی ورق‌های مستطیلی فولادی تحت بار انفجاری پرداختند. در این سری از آزمایش‌ها، سامانه لوله شوک به‌منظور تولید بار انفجاری بکار گرفته شد که پیش‌تر به‌عنوان یک روش مؤثر در کنترل شرایط اولیه هر آزمایش معرفی شده بود [۱۶].

مهرگانیان و همکاران در سال ۲۰۱۸ به مطالعه رفتار دینامیکی پلاستیکی ورق‌های چهارگوش ضخیم با شرایط مرزی تکیه‌گاهی ساده تحت بار انفجاری پرداختند. آن‌ها با استفاده از تئوری پلاستیسیته به یک حل تحلیلی برای میدان جابجایی ورق نیز دست یافتند که نتایج خود را با کارهای عددی مقایسه کردند [۱۷]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی شکست و پاسخ دینامیکی نمونه‌هایی با دیواره‌های فولادی تحت بار انفجاری داخلی پرداختند. آن‌ها مطالعه‌های خود را به دو صورت تجربی و عددی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نتایجی که به دست آوردند به ارائه دو عدد بی‌بعد برای انفجار داخلی پرداختند [۱۸].

همان‌طور که مشخص است، در زمینه تغییر شکل پلاستیک ورق تک لایه تحت بار انفجاری تحقیقات بسیار گسترده است؛ اما تحقیقات روی ساختارهای چندلایه فلزی تحت بار دفعی بسیار محدود و انگشت‌شمار است. در سال ۲۰۱۸ میلادی، تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی سازه‌های تک لایه و چندلایه فولادی تحت بار دفعی غیریکنواخت مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹]. هدف اصلی از انجام این پژوهش، مطالعه رفتار دینامیکی و مقاومت انفجاری ساختارهای چندلایه در قیاس با نمونه‌های تک لایه تحت بار دفعی غیریکنواخت بود. پیش‌تر، سعید احمد در رساله دکتری خود به مطالعه تجربی و امان محدود پاسخ دینامیکی و درک الگوی شکست سازه‌های تک لایه و چندلایه فولادی با تنش تسلیم بالا پرداخت [۲۰]. میرزابابی مستوفی و همکاران در طی سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ مطالعات تجربی خود را روی شکل‌دهی ورق‌های مستطیلی تک لایه [۲۱ و ۲۲] و دولایه [۴] با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها ادامه دادند. مشابه با ساختارهای تک لایه، نمونه‌های دولایه نیز از ترکیب، یک‌لایه

یک مطالعه گسترده پارامتریک انجام می‌شود که در آن ساختارهای دولایه مختلف آلومینیوم- فولاد- فولاد، فولاد-آلومینیوم، مس-آلومینیوم و مس-فولاد در سه ضخامت مختلف ۳+۳ میلی‌متر، ۲+۴ میلی‌متر و ۴+۲ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین در ادامه با استفاده از بانک اطلاعات عددی و تجربی تولیدشده، یک دسته معادله تجربی بر مبنای مفهوم تحلیل ابعادی و اعداد بی‌بعد برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلزی با ترکیب‌بندی‌های مختلف تحت بار انفجاری غیریکنواخت ارائه می‌شود.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- تحقیق حاضر

نمونه ورق‌های مورد آزمایش از دو جنس مختلف مس و آلومینیوم و در ضخامت‌های متفاوت ۲ و ۲ میلی‌متر تهیه شده است. ابتدا نمونه ورق‌ها به صورت مربعی در ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر برش زده می‌شوند. ورق‌های برش خورده جهت نصب درگیری و مهار آن، سوراخ‌کاری می‌شوند. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده و به وسیله پیچ‌هایی که در پیرامون صفحات گیره تعبیه شده‌اند، کاملاً مهار می‌شوند. در وسط هر یک از صفحات گیره، سوراخی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر ایجاد شده است. این سوراخ‌ها در صفحه جلویی گیره برای اعمال بار روی ورق و در صفحه پشتی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق است. در این مجموعه آزمایش‌ها، خرج روی یک فوم پلی‌استر که به قطر ۱۰۰ و ضخامت ۱۵ میلی‌متر است چسبانده می‌شود و توسط آن در مرکز لوله نصب می‌شود. خرج انفجاری بکار رفته در این آزمایش‌ها از نوع سی‌فور به شکل دیسک با قطر ۲۰ میلی‌متر است. این نوع خرج حالت خمیری دارد؛ لذا به آسانی به وسیله یک شابلون به صورت دیسکی با قطر معین شکل داده می‌شود. لازم به ذکر است، تنها قطر و وزن خرج انفجاری به‌عنوان شاخص و مشخصه اولیه هر آزمایش مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. اندازه ضخامت دیسک خرج نبایستی از یک مقدار معین (یک سوم شعاع دیسک) بیشتر شود، زیرا در غیر این صورت منجر به بروز اختلال در انفجار و محاسبه ایمپالس خواهد شد. چاشنی انفجار از نوع الکتریکی است که به وسیله یک گرم از خرج در مرکز به دیسک خرج اصلی متصل می‌شود.

نتایج به دست آمده در این مجموعه آزمایش‌ها، بیانگر پاسخ و

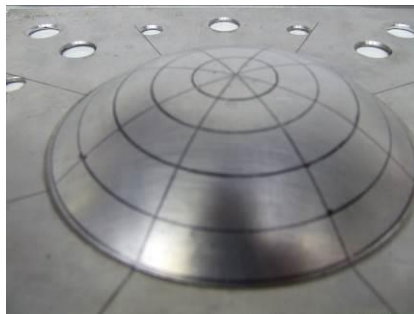
جلویی از جنس آلیاژ آلومینیوم (صفحه‌ای که بار انفجاری را تحمل می‌کند) و یک‌لایه عقبی از جنس فولاد نرم ساخته شدند. چهار نوع متفاوت از پیکربندی‌های با ضخامت مختلف، یعنی، ۱+۱ میلی‌متر، ۱+۲ میلی‌متر، ۲+۱ میلی‌متر و ۲+۲ میلی‌متر، انتخاب شدند تا بتوان تأثیر ضخامت لایه‌های جلویی و عقبی بر مقاومت تغییر شکل ساختار دولایه بررسی شود. نتایج تجربی نشان داد که هنگامی که بین لایه‌ها فاصله‌ای در نظر گرفته نشده باشد و لایه جلویی استحکام و چگالی کمتری نسبت به لایه عقبی داشته باشد، بیشترین خیز دائمی لایه عقبی تقریباً برابر با بیشترین خیز دائمی لایه جلویی است؛ همچنین یک مدل تحلیلی با فرم بسته مبتنی بر روش انرژی برای ساختارهای دولایه در معرض بار دفعی یکنواخت حاصل از انفجار مخلوط گازها ارائه شد. همچنین، نتایج تحقیقات برای ساختارهای فلزی چندلایه (بدون هیچ‌گونه اتصالی) تحت نفوذ پرتابه‌ها [۲۳] و همچنین تحت بار انفجاری مکرر [۲۴] نشان داد که نحوه لایه چینی ساختارهای چندلایه اهمیت بسیار زیادی در بهبود عملکرد سازه دارد به طوری که اگر یک ورق آلومینیومی با ضخامت زیاد به‌عنوان لایه جلویی و یک ورق فولادی به‌عنوان لایه عقبی قرار گیرد، عملکرد سازه به طرز شگفت‌انگیزی بالا می‌رود.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تحقیقات متنوع و گسترده‌ای اعم از تجربی، تحلیلی و عددی روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ورق‌های یک‌لایه تحت بار انفجاری انجام گرفته [۵-۱۸]؛ اما تحقیقات روی ساختارهای دولایه فلزی تنها تجربی بوده و عملکرد ساختارهای چندلایه غیر هم‌جنس فلزی مشخص نیست [۱۹ و ۲۰]. لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی روی ساختارهای دولایه فلزی ترکیبی به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند جنس ورق و خواص مکانیکی آن، جرم و شعاع جرج، میزان ایمپالس و نحوه لایه‌بندی می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل، بررسی رفتار ساختارهای دولایه فلزی ترکیبی مس-آلومینیوم تحت بار دفعی غیریکنواخت و مقایسه عملکرد آن‌ها با سایر ساختارهای یک‌لایه و دولایه است. در بخش عددی، با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و پس از صحت‌سنجی نتایج عددی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق و همچنین نتایج تجربی موجود در مراجع [۱۹ و ۲۰]،

جدول ۱. نتایج کارهای تجربی انجام شده در تحقیق حاضر

Table 1. Experimental results in the current study

چیدمان	کد آزمایش	ضخامت (mm)	ایمپالس (N.s)	خیز دائمی (mm)	
				لایه عقبی	لایه جلویی
مس-آلومینیوم	Cu-Al-1	۲+۲	۷/۹	۱۴/۱	۱۳/۹
	Cu-Al-2		۹/۸	۱۶/۹	۱۶/۸
	Cu-Al-3		۱۳/۴	۲۱/۳	۲۱/۱
	Cu-Al-4		۱۵/۱	۲۵/۲	۲۵/۰
	Cu-Al-5		۱۷/۳	۳۰/۴	۳۰/۱
	Cu-Al-6		۲۰/۲	۳۵/۶	۳۵/۳



(ب)



(الف)

شکل ۱. نمونه ساختار دولایه تغییر شکل یافته؛ (الف لایه مسی، ب) لایه آلومینیومی

Fig. 1. A typical deformed double-layered plate; a) Copper plate, b) Aluminum plate

از ساختارهای چندلایه به جای نمونه‌های یک‌لایه عملکرد بالستیکی را بهبود می‌بخشد [۲۳ و ۲۴]؛ اما تأثیر نوع لایه‌بندی و چیدمان آن‌ها روی مقاومت انفجاری این ساختارها بررسی نشده بود.

لذا، سعید احمد در رساله دکتری [۲۰] خود به بررسی تجربی و المان محدود پاسخ دینامیکی و درک الگوی شکست سازه‌های یک‌لایه و چندلایه فولادی با تنش تسلیم بالا از دو نوع مختلف دومکس ۵۵۰ و ۷۰۰ در ضخامت‌های مختلف ۴ و ۶ میلی‌متری برای ورق‌های یک‌لایه، ۲+۲ میلی‌متر، ۳+۳ میلی‌متر و ۴+۲ میلی‌متر برای ساختارهای دولایه و ۲+۲+۲ میلی‌متر برای ساختارهای سه‌لایه پرداخت. شایان توجه است که با توجه به چیدمان لایه‌ها، یکی دیگر از هدف‌های اصلی این تحقیق مقایسه مقاومت انفجاری، میزان جذب انرژی و تغییرات ریزساختاری ساختارهای چندلایه با ساختار یک‌لایه

رفتار مکانیکی ساختارهای دولایه مس-آلومینیوم تحت بارگذاری انفجاری غیریکنواخت است که در آن اثر تغییرات شرایط بارگذاری (مقدار خرج) بر پارامتر اساسی فرآیند؛ یعنی، مقدار خیر مرکز ورق مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱ آورده شده است. برای درک بهتر از آزمایش‌های انجام‌گرفته، تصویر نمونه‌های تغییر شکل یافته در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۲- ادبیات تحقیق [۱۹ و ۲۰]

در سال ۲۰۱۸، گروه تحقیقاتی ضربه و انفجار دانشگاه کپ‌تاوان در آفریقای جنوبی به ارزیابی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی سازه‌های یک‌لایه و چندلایه فولادی تحت بار دفعی غیریکنواخت پرداخت. تحقیقات پیشین در ادبیات تحقیق نشان می‌داد که استفاده

جدول ۲. نتایج تجربی موجود در ادبیات تحقیق [۱۹ و ۲۰]

Table 2. Experimental results in the open literature [19, 20]

چیدمان	کد آزمایش	ضخامت (mm)	جرم خرج (g)	ایمپالس (N.s)	خیز دائمی (mm)
	SA041209SA		۷+۱	۲۲	۱۰/۴
	SA041209SB		۱۵+۱	۳۸/۱	۱۷/۹
ساختار یک لایه	SA041209SC	۴	۲۲/۵+۱	۴۵/۴	۲۴/۴
	SA081209SD		۳۰+۱	۵۷/۷	۲۹/۵ (پارگی جزئی)
	SA151209SE		۳۶/۵+۱	۶۳/۴	پارگی
					لایه عقبی لایه جلویی
	SA071209DG		۷+۱	۲۰/۲	۱۲/۳ ۱۲/۸
	SA071209DH		۱۵+۱	۳۶/۱	۲۱/۸ ۲۲/۵
ساختار دو لایه	SA071209DI	۲+۲	۲۲/۵+۱	۴۵/۶	۲۸/۰ ۲۸/۷
	SA151209DJ		۳۰+۱	۵۹/۹	۳۰/۵ پارگی
	SA151209DK		۳۶/۵+۱	۶۱/۰	پارگی پارگی

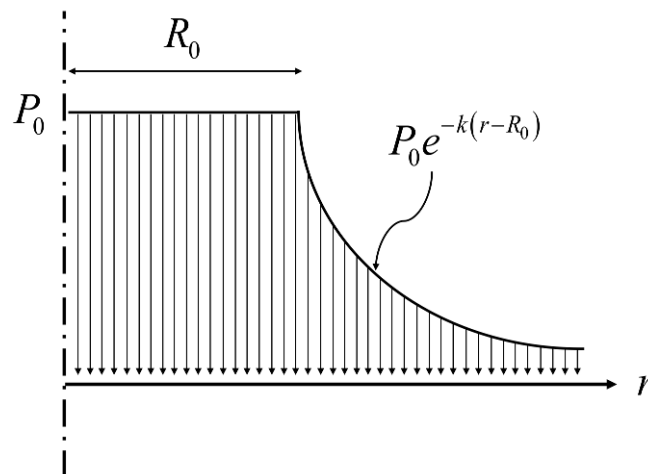
۳- مدل سازی المان محدود

۳-۱- اعمال بارگذاری دفعی غیریکنواخت

مطالعه حاضر بر تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های دایره‌ای یک لایه و چند لایه تحت بارگذاری انفجاری با توزیع غیریکنواخت متمرکز شده است. مؤثرترین روش برای توصیف بار انفجار روی ورق می‌تواند تبدیل انفجار به فشار تحریک کننده و آنی سطحی باشد. باین حال، برای مواردی که بار انفجاری در فاصله‌های بزرگ تر از شعاع ورق منفجر شود، برای اعمال بار روی صفحه باید از معادلات فضای اویلری-لاگرانژی [۲۵] و روابط کانوپ [۲۶] استفاده کرد. در روش اول، محیط اویلری از محصولات منفجره و هوا تشکیل شده و از فرمول‌های اویلری استفاده می‌کند در حالی که نقاط مش ساختاری توسط فرمولاسیون لاگرانژی تعریف شده‌اند. این روش زمان محاسبات را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد؛ بنابراین، در این پژوهش به منظور کوتاه کردن زمان فرآیند انجام بارگذاری روی مدل‌های عددی فرض می‌شود که مطابق با شکل ۲، بار انفجاری غیریکنواخت، توزیعی یکنواخت و خطی به اندازه شعاع خرج انفجاری (R_0) داشته باشد [۲۷] و پس از آن به صورت نمایی روی قسمت باقیمانده ورق در

در جرم‌های برابر قبل از وقوع حالت‌های مختلف شکست بود. نتایج نشان داد که به ترتیب ساختار دولایه ۳+۳ میلی‌متر، ساختار ۴+۲ میلی‌متر، ورق یک لایه ۶ میلی‌متری و در نهایت ساختار سه لایه ۲+۲+۲ میلی‌متری بهترین عملکرد انفجاری را در مقابل بار دفعی غیریکنواخت دارند.

در این سری از آزمایش‌ها [۱۹ و ۲۰]، تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در شرایط دریافت بار دفعی قرار گرفتند. نمونه‌های آزمایشی به صورت مربعی شکل در ابعاد ۴۰۰×۴۰۰ میلی‌متر بین دو نگه‌دارنده فولادی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر و سوراخی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر در مرکز با پیچ گیردار و در نهایت به آونگ بالستیک سوار و ثابت شدند. برای اعمال بارگذاری انفجاری به نمونه‌های آزمایشی، از مواد منفجره سی‌فور به شکل دیسک با قطر ۳۳ میلی‌متر استفاده شد و روی یک پد فوم پلی‌استر به ضخامت ۱۲ میلی‌متر سوار شد. همچنین برای اتصال برقی ماده منفجره به مرکز ورق از یک نازل به جرم ۱ گرم استفاده شد. سرعت تقریبی سوختن ماده منفجره ۷۵۰۰ متر بر ثانیه است [۲۰]. برخی از نتایج تجربی این تحقیق در جدول ۲ گردآوری شده است.



شکل ۲. نحوه توزیع بار دفعی غیریکنواخت

Fig. 2. Localized impulsive loading distribution

می‌آید [۲۷ و ۲۸].

جهت شعاعی با تابعی مطابق رابطه ۱ اعمال شود. این رابطه نشان می‌دهد که بار دفعی غیریکنواخت تابع زمان و فاصله خرج از مرکز ورق است [۲۸]:

$$k = 130 - 261(R_0/R) + 948(R_0/R)^2 \quad (4)$$

$$0.15 < R_0/R < 0.6$$

$$P(r, t) = P_1(r) \cdot P_2(t) \quad (1)$$

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی، نسبت R/R_0 محدود می‌شود؛ هرچند که با توجه به نسبت در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش‌های این تحقیق که $0/2$ است، این معادله تجربی برای مطالعه حاضر برقرار هست. در نهایت، ایمپالس کلی به صورت معادله زیر تعریف می‌گردد [۲۷ و ۲۸].

که در آن

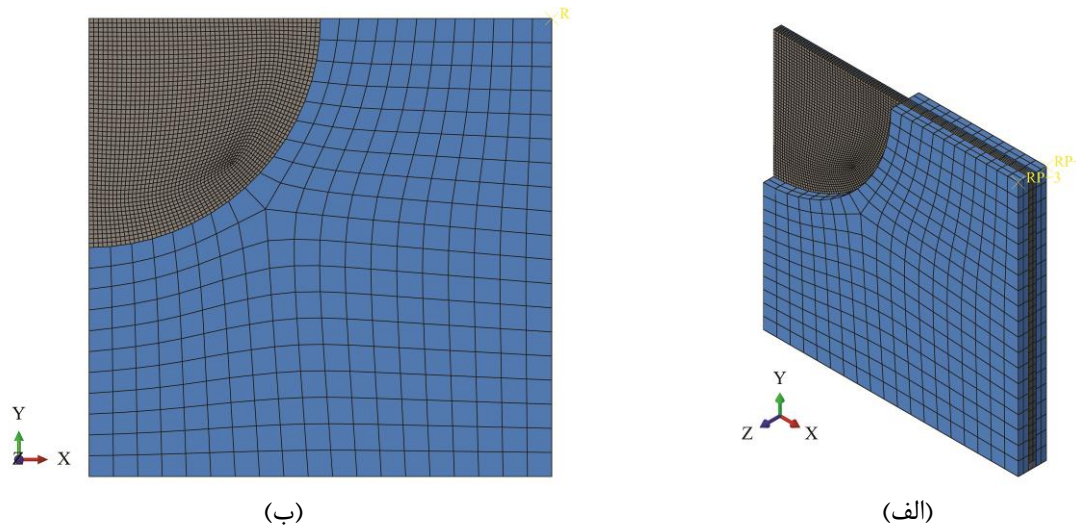
$$P_1(r) = \begin{cases} P_0 & r \leq R_0 \\ P_0 e^{-k(r-R_0)} & R_0 < r < R \\ 0 & r \geq R \end{cases} \quad (2)$$

$$I = 2\pi \int_0^R \int_0^\infty P(r, t) dr dt \quad (5)$$

$$P_2(t) = e^{2t/t_0} \quad (3)$$

گاهی برای بارگذاری وابسته به مکان و زمان که در آن‌ها این دو وابستگی قابل تفکیک باشند، می‌توان از امکانات خود نرم‌افزار استفاده نمود. حال اگر این دو وابستگی قابل تفکیک نباشند، استفاده از سابروتین نویسی ضرورت دارد. سابروتین این امکان را به کاربر می‌دهد بارگذاری را به صورت تابعی از زمان و مکان همچنین وابسته

در معادلات فوق، R_0 و R به ترتیب شعاع بار انفجاری و ورق را مشخص کنید، در حالی که k و t_0 به ترتیب ثابت تابع‌نمایی و مشخصه زمان برای پالس فشار هستند [۲۷ و ۲۸]. مشخصه زمان برای پالس فشار با تقسیم شعاع بار انفجاری بر سرعت سوختن ماده منفجره به دست می‌آید. ثابت تابع‌نمایی از طریق معادله تجربی زیر به دست



شکل ۳. مدل سه بعدی ساختارهای دایره‌ای یک لایه و چندلایه در مقیاس کامل: الف) مدل سه بعدی، ب) مش بندی

Fig. 3. Full scale 3D numerical model for single- and multi-layered circular plates; a) 3D model, b) FE mesh

مرزی برای یک ساختار چندلایه در شکل ۳ نشان داده شده است که مطابق با تحقیق [۱۹ و ۲۰] است. در این شکل برای گره‌های نشان داده شده رو محورهای تقارن ZX و ZY، از شرایط مرزی متقارن استفاده شده است. در حالی که دو لبه دیگر بین دو نگه دارنده با عناصر سه بعدی صلب بسته شدند. طول اضافی ۱۰۰ میلی متر در هر طرف ورق برای سطح تماس با نگه دارنده در نظر گرفته شده است. برای تعریف المان مش برای ورق از عنصر جامد استفاده شده که یک عنصر هشت گره‌ای کاهشی و با کنترل ساعت شنی است.

تمام مدل‌های عددی بین دو نگه دارنده فوقانی و تحتانی در امتداد محیط ورق سفت و محکم بسته شده‌اند و از نیروی نگه دارنده برای تعریف این بخش استفاده شده است. گیره‌ها با استفاده از المان‌های چهار گره‌ای سه بعدی گسسته اعمال شدند. تماس سخت با جدایی مجاز به عنوان رفتار عمودی یا نرمال و همچنین تماس پنالتی با ضریب ۰/۹ به عنوان رفتار مماس تعریف شدند [۲۰]. این موضوع، وضعیت مرزی واقع گرایانه یک نگه دارنده واقعی را شبیه سازی می‌کند که کمی اجازه کشیدگی و لغزش در ورق را می‌دهد. برای کاهش زمان محاسبه، پارتیشن‌هایی نیز به عنوان مناطق بارگذاری و تماس خارجی ایجاد شد. در کلیه تنظیمات، اندازه مش در منطقه بارگذاری $0.1 \times 1 \times 1$ میلی متر در نظر گرفته شد، در حالی که برای مناطق تماس

به شماره المان، شماره نقطه انتگرال گیری و لایه مشخص نماید. لذا در این تحقیق، به منظور مدل سازی توزیع بار انفجاری روی سطح ورق از سابروتین VDLOAD (بارگذاری Explicit) در نرم افزار فرترن استفاده می‌شود که با توجه به میزان ایمپالس آزمایش‌ها، تابع فشار را تخمین می‌زند و به عنوان ورودی به ورق اعمال می‌کند. سابروتین نویسی در آباکوس به زبان برنامه نویسی فرترن انجام می‌شود؛ از این رو، برای استفاده از این قابلیت در آباکوس نیاز به لینک کردن کامپایلر زبان فرترن با آباکوس است چراکه هسته اصلی محاسباتی در نرم افزار آباکوس با این زبان برنامه نویسی نوشته شده است. برای این منظور از نسخه مناسب نرم افزار ویژوال استودیو در حکم بستر برنامه نویسی استفاده شد که کامپایلر فرترن روی آن سوار شد.

۳-۲- هندسه و شرایط مرزی

در این پژوهش، مدل‌های سه بعدی ساختارهای دایره‌ای یک لایه و چندلایه در مقیاس کامل با استفاده از نرم افزار آباکوس توسعه داده شده است. با توجه به تقارن ساختار در هر دو جهت و همچنین کاهش هزینه‌های محاسباتی، تنها یک چهارم از هر ورق یک لایه و چندلایه با استفاده از شرایط مرزی مناسب در طول صفحات تقارن مدل سازی شده است. ابعاد، سطح بارگذاری، تولید مش و شرایط

خارجی، اندازه مش کمی افزایش داده شد.

۳-۳- مدل ساختاری ماده و مدل شکست

جهت ارزیابی پدیده نفوذ پرتابه در اهداف و همچنین بارگذاری انفجار سازه‌ها، مشخصه‌های مکانیکی و حرارتی مواد نقش مهمی بر پاسخ نهایی دارند و تأثیر این پارامترها روی دقت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی بسیار زیاد است؛ لذا در پژوهش حاضر، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل الاستو ویسکو-پلاستیک و شکست جانسون-کوک که پیش‌تر در سال ۱۹۸۵ میلادی ارائه شده، استفاده شده است که اثر نرخ کرنش و همچنین تغییرات دمایی را روی تنش سیلان در نظر می‌گیرد. مدل الاستو ویسکو-پلاستیک جانسون-کوک شامل اثر تنش تسلیم، جریان پلاستیک، سخت‌شوندگی نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم‌شدن به دلیل گرمایش آدیاباتیک است. در این مدل، تنش معادل فون میسر $\bar{\sigma}$ به‌عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل $\bar{\epsilon}^{pl}$ ، نرخ کرنش پلاستیک معادل $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ ، نرخ کرنش پلاستیک مرجع معادل $\dot{\epsilon}_0$ و دمای همگن \hat{T} مطابق رابطه تجربی (۶) بیان می‌گردد [۲۹ و ۳۰]:

$$\bar{\sigma} = \underbrace{\left[A + B \left(\bar{\epsilon}^{pl} \right)^n \right]}_{\text{Hardening}} \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \hat{T}^m \right]}_{\text{Softening}} \quad (6)$$

که در آن A تنش تسلیم ماده، B و n پارامترهای کارسختی، m کمیت ثابت ماده و C شاخص سخت‌شوندگی نرخ کرنش است. این پنج کمیت ثابت ماده از انجام آزمون‌های کشش مختلف روی ماده به دست می‌آیند. دمای همگن برای یک ماده به‌صورت رابطه (۷) تعریف می‌گردد [۲۹ و ۳۰]:

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & T < T_0 \\ (T - T_0) / (T_{\text{melt}} - T_0) & T_0 \leq T \leq T_{\text{melt}} \\ 1 & T > T_{\text{melt}} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن T_0 و T_{melt} به ترتیب دمای فعلی، دمای محیط و دمای نقطه ذوب مواد هستند. از آنجاکه پاسخ دینامیکی در محیط‌های انفجاری بسیار سریع است، با فرض اتلاف کار پلاستیکی که به افزایش

درجه حرارت آدیاباتیک تبدیل می‌شود، می‌توان تغییرات دمایی در زمان یک نمونه را مطابق رابطه (۸) تعیین کرد [۲۹ و ۳۰]:

$$\Delta T = \int_0^{\bar{\epsilon}^{pl}} \frac{\chi}{\rho C_p} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^{pl} \quad (8)$$

که در آن ρ چگالی ماده، C_p بیانگر ظرفیت حرارتی ماده در فشار ثابت و χ ضریب تیلور-کوینی است. معمولاً ضریب تیلور-کوینی برای مواد فلزی ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود بدان معنا که ۹۰٪ کار پلاستیک به گرما تبدیل می‌شود و ۱۰٪ کار پلاستیک در مواد ذخیره می‌شود [۲۹ و ۳۰].

معیار خسارت جانسون-کوک یک مدل از مدل‌های آسیب نرم است و توانایی پیش‌بینی شکست نرم را نیز دارا است. لذا به‌منظور توصیف رفتار شکست ماده در ورق، یک مکانیسم خرابی شامل یک معیار شروع آسیب همراه با قانون تکامل آسیب تعریف شده است. معیار شروع آسیب بر اساس مدل شکست جانسون-کوک است و بر اساس مقدار کرنش پلاستیک معادل در نقطه ادغام المان طبق رابطه (۹) توصیف شده است. آسیب در یک المان در حالی آغاز می‌شود که پارامتر آسیب انباشته ω بیش از یک باشد [۲۹ و ۳۰]:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}} \right), \quad 0 \leq \omega \leq 1 \quad (9)$$

که در آغاز آسیب $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ به‌عنوان پلاستیک معادل پلاستیک تعیین شده است و $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ نشان‌دهنده افزایش پلاستیک معادل پلاستیک است که در طی چرخه تغییر شکل اتفاق می‌افتد.

در این مدل شکست جانسون-کوک، کرنش معادل در لحظه آغاز شکست ماده به‌صورت تابعی از تنش سه محوره بی‌بعد، نرخ کرنش بی‌بعد و دمای بی‌بعد در نظر گرفته می‌شود. بر طبق این مدل، مقدار کرنشی معادلی که یک ماده تا لحظه شکست می‌تواند تحمل نماید، مطابق رابطه (۱۰) برحسب کمیت‌های ثابت ماده D_1 تا D_5 محاسبه می‌شود [۲۹ و ۳۰].

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = \underbrace{\left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right]}_{\text{Stress triaxiality}} \underbrace{\left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 + D_5 \hat{T} \right]}_{\text{Temperature}} \quad (10)$$

تجربی ارائه شده در مطالعه حاضر و همچنین نتایج تجربی موجود در مراجع [۱۹ و ۲۰] ارزیابی می‌گردد. شبیه‌سازی‌های انجام شده برحسب نسبت بیشترین خیز دائمی ساختار به ضخامت آن برای چیدمان‌های مختلف، ارائه می‌شود. در شبیه‌سازی‌های عددی، یک مدل ۱/۴ متقارن سه‌بعدی ساخته شده و با امان‌های خطی چهارضلعی جامد ۱×۲×۲ میلی‌متر مش زده شده است. برای تعیین ضرایب ماده در مدل پلاستیسیته جانسون-کوک برای دو ماده دومکس ۵۰۰ و ۷۰۰ که سعید احمد در تحقیقات تجربی خود استفاده کرده بود، از نتایج تحقیق در مراجع [۱۹ و ۲۰] استفاده شد. برای تعریف تماس بین نگه‌دارنده‌ها و ورق‌های مدل‌سازی شده، الگوریتم تماس سطح به سطح با استفاده از روش پنالتی بکار گرفته شد. همچنین هیچ‌گونه فضا یا شکافی بین سطح ورق‌ها در ساختارهای چندلایه در نظر گرفته نشد. مدت‌زمان بارگذاری بار انفجاری در این مرحله مطابق با آنچه در بخش بارگذاری بیان شد، اعمال گردید و همچنین میزان کل زمان برای اعمال بارگذاری و اجازه تغییر شکل به ورق ۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شد. این بدان معناست که بارگذاری انفجاری رو نمونه و ساختار تنها در زمانی بسیار کوتاه در حد میکروثانیه اعمال می‌گردد و باقی‌مانده زمان صرف تغییر شکل و ارتعاش سازه می‌گردد.

۴- مطالعه پارامتریک

در این بخش، مطالعه پارامتریک عمیقی روی تغییر شکل پلاستیک بزرگ ورق‌های دایره‌ای یک‌لایه و دولایه تحت بارهای انفجار غیریکنواخت برای تولید داده‌های خام و ارزیابی مقاومت انفجاری ساختارهای یک‌لایه و دولایه انجام شده است. در تمامی مدل‌های عددی، شعاع‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر برای ورق‌های دایره‌ای کاملاً گیردار با ضخامت معادل ۶ میلی‌متر برای کل ساختار در نظر گرفته شده است. چهار حالت مختلف برای شعاع خرج انفجاری شامل ۱۶/۵، ۲۰، ۲۷ و ۳۱/۵ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شده است تا بتوان مطالعه مناسبی روی اثر شعاع خرج انفجاری روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ساختارهای دایره‌ای دولایه تحت بارهای انفجار غیریکنواخت انجام داد. مطالعات روی سه ترکیب‌بندی مختلف ۳+۳، ۲+۴ و ۴+۲ میلی‌متر انجام شد تا بتوان محدوده گسترده‌ای از پاسخ‌های دینامیکی برای ساختارهای دولایه را پوشش داد؛ بنابراین، شش مدل مختلف عددی در نرم‌افزار امان محدود آباکوس ساخته شد و ۴۲۰ مورد مختلف در محدود

رفتار ماده برای شروع خسارت با تکامل آسیب تعریف می‌شود. تکامل آسیب، کاهش استحکام ماده را درحالی‌که معیار شروع آسیب ارضا شود، توضیح می‌دهد. فرآیند تکامل آسیب در حالی رخ می‌دهد که مقدار کرنش پلاستیک معادل انباشته برابر با $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ گردد و متغیر تکامل آسیب صفر است ($\omega=1, D=0$). همچنین متغیر تکامل آسیب برابر ۱ است، درحالی‌که کرنش پلاستیک معادل $\bar{\epsilon}^{pl}$ به مقدار بحرانی کرنش پلاستیک شکست معادل $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ می‌رسد. در این شرایط، کرنش پلاستیک شکست معادل $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ به شدت به طول مشخصه امان L به علت غیریکنواخت سازی کرنش بستگی دارد و نمی‌توان آن را به‌عنوان یک پارامتر ماده برای تعریف قانون تکامل آسیب استفاده کرد؛ بنابراین، قانون تکامل خسارت با رابطه (۱۱) برحسب جابجایی پلاستیک معادل تعریف می‌شود [۳۱]:

$$\bar{u}^{pl} = L(\bar{\epsilon}^{pl} - \bar{\epsilon}_D^{pl}) \quad (11)$$

که در آن L به هندسه امان بستگی دارد و آن را به‌عنوان ریشه مکعب حجم نقطه ادغام در مطالعه حاضر در نظر گرفته می‌شود. جابجایی پلاستیک معادل، طول مشخصه امان را جهت کاهش وابستگی مش از نتایج در محلی‌سازی کرنش در نظر می‌گیرد. یک شکل خطی از قانون تکامل خسارت از نظر جابجایی پلاستیک شکست معادل به شرح رابطه (۱۲) است [۳۱]:

$$D = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}}, \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (12)$$

معادله فوق تأیید می‌کند که سختی ماده هنگامی که جابجایی پلاستیک معادل برابر با جابجایی پلاستیک معادل در نقطه شکست باشد، کاملاً تخریب و تنزل می‌یابد. در هر زمان مشخص هنگام تجزیه و تحلیل یک امان آسیب‌دیده، تنش واقعی تنزل یافته^۱، برحسب تنش مؤثر به‌صورت رابطه (۱۳) بیان می‌شود [۳۱]:

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (13)$$

۳-۴- اعتبارسنجی مدل امان محدود

در این بخش، اعتبار و صحت مدل‌های عددی با مقایسه نتایج

1 True degraded stress

جدول ۳. ضرایب مدل پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک برای سه ماده مختلف آلومینیوم، فولاد و مس

Table 3. Parameters for Johnson-Cook plasticity and fracture models for aluminum, steel, and copper materials

مس [۳۰]	فولاد (Weldox 460E)		علائم	خواص ماده
	آلومینیوم (1100-H12)	[۳۲]		
۱۲۴	۶۵/۷۶۲	۲۰۰	E (GPa)	مدول الاستیسیته
۰/۳۴	۰/۳	۰/۳۳	ν	ضریب پواسون
۸۹۶۰	۲۷۰۰	۷۸۵۰	ρ (kg/m ³)	چگالی
۹۰	۱۴۸/۳۶۱	۴۹۰	A (GPa)	تنش تسلیم و سخت‌شوندگی
۲۹۲	۳۴۵/۵۱۳	۸۰۷	B (GPa)	
۰/۳۱	۰/۱۸۳	۰/۷۳	n	کرنش
۱	۱	۰/۰۰۰۵	$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)	سخت‌شوندگی نرخ کرنش
۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	C	
۲۹۳	۲۹۳	۲۹۳	T_0 (K)	
۱۳۵۶	۸۹۳	۱۸۰۰	T_{melt} (K)	دما
۱/۰۹	۰/۸۵۹	۰/۹۴	m	
۳۸۳	۹۲۰	۴۵۲	C_p (J/kgK)	گرمای ویژه
۰/۵۴	۰/۰۷۱	۰/۰۷۰۵	D_1	ضریب شکست
۴/۸۹	۱/۲۴۸	۱/۷۳۲	D_2	
-۳/۰۳	-۱/۱۴۲	-۰/۵۴	D_3	
-۰/۰۱۴	۰/۱۴۷	-۰/۰۱۲۳	D_4	
۱/۱۲	.	.	D_5	

ابعادی می‌تواند یک روش مفید برای مطالعه این‌گونه فرآیندها باشد. در این بخش از تحقیق، سعی بر آن است تا بتوان روابطی تجربی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ساختار دولایه دایره‌ای در معرض بارگذاری غیریکنواخت با استفاده از نتایج مطالعه پارامتریک ارائه شود. باید در نظر داشت که تعیین اعداد بی‌بعد در تجزیه و تحلیل گامی مهم قبل از به‌دست‌آوردن فرمول تجربی است. چندین محقق از قبیل جونز و لی [۳۴]، پارک و چو [۳۵]، میرزابابی مستوفی و همکاران [۳۶-۵۱] و بوراک [۵۲] از تحلیل ابعادی برای به‌دست‌آوردن قوانین مقیاس بندی و ارزیابی رفتار ساختارها در برابر بارگذاری دفعی استفاده کرده‌اند.

در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰، بابایی و میرزابابی مستوفی به ترتیب معادلات تجربی جدیدی را به همراه اعداد بی‌بعد اصلاح‌شده برای ورق‌های یک‌لایه فولادی مستطیلی و دایره‌ای در معرض بارگذاری

ایمپالس ۱۰ تا ۱۱۰ نیوتن در ثانیه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. این محدوده به‌اندازه کافی وسیع است تا بتوان تمامی پاسخ‌های غیر الاستیک و شکست نمونه را پوشش داد. مدت‌زمان بارگذاری انفجاری در نظر گرفته‌شده در مدل‌های عددی با توجه به شعاع خرج‌های ۱۶/۵، ۲۰، ۲۷ و ۳۱/۵ میلی‌متر به ترتیب ۲/۲، ۲/۶۶، ۳/۶ و ۴/۲ میکروثانیه لحاظ شد. همچنین سه ماده مختلف آلومینیوم، فولاد و مس مطابق با جدول ۳ برای بخش مطالعه پارامتریک در نظر گرفته‌شده است.

۵- مدل‌سازی بی‌بعد

بررسی اثر بار دفعی روی سازه‌ها بسیار پیچیده و وابسته به بسیاری از پارامترهای مؤثر است؛ بنابراین مدل‌سازی تجربی بر اساس تحلیل

بر اساس تئوری پای-باکینگهام، رابطه (۱۷) می‌تواند به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌گردد:

$$\pi_0 = C \cdot (\pi_1)^{\alpha_1} \cdot (\pi_2)^{\alpha_2} \cdot (\pi_3)^{\alpha_3} \cdot (\pi_4)^{\alpha_4} \cdot (\pi_5)^{\alpha_5} \quad (18)$$

که در آن

$$\pi_0 = \frac{W_{0,f}}{H_t} \text{ or } \frac{W_{0,b}}{H_t}, \quad \pi_1 = \lambda_f, \quad \pi_2 = \lambda_b, \quad \pi_3 = \theta_f, \quad \pi_4 = \lambda_b, \quad \pi_5 = \frac{R_0}{R} \quad (19)$$

$$H_t = H_f + H_b \quad (20)$$

اکنون برای پیدا کردن ضرایب مجهول موجود در رابطه (۱۸) از روش تجزیه مقادیر منفرد [۳۶ و ۳۷] استفاده می‌شود. این روش می‌تواند منطق موجود بین داده‌های ورودی و خروجی را شناسایی کند.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- صحت‌سنجی مدل عددی

در اولین گام از این بخش برای صحت‌سنجی مدل عددی، به مقایسه نتایج تجربی انجام‌شده در این تحقیق و نتایج عددی پرداخته می‌شود. بدین منظور، نتایج تجربی و عددی مربوط به بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه مس-آلومینیوم تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت در جدول ۴ نشان داده شده است.

در دومین گام از این بخش و برای نشان دادن دقت مدل عددی، نتایج تجربی موجود در مراجع [۱۹ و ۲۰] با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در شکل ۴، نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای بیش‌ترین خیز دائمی ساختارهای دایروی یک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی غیریکنواخت ارائه شده است.

در شکل ۴، خط منقطع قرمز ۴۵ درجه بیان‌کننده منطبق‌بودن نتایج تجربی گزارش‌شده توسط احمد با نتایج به‌دست‌آمده از

دفعی یکنواخت و غیریکنواخت ارائه دادند که در آن اثرات هندسه ساختار، اینرسی و بار دینامیکی اعمال‌شده، مقاومت مواد در برابر تغییر شکل پلاستیک، حساسیت نرخ کرنش ماده، شعاع و فاصله خرج تا سازه برای بارگذاری غیریکنواخت در نظر گرفته شده بود. در سال ۲۰۲۰ [۳۷]، آن‌ها نسبت بیشترین خیز دائمی ورق دایره‌ای به ضخامت آن در معرض بار دفعی غیریکنواخت را به صورت رابطه (۱۴) بیان نمودند با این توضیح که در این حالت فاصله بین خرج و ورق صفر بوده و خرج انفجاری روی نمونه قرار داده شده است.

$$\frac{W_0}{H} = f\left(\lambda, \theta, \frac{R_0}{R}\right) \quad (14)$$

که در آن مطابق با روابط (۱۵) و (۱۶) عدد بی‌بعد جونز و θ حساسیت ماده به نرخ کرنش را در نظر می‌گیرد. در رابطه ۱۶، q و D کمیت‌های ثابت ماده در معادله کوپر-سیموندز هستند و مقادیر آن به راحتی از مراجع قابل استخراج است.

$$\lambda = \frac{4\rho V_0^2}{\sigma_0} \left(\frac{L}{H}\right)^2 \quad (15)$$

$$\theta = \left(\frac{I}{3\sqrt{2}\pi R^4 D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (16)$$

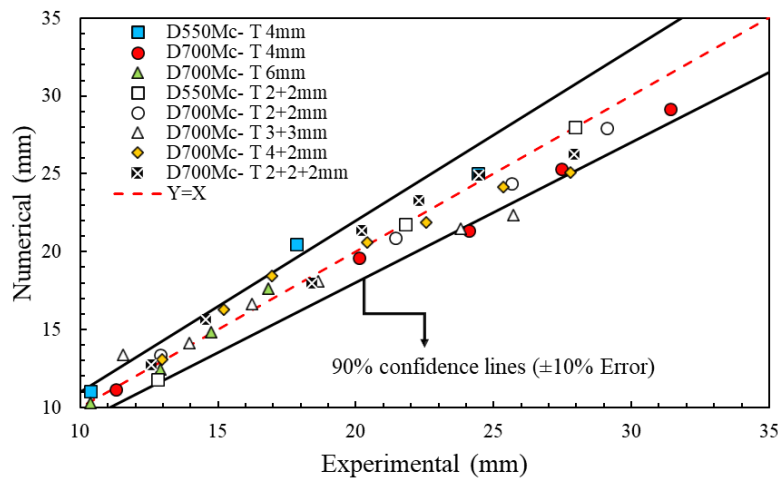
با استفاده از ایده ارائه‌شده برای ساختارهای یک‌لایه دایره‌ای تحت بار دفعی یکنواخت و غیریکنواخت در سال ۲۰۲۰، نسبت بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت برای ساختارهای دایره‌ای دولایه در معرض بار دفعی غیریکنواخت به صورت رابطه ۱۷ بیان می‌شود که زیرنویس‌های f و b به ترتیب نماد لایه‌های جلویی و عقبی هستند:

$$\frac{W_0}{H} = f\left(\lambda_f, \lambda_b, \theta_f, \lambda_b, \frac{R_0}{R}\right) \quad (17)$$

جدول ۴. مقایسه نتایج تجربی تحقیق حاضر و شبیه‌سازی‌های عددی برای لایه عقبی ساختارهای دولایه مس-آلومینیوم

Table 4. A comparison between experimental and numerical results conducted in the current study for double-layered copper-aluminum plates

اختلاف (%)	خیز دائمی (mm)		ایمپالس (N.s)	چیدمان
	شبیه‌سازی عددی	تجربی		
۴/۳	۱۴/۷	۱۴/۱	۷/۹	Cu-Al-1
۵/۳	۱۷/۸	۱۶/۹	۹/۸	Cu-Al-2
۵/۱	۲۲/۴	۲۱/۳	۱۳/۴	Cu-Al-3
۶/۳	۲۶/۸	۲۵/۲	۱۵/۱	Cu-Al-4
۵/۶	۳۲/۱	۳۰/۴	۱۷/۳	Cu-Al-5
۴/۸	۳۷/۳	۳۵/۶	۲۰/۲	Cu-Al-6



شکل ۴. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی [۱۹ و ۲۰] برای خیز دائمی لایه‌های عقبی

Fig. 4. A comparison between experimental [19, 20] and numerical results for permanent deflection of back layers

شبیه‌سازی‌های عددی و نتایج تجربی تحقیق حاضر و ادبیات تحقیق [۱۹ و ۲۰] می‌توان از مدل عددی برای مطالعه پاسخ دینامیکی و رفتار ورق‌های دولایه فلزی با جنس‌های مختلف تحت بار انفجاری غیریکنواخت استفاده کرد.

نتایج مربوط به بیشترین خیز دائمی و همچنین گذرای ساختارهای یک‌لایه و چندلایه دایروی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت در جدول ۵ و جدول ۶ داده شده است. شایان‌ذکر است که نتایج پاسخ گذرای ساختارها در اولین قله از تاریخچه زمانی جابجایی‌های نقطه مرکزی ورق ثبت شده است. همان‌طور که در ستون اختلاف در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است، برای کلیه موارد، اختلاف بین نتایج

شبیه‌سازی‌های عددی است. محدوده سفیدرنگ بین دو خط ممتد مشکی نشان‌دهنده محدوده خطای ۱۰٪ است؛ بنابراین، توافق بسیار خوبی بین نتایج تجربی با شبیه‌سازی‌های عددی برای چیدمان‌های مختلف لایه‌ها مشاهده می‌شود. اختلاف جزئی موجود بین این دودسته از نتایج را می‌توان به‌دقت اندازه‌گیری ضرایب ماده در مدل پلاستیسیته و شکست جانسون کوک و همچنین این واقعیت که تمامی ایمپالس ناشی از انفجار ماده منفجره به پاندول بالستیک وارد نمی‌شود، نسبت داد. هرچند با توجه به محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های مدل پلاستیسیته و شکست جانسون کوک، این مقدار از اختلاف قابل‌چشم‌پوشی است. با توجه به اختلاف کم و قابل‌قبول بین نتایج

جدول ۵. نتایج تجربی [۱۹ و ۲۰] و شبیه‌سازی‌های عددی برای پاسخ دائمی و گذرای ساختارهای یک‌لایه تحت بار دفعی غیریکنواخت

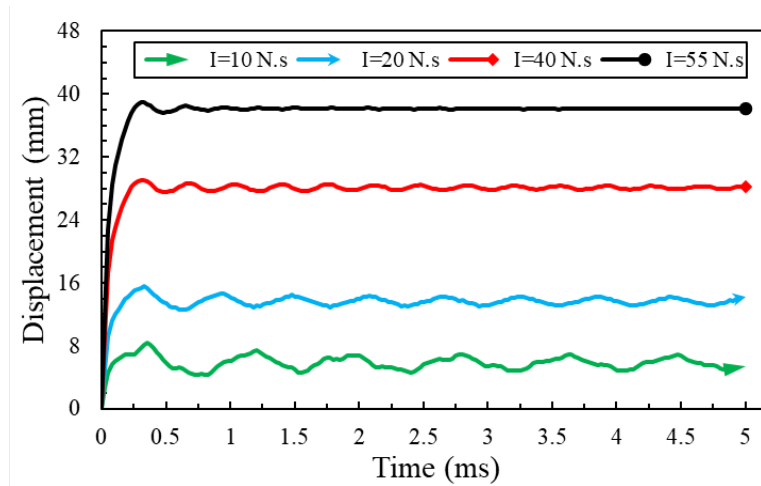
Table 5. Experimental [19, 20] and numerical results for transient and permanent responses of monolithic plates under localized impulsive loading

اختلاف (%)	شبیه‌سازی عددی		تجربی خیز دائمی (mm)	ایمپالس (N·s)	جرم خرج (g)	چیدمان یک‌لایه
	خیز گذرا (mm)	خیز دائمی (mm)				
۶/۷	۱۵	۱۱/۱	۱۰/۴	۲۲	۸	M4-1-550MC
۵/۷	۲۸/۱	۲۵/۸	۲۴/۴	۴۵/۴	۲۳/۵	M4-2-550MC
۲/۷	۱۴/۴	۱۱/۶	۱۱/۳	۲۲/۵	۱۰	M4-1-700MC
۰/۵	۲۱/۱	۲۰/۲	۲۰/۱	۴۱/۱	۱۸	M4-2-700MC
۷/۳	۳۰	۲۹/۱	۳۱/۴	۶۸/۸	۳۳	M4-3-700MC
۶/۷	۱۳/۸	۱۱/۱	۱۰/۴	۳۸/۳	۱۸	M6-1-700MC
۴/۶	۱۵/۴	۱۳/۵	۱۲/۹	۴۵/۴	۲۲	M6-2-700MC
۳/۴	۱۶/۹	۱۵/۳	۱۴/۸	۵۴/۳	۲۷	M6-3-700MC
۳	۱۸/۶	۱۷/۳	۱۶/۸	۶۷/۱	۳۳	M6-4-700MC

جدول ۶. نتایج تجربی [۱۹ و ۲۰] و شبیه‌سازی‌های عددی برای پاسخ دائمی و گذرای ساختارهای دو لایه تحت بار دفعی غیریکنواخت

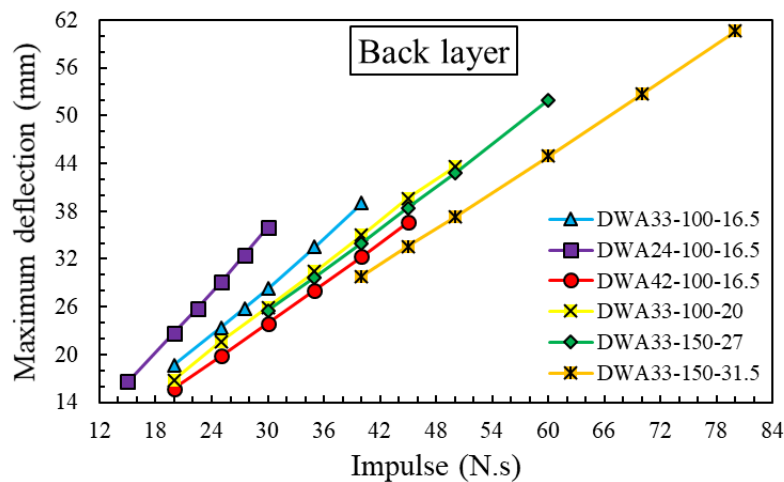
Table 6. Experimental [19, 20] and numerical results for transient and permanent responses of double-layered plates under localized impulsive loading

اختلاف (%)	شبیه‌سازی عددی				تجربی خیز دائمی (mm)	ایمپالس (N·s)	جرم خرج (g)	چیدمان دو لایه	
	خیز گذرا (mm)		خیز دائمی (mm)						
	عقب	جلو	عقب	جلو					
۵/۹	۲۳/۹	۲۰/۶	۲۳/۱	۱۹/۲	۲۱/۸	-	۳۶/۱	۱۶	D22-1-550MC
۲/۵	۲۹/۵	۲۵/۸	۲۸/۷	۲۴/۴	۲۸/۰	-	۴۵/۶	۲۳/۵	D22-2-550MC
۶/۲	۱۵/۲	۱۱/۶	۱۳/۷	۱۰/۲	۱۲/۹	-	۲۱/۷	۱۰	D22-1-700MC
۳/۷	۲۱/۵	۱۹/۹	۲۰/۶	۱۵/۸	۲۱/۴	-	۳۵/۴	۱۸	D22-2-700MC
۶/۹	۲۷/۹	۲۲/۶	۲۷/۱	۲۱/۲	۲۹/۱	-	۵۲/۸	۲۷	D22-4-700MC
۴/۳	۱۵/۶	۱۴/۱	۱۴/۶	۱۲/۳	۱۴/۰	-	۴۲/۳	۲۲	D33-1-700MC
۲/۵	۱۸/۴	۱۶/۴	۱۶/۶	۱۴/۵	۱۶/۲	-	۵۴/۱	۲۷	D33-2-700MC
۴/۸	۱۸/۷	۱۷/۳	۱۷/۸	۱۶/۰	۱۸/۷	-	۶۲/۱	۳۳	D33-3-700MC
۵/۳	۱۴/۸	۱۴/۰	۱۳/۷	۱۰/۹	۱۳/۰	-	۳۷/۳	۱۸	D42-1-700MC
۱/۵	۲۰/۶	۱۹/۸	۲۰/۱	۱۸/۰	۲۰/۴	-	۶۶/۱	۳۳	D42-2-700MC
۴/۹	۲۲/۰	۲۱/۰	۲۱/۵	۱۹/۷	۲۲/۶	-	۷۲/۷	۳۸	D42-3-700MC
۶/۳	۲۴/۵	۲۳/۳	۲۳/۷	۲۱/۸	۲۵/۳	-	۸۵/۵	۴۴	D42-4-700MC



شکل ۵. تاریخچه جابجایی-زمان عددی برای مرکز ساختار ۲۰-۱۰۰-۳۳ DWW در ایمپالس‌های متفاوت

Fig. 5. Numerical displacement-time history for DWW33-100-20 configurations at the plate center for different impulses



شکل ۶. نمودار نتایج شبیه‌سازی به دست آمده برای بیشترین خیز دائمی لایه عقبی ساختارهای دولایه DWA بر حسب ایمپالس‌های مختلف

Fig. 6. The obtained numerical results for back layer deflection of DWA versus different impulses

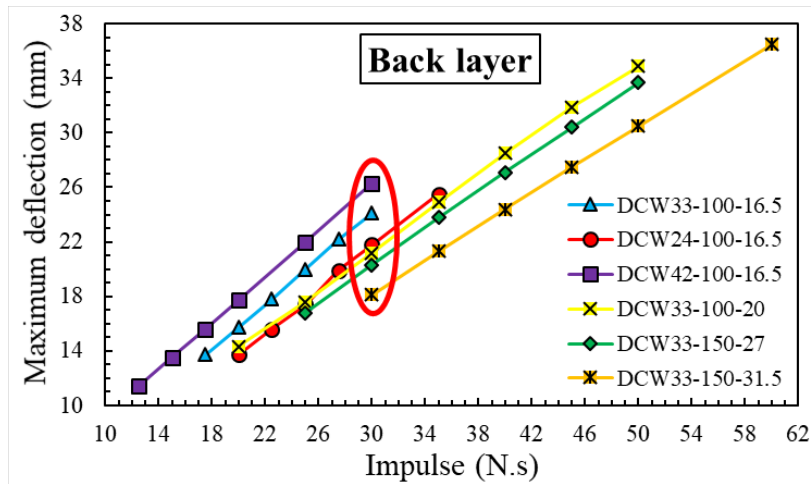
تجربی و شبیه‌سازی از نظر بیش‌ترین خیز دائمی لایه عقبی کمتر از ۷/۳ درصد است و توافق معقولی مشاهده می‌شود. در نتیجه، از مدل عددی می‌توان با اطمینان برای ارزیابی تغییر شکل پلاستیک بزرگ ورق‌های دایره‌ای یک‌لایه و چندلایه تحت بارهای انفجار غیریکنواخت استفاده کرد.

دفعی با توزیع غیریکنواخت در شدت‌های مختلف تا جایی که در نمونه پدیده شکست رخ دهد، قرار گرفتند. این بدان معنی است که شبیه‌سازی عددی تا جایی جلو رفت که ورق‌ها دچار پارگی در محل اعمال بار در مرکز شوند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای مطالعه پارامتریک در جداول الف، ب و ج (ارائه‌شده در بخش پیوست) برای سه ترکیب‌بندی مختلف ۳+۳، ۲+۴ و ۴+۲ میلی‌متر ارائه‌شده که در آن از علامت و نشان $DM_f M_b H_f H_b - R - R_0$ برای بیان هر ساختار استفاده‌شده است. در این نشان، حرف D، نشان‌دهنده ساختار

تجربی و شبیه‌سازی از نظر بیش‌ترین خیز دائمی لایه عقبی کمتر از ۷/۳ درصد است و توافق معقولی مشاهده می‌شود. در نتیجه، از مدل عددی می‌توان با اطمینان برای ارزیابی تغییر شکل پلاستیک بزرگ ورق‌های دایره‌ای یک‌لایه و چندلایه تحت بارهای انفجار غیریکنواخت استفاده کرد.

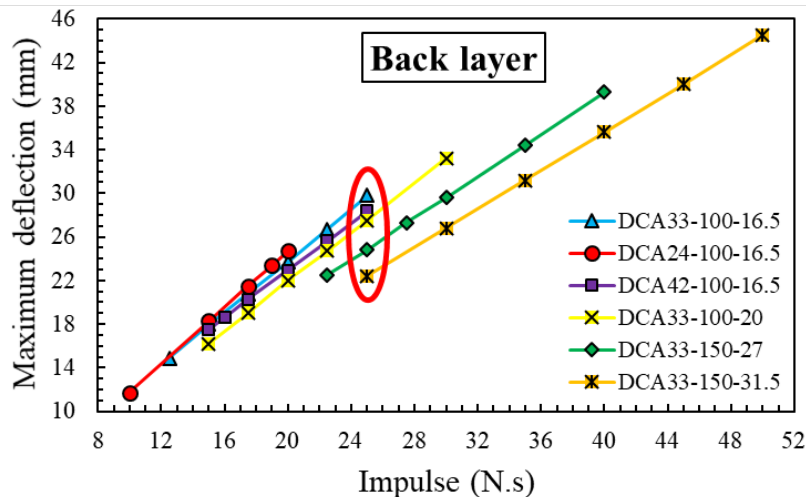
۲-۶- نتایج مطالعه پارامتریک

در مطالعه عددی حاضر، ترکیب‌بندی‌های مختلف در معرض بار



شکل ۷. نمودار نتایج شبیه‌سازی به دست آمده برای بیشترین خیز دائمی لایه عقبی ساختارهای دولایه DCW بر حسب ایمپالس‌های مختلف

Fig. 7. The obtained numerical results for back layer deflection of DCW versus different impulses



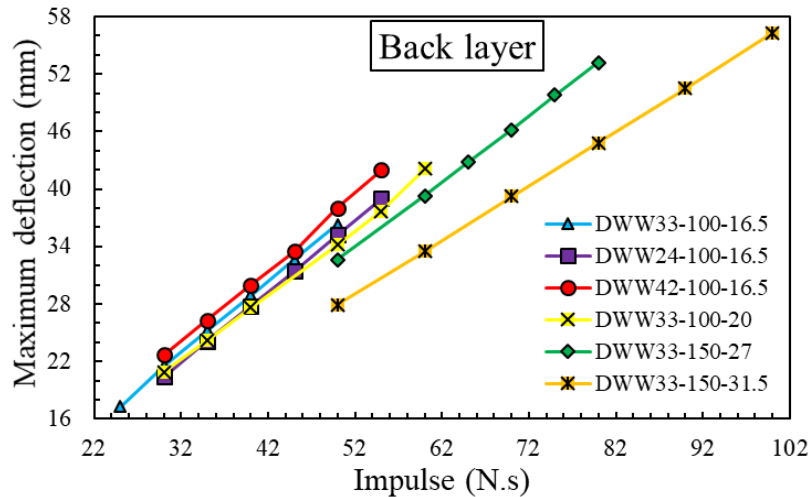
شکل ۸. نمودار نتایج شبیه‌سازی به دست آمده برای بیشترین خیز دائمی لایه عقبی ساختارهای دولایه DCA بر حسب ایمپالس‌های مختلف

Fig. 8. The obtained numerical results for back layer deflection of DCA versus different impulses

۵۵ نیوتن در ثانیه است، در شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل، ویژگی‌های پاسخ ساختار به دلیل بارگذاری دفعی غیریکنواخت توضیح می‌دهد و می‌توان از آن نتیجه گرفت که ارتعاشات الاستیک و برگشت الاستیک فوری با افزایش ایمپالس و همچنین برای ایمپالس‌های بیشتر از ۱۰ نیوتن در ثانیه از بین می‌روند، انرژی کرنش الاستیک ناچیز است و بیشتر تغییر شکل‌ها به صورت پلاستیک و دائمی است. در شکل ۶، شکل ۷، شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰، مقدار جابجایی و تغییر شکل پلاستیک برای مرکز لایه عقبی بر حسب ایمپالس‌های

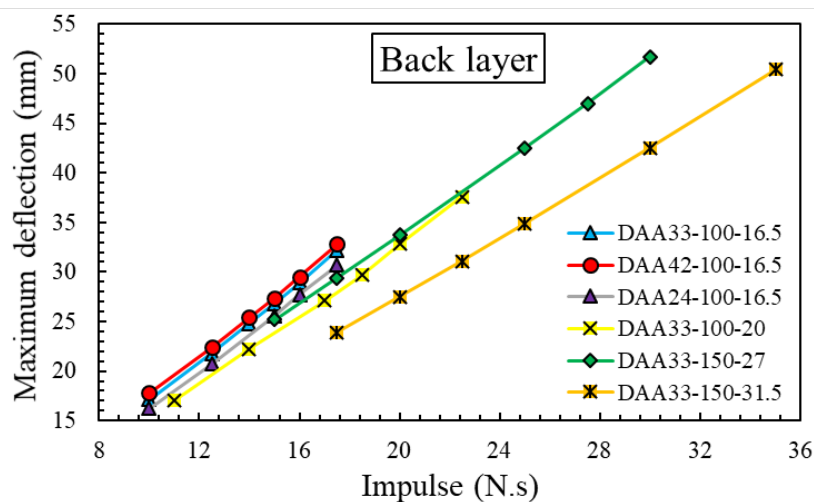
دولایه، M_f ماده لایه جلویی، M_b ماده لایه عقبی، H_f ضخامت لایه جلویی، H_b ضخامت لایه عقبی، R شعاع ورق و R_0 شعاع خرج انفجاری است. در این جداول، چگالی سطحی ساختار است که از رابطه $\rho_A = \rho_f H_f + \rho_b H_b$ به دست می‌آید که در آن ρ_f و ρ_b به ترتیب بیانگر چگالی لایه جلویی و عقبی و H_f و H_b نیز به ترتیب بیانگر ضخامت لایه جلویی و عقبی است.

تاریخچه جابجایی-زمان نمونه ۲۰-۱۰۰-۳۳ DWW در مرکز ورق هنگامی که ایمپالس‌های اعمالی به نمونه برابر با ۱۰، ۲۰، ۴۰ و



شکل ۹. نمودار نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده برای بیشترین خیز دائمی لایه عقبی ساختارهای دولایه DWW برحسب ایمپالس‌های مختلف

Fig. 9. The obtained numerical results for back layer deflection of DWW versus different impulses



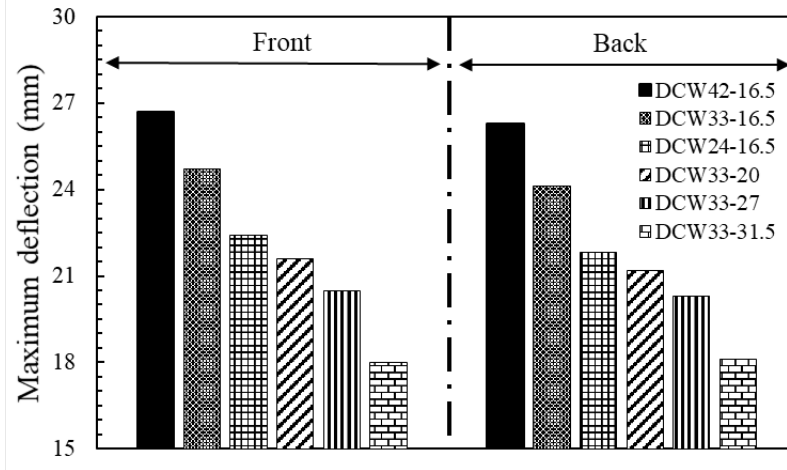
شکل ۱۰. نمودار نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده برای بیشترین خیز دائمی لایه عقبی ساختارهای دولایه DAA برحسب ایمپالس‌های مختلف

Fig. 10. The obtained numerical results for back layer deflection of DAA versus different impulses

چینی متفاوت است و مقاومت انفجاری ساختارهای مختلف دولایه با یکدیگر کاملاً تفاوت دارد. این اثر، همان‌گونه که در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است، برای ساختارهای DWA و DCW زمانی که مقادیر شعاع خرج و ایمپالس ثابت است، بیشتر احساس می‌شود. برای حالت‌های مشابه بارگذاری، مقایسه بین مقدار بیشترین خیز دائمی لایه‌های عقبی بیان‌گر آن است که زمانی که اهداف از ترکیب مواد مشابه ساخته شده‌اند (DAA و DWW)، ساختار دولایه ۲+۴

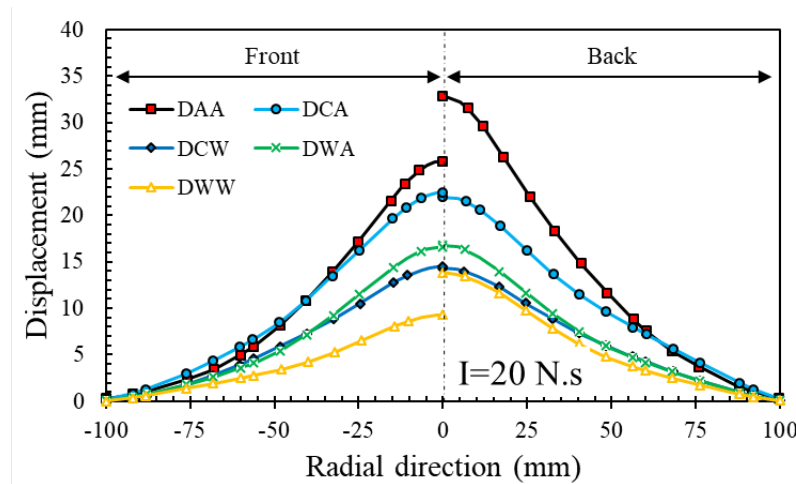
مختلف برای نمونه‌های دولایه با مواد متفاوت فولاد Weldom 460E، آلومینیوم H12-1100 و مس نمایش داده شده است.

در شکل‌های ۶ تا ۱۰، همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش ایمپالس و به دلیل افزایش انرژی جنبشی، مقدار بیشترین خیز دائمی لایه‌های عقبی و جلویی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به‌دست‌آمده در این بخش نشان‌دهنده آن است که مکانیسم تغییر شکل پلاستیک و شکست برای هر نوع لایه



شکل ۱۱. نمودار به دست آمده از نتایج شبیه سازی عددی برای بیشترین خیز دائمی لایه های جلویی و عقبی در ساختار DCW در ایمپالس مشخص ۳۰ نیوتن در ثانیه

Fig. 11. The obtained numerical results for back and front layer deflections of DCW configuration at the impulse of 30 N.s

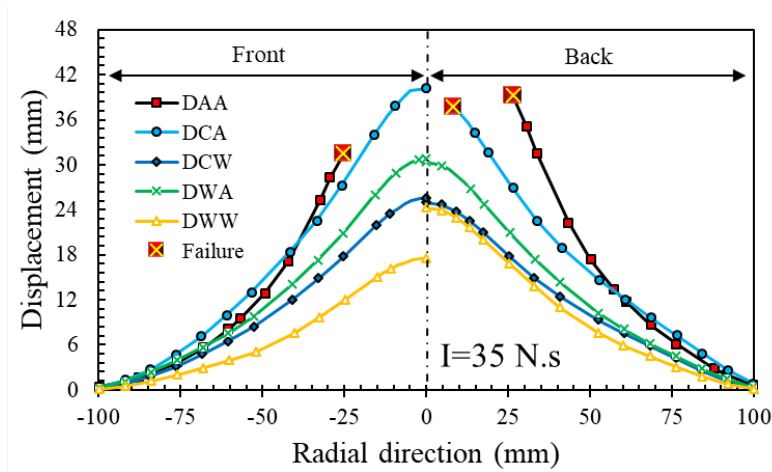


شکل ۱۲. تغییر شکل دائمی به دست آمده از شبیه سازی های عددی برای لایه بندی های مختلف ساختارهای دولایه در ایمپالس ۲۰ نیوتن در ثانیه

Fig. 12. The obtained numerical results for permanent deformation shape of different double-layered configurations at the impulse of 20 N.s

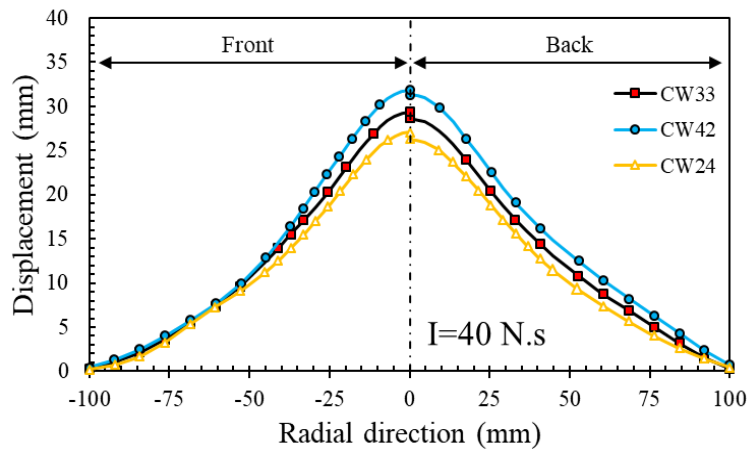
است. هرچند برای ساختارهای دولایه حاصل از ترکیب لایه های غیر هم جنس که در آن چگالی لایه های عقبی و جلویی نزدیک به یکدیگر نیست، ترکیب بندی ۲+۴ میلی متر دارای ضعیف ترین عملکرد است. این نتیجه به علت آن است که در ساختارهای مورد بحث، کمترین چگالی مربوط به لایه ضخیم تر است. همان طور که در ناحیه قرمز رنگ بیضوی نمایش داده شده است، در این منطقه، در ایمپالس یکسان، مقاومت انفجاری ساختارها با افزایش شعاع خرج افزایش می یابد. برای

میلی متر کمترین خیز مرکزی و بهترین عملکرد انفجاری را در برابر بار دفعی غیریکنواخت دارد. این نتیجه به علت آن است که لایه دوم در مقایسه با لایه اول ضخیم تر است، سفتی و مقاومت خمشی بالاتری دارد و همچنین بیشتر انرژی ناشی از انفجار توسط لایه دوم جذب می گردد. نتایج به دست آمده از این بخش از شبیه سازی ها بیانگر آن است که نتیجه فوق الذکر همچنین برای ساختارهایی که در آن ها میزان چگالی لایه جلویی و عقبی به هم نزدیک است، برقرار



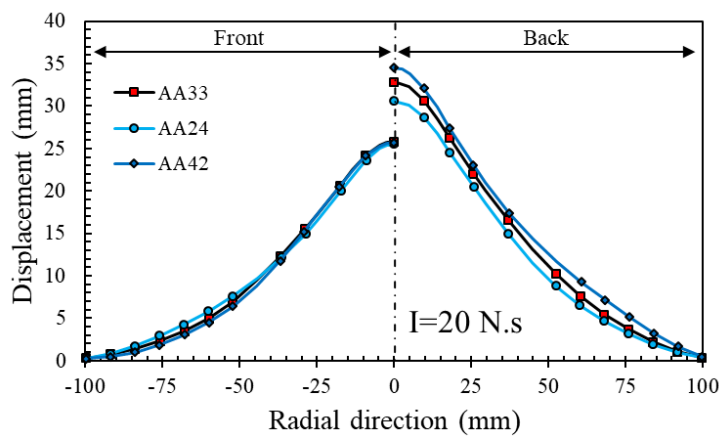
شکل ۱۳. تغییر شکل دائمی به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی برای لایه‌بندی‌های مختلف ساختارهای دولایه در ایمپالس ۳۵ نیوتن در ثانیه

Fig. 13. The obtained numerical results for permanent deformation shape of different double-layered configurations at the impulse of 35 N.s



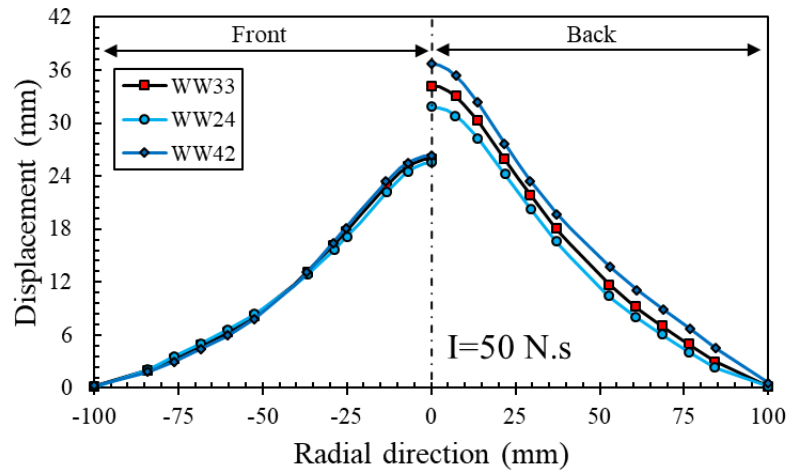
شکل ۱۴. تغییر شکل دائمی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی برای لایه‌بندی‌های مختلف ساختارهای دولایه DCW در ایمپالس ۴۰ نیوتن در ثانیه

Fig. 14. The obtained numerical results for permanent deformation shape of DCW double-layered configuration at the impulse of 40 N.s



شکل ۱۵. تغییر شکل دائمی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی برای لایه‌بندی‌های مختلف ساختارهای دولایه DAA در ایمپالس ۲۰ نیوتن در ثانیه

Fig. 15. The obtained numerical results for permanent deformation shape of DAA double-layered configuration at the impulse of 20 N.s



شکل ۱۶. تغییر شکل دائمی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی برای لایه‌بندی‌های مختلف ساختارهای دولایه DWW در ایمپالس ۵۰ نیوتن در ثانیه

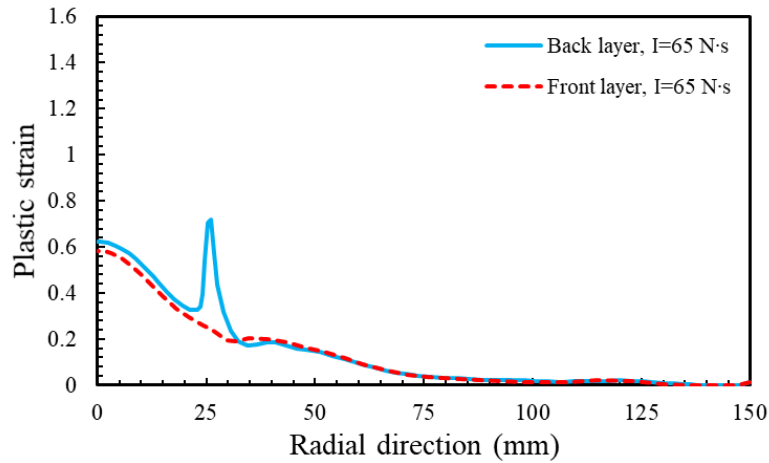
Fig. 16. The obtained numerical results for permanent deformation shape of DWW double-layered configuration at the impulse of 50 N.s

علت است که لایه اول استحکام و همچنین مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک کمتری نسبت به لایه دوم دارد. برای ساختارهای دولایه ساخته‌شده از مواد مشابه، تفاوت بین بیشترین خیز دائمی لایه عقبی و جلویی قابل توجه بوده به طوری که در ساختارهای DWW و DAA به ترتیب در ایمپالس‌های ۵۰ و ۲۰ نیوتن در ثانیه خیز دائمی لایه عقبی از جلویی بسیار بیشتر است. با مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه‌شده در جداول الف تا ج و شکل ۱۲ می‌توان نشان داد که مقاومت انفجاری ساختار DWW در مقایسه با سایر ساختارها در یک ایمپالس مشخص بسیار بهتر است. قابل ذکر است که هیچ‌گونه رابطه آشکاری بین چگالی سطحی و بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی وجود ندارد. همچنین مشاهده شد که اگرچه ساختار DCW بیشترین چگالی سطحی را دارد (۵۴/۴ کیلوگرم بر مترمربع)؛ اما بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی آن از ساختار DWW بیشتر است (شکل ۱۲ و شکل ۱۳). با مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی برای اهداف DWW و DAA در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که برای لایه‌بندی‌های متفاوت، پروفیل‌های تغییر شکل لایه‌های جلویی و عقبی تقریباً با یکدیگر منطبق هستند.

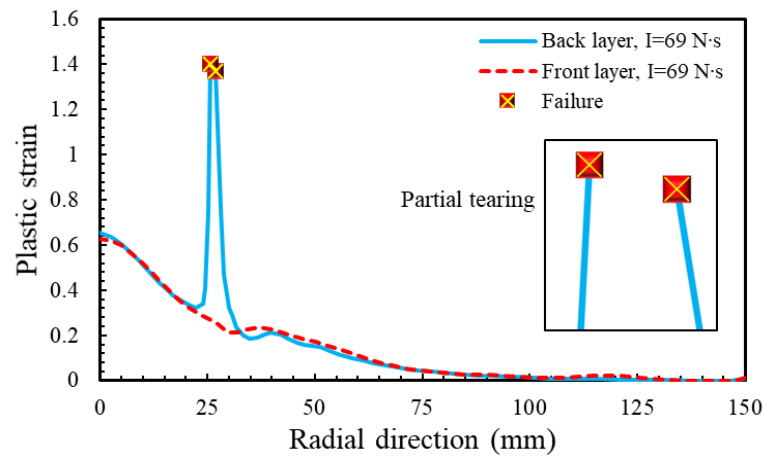
به‌منظور مشاهده حالت‌های مختلف شکست در ساختارهای دولایه با لایه‌بندی‌های متفاوت، شبیه‌سازی‌های عددی بیشتری انجام

درک و مشاهده بهتر این پدیده، در شکل ۱۱، بیشترین خیز دائمی لایه عقبی و جلویی برای ساختار دولایه DCW نمایش داده شده است. لازم به ذکر است در ساختار DAA، مقاومت انفجاری با کاهش نسبت شعاع ورق به شعاع خراج افزایش می‌یابد.

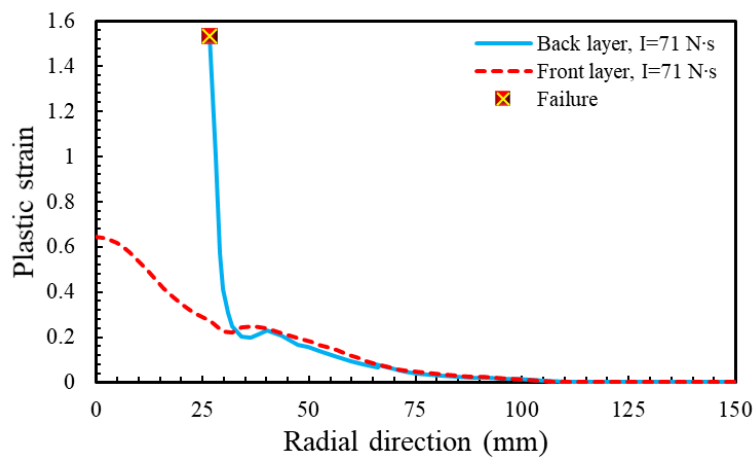
پروفیل‌های تغییر شکل دائمی به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای ترکیب‌بندی‌های مختلف ساختارهای دولایه در امتداد خطوط مرکزی برای حالتی که شعاع خراج ۲۰ میلی‌متر است، در شکل ۱۲، شکل ۱۳، شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده شده است. در شکل‌های ارائه‌شده، پروفیل تغییر شکل دائمی لایه‌های عقبی و جلویی به ترتیب در سمت راست و چپ شکل نمایش داده شده است. مطابق انتظار و آنچه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ نشان داده شده است. پروفیل تغییر شکل در ناحیه مرکزی ورق به‌صورت مخروطی بوده که این نشان‌دهنده توزیع غیریکنواخت بار انفجاری روی ساختارها است. برای مواردی که ساختارهای دولایه از مواد مشابه یا متفاوت ساخته‌شده باشند، بین نتایج بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی تمایز کیفی واضحی وجود دارد، به طوری که برای ساختار دولایه با ترکیب مواد غیر هم‌جنس، بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. مطابق شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، برای لایه‌بندی‌های DCW و DCA، بیشترین خیز دائمی لایه جلویی کمی بیشتر از لایه عقبی است و این بدان



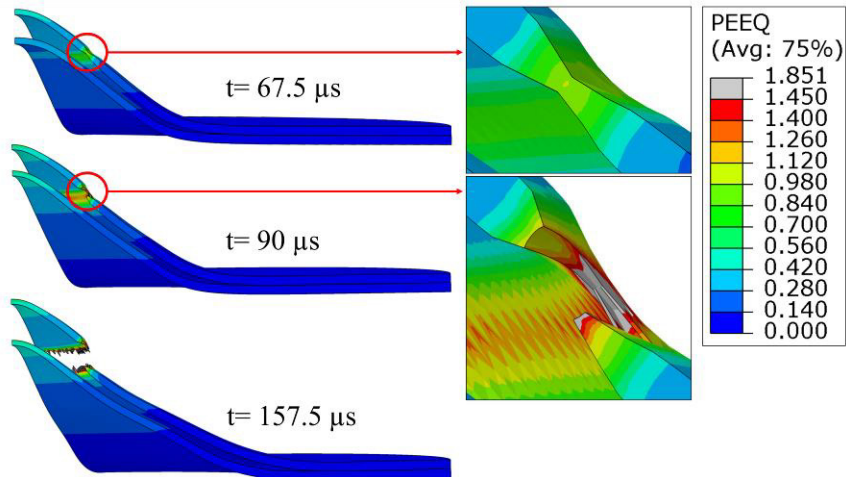
شکل ۱۷. گستره کرنش پلاستیک معادل برای لایه‌های جلویی و عقبی ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ در ایمپالس ۶۵ نیوتن در ثانیه
Fig. 17. Plastic strain profiles front and back layers of DWA33-150-27 at the impulse of 65 N·s



شکل ۱۸. گستره کرنش پلاستیک معادل برای لایه‌های جلویی و عقبی ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ در ایمپالس ۶۹ نیوتن در ثانیه
Fig. 18. Plastic strain profiles front and back layers of DWA33-150-27 at the impulse of 69 N·s

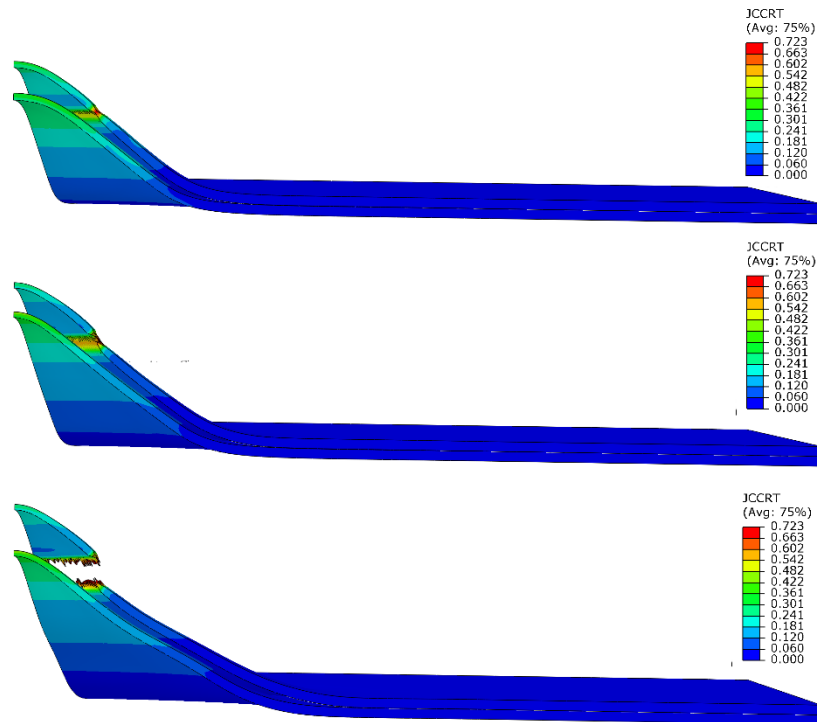


شکل ۱۹. گستره کرنش پلاستیک معادل برای لایه‌های جلویی و عقبی ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ در ایمپالس ۷۱ نیوتن در ثانیه
Fig. 19. Plastic strain profiles front and back layers of DWA33-150-27 at the impulse of 71 N·s



شکل ۲۰. کانتور کرنش پلاستیک معادل برای ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ در ایمپالس ۷۱ نیوتن در ثانیه

Fig. 20. Equivalent plastic strain for DWA33-150-27 at the impulse of 71 N·s



شکل ۲۱. کانتور آسیب برای ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ در ایمپالس ۷۱ نیوتن در ثانیه

Fig. 21. Damage contour for DWA33-150-27 at the impulse of 71 N·s

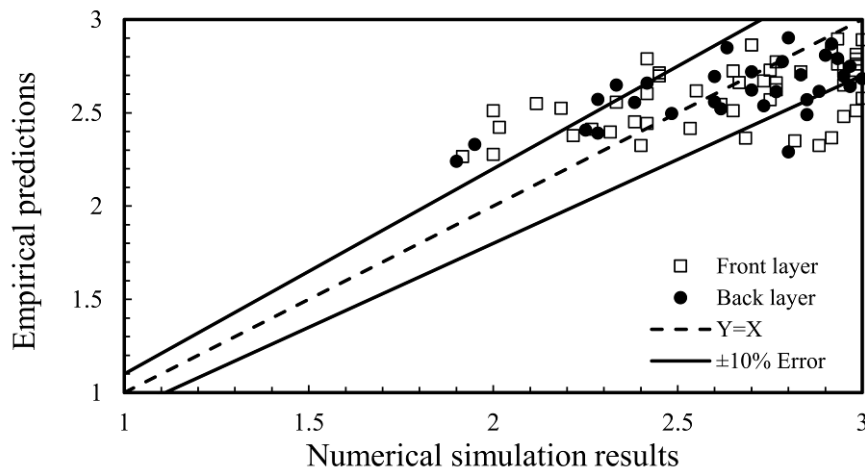
پاره شدن جزئی در ناحیه گلوبی و همچنین پارگی کامل در ناحیه مرکزی لایه عقبی ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ به ترتیب در ایمپالس های ۶۵، ۶۹ و ۷۱ نیوتن در ثانیه رخ داده است. گستره کرنش پلاستیک معادل برای لایه های عقبی و جلویی در شکل ۱۷، شکل ۱۸

شد. با توجه به نتایج به دست آمده، هیچ گونه پارگی جزئی یا کاملی در مرزهای گیردار ساختارهای دولایه با لایه بندی های مختلف مشاهده نشد. به عنوان مثال، رفتار شکست ساختار ۳۳DWA-۱۵۰-۲۷ مورد بررسی قرار گرفته است. گلوبی یا نازک شدن غیریکنواخت،

جدول ۷. ضرایب مجهول معادلات تجربی

Table 7. Unknown coefficients for suggested empirical equations

محدوده پاسخ	ضرایب مجهول						لایه
	α_5	α_4	α_3	α_2	α_1	C	
$\frac{W_0}{H_t} \leq 3$	۰/۱۸۹	۰/۰۶۷	۰/۰۰۴	۰/۰۹۰	۰/۰۷۵	۱/۷۳۰	جلو
	۰/۰۷۱	۰/۰۴۵	۰/۰۲۵	۰/۱۰۱	۰/۰۸۴	۱/۳۷۰	عقب
$3 < \frac{W_0}{H_t} \leq \frac{9}{2}$	۰/۲۰۶	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴	۰/۰۶۱	۰/۰۶۰	۲/۸۲۵	جلو
	۰/۰۲۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۵۱	۰/۰۵۰	۲/۴۵۰	عقب
$\frac{9}{2} < \frac{W_0}{H_t} \leq 6$	۰/۱۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۳۹	۰/۰۳۶	۴/۰۴۵	جلو
	۰/۰۷۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۴/۴۹۵	عقب
$6 < \frac{W_0}{H_t} \leq \frac{15}{2}$	۰/۱۵۳	-۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	۰/۰۲۷	۰/۰۴۲	۵/۵۸۶	جلو
	۰/۱۰۸	-۰/۰۱۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	۷/۳۸۰	عقب
$\frac{W_0}{H_t} > \frac{15}{2}$	۰/۱۲۲	-۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۷۷	۰/۱۲۷	۲/۵۶۵	جلو
	۰/۰۲۱	-۰/۰۰۹	۰/۰۶۵	۰/۰۳۱	۰/۰۵۴	۵/۴۰۷	عقب

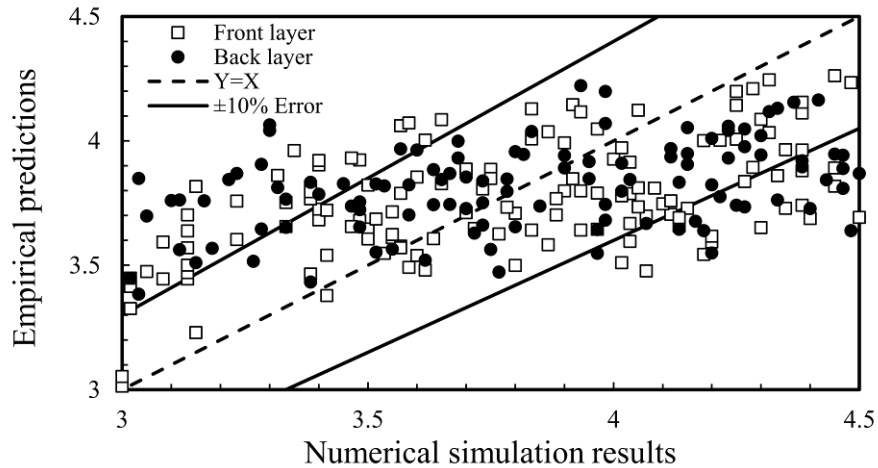


شکل ۲۲. مقایسه مقادیر معادلات تجربی با نتایج مطالعه پارامتریک برای پیش‌بینی نسبت بیشترین خیز دائمی به ضخامت کلی ($\frac{W_0}{H_t} \leq 3$)

Fig. 22. Comparison of empirical design formulas to predict the central deflection–thickness ratio with parametric study results ($\frac{W_0}{H_t} \leq 3$)

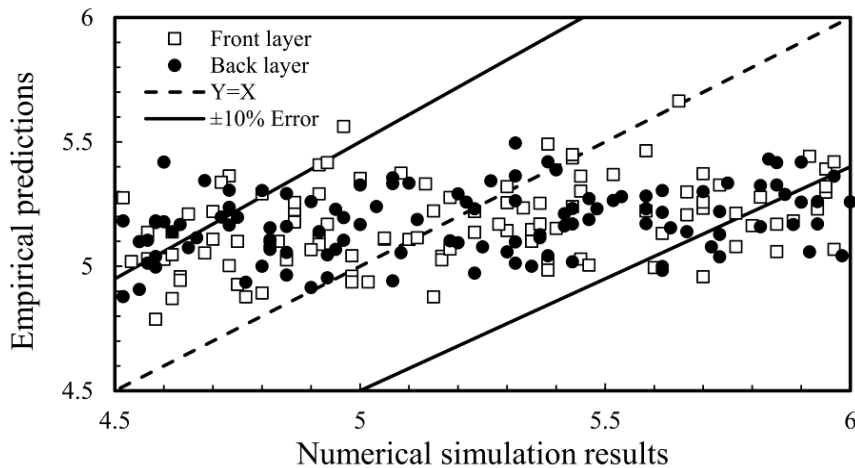
و شکل ۱۹ ارائه شده است. معادل در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که در لایه عقبی پدیده کلویی شدن و پارگی به ترتیب در زمان ۶۷/۵ و ۹۰ میکروثانیه رخ می‌دهد. پدیده‌های نشان داده شده در این کامل منطبق با پدیده‌های مشاهده شده برای بارگذاری دفعی غیریکنواخت در مراجع [۱۹ و ۲۰]

در شکل ۲۰، حالت‌های شکست در لایه‌های عقبی و جلویی در ساختار DWA۳۳-۱۵۰-۲۷ در ایمپالس ۷۱ نیوتن در ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. کانتورهای رسم شده برای کرنش پلاستیک



شکل ۲۳. مقایسه مقادیر معادلات تجربی با نتایج مطالعه پارامتریک برای پیش‌بینی نسبت بیشترین خیز دائمی به ضخامت کلی ($3 < \frac{W_0}{H_t} \leq \frac{9}{2}$)

Fig. 23. Comparison of empirical design formulas to predict the central deflection–thickness ratio with parametric study results ($3 < \frac{W_0}{H_t} \leq \frac{9}{2}$)



شکل ۲۴. مقایسه مقادیر معادلات تجربی با نتایج مطالعه پارامتریک برای پیش‌بینی نسبت بیشترین خیز دائمی به ضخامت کلی ($\frac{9}{2} < \frac{W_0}{H_t} \leq 6$)

Fig. 24. Comparison of empirical design formulas to predict the central deflection–thickness ratio with parametric study results ($\frac{9}{2} < \frac{W_0}{H_t} \leq 6$)

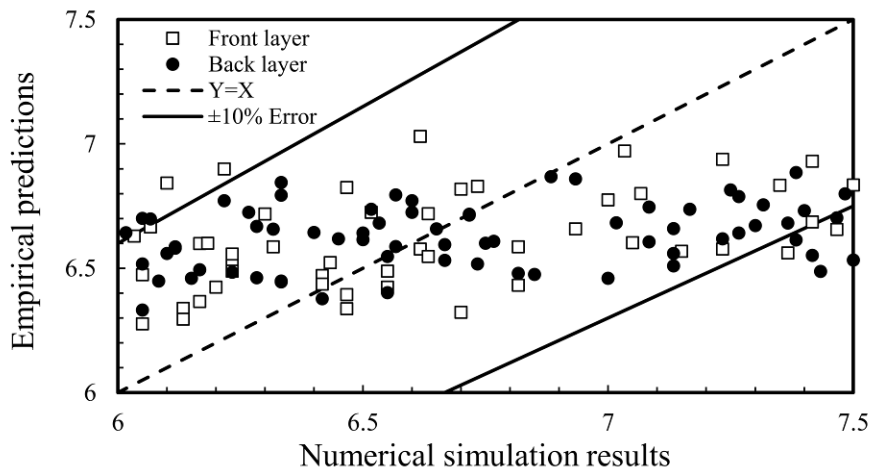
در پنج بازه در نظر گرفته شده است. ضرایب مجهول معادلات تجربی در جدول ۷ نشان داده شده است.

برای ساختارهای دولایه با لایه‌بندی‌های مختلف، مقایسه بین نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی در شکل ۲۲، شکل ۲۳، شکل ۲۴، شکل ۲۵ و شکل ۲۶ نشان داده شده است.

است. در ادامه و در شکل ۲۱ کانتور آسیب برای همین سه نمونه ارائه می‌گردد.

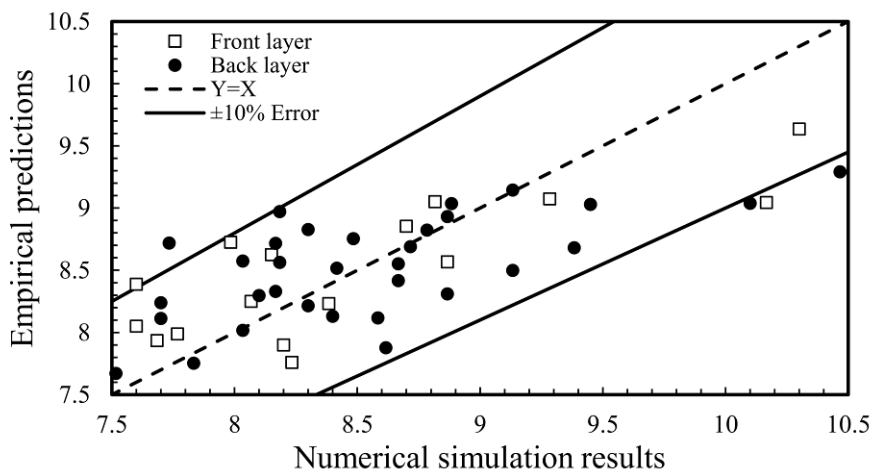
۳-۶- نتایج مدل‌سازی بی‌بعد

برای دقت بیشتر معادلات تجربی در پیش‌بینی پاسخ سازه، روابط



شکل ۲۵. مقایسه مقادیر معادلات تجربی با نتایج مطالعه پارامتریک برای پیش‌بینی نسبت بیشترین خیز دائمی به ضخامت کلی $(6 < \frac{W_0}{H_t} \leq \frac{15}{2})$

Fig. 25. Comparison of empirical design formulas to predict the central deflection–thickness ratio with parametric study results $(6 < \frac{W_0}{H_t} \leq \frac{15}{2})$



شکل ۲۶. مقایسه مقادیر معادلات تجربی با نتایج مطالعه پارامتریک برای پیش‌بینی نسبت بیشترین خیز دائمی به ضخامت کلی $(\frac{W_0}{H_t} \leq 3)$

Fig. 26. Comparison of empirical design formulas to predict the central deflection–thickness ratio g with parametric study results $(\frac{W_0}{H_t} \leq 3)$

مطالعه پارامتریک، روابط بی‌بعد برای پیش‌بینی نسبت بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی به ضخامت کلی برحسب کمیت‌هایی نظیر شعاع و ضخامت ورق، ایمپالس بار اعمالی، خواص مکانیکی ماده و لایه‌بندی‌ها ارائه شد که دقت خوبی داشت.

در تمامی مدل‌های عددی، شعاع‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر برای ورق‌های دایره‌ای کاملاً گیردار با ضخامت معادل ۶ میلی‌متر برای کل ساختار در نظر گرفته شد. چهار حالت مختلف برای شعاع خرج انفجاری شامل ۱۶/۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر، ۲۷ میلی‌متر و ۳۱/۵ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شد تا بتوان مطالعه مناسبی روی اثر شعاع خرج انفجاری روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ساختارهای دایره‌ای یک‌لایه و دولایه تحت بارهای انفجار غیریکنواخت انجام داد. مطالعات روی سه ترکیب‌بندی مختلف ۳+۳، ۲+۴ و ۴+۲ میلی‌متر انجام شد تا بتوان محدوده گسترده‌ای از پاسخ‌های دینامیکی برای ساختارهای دولایه را پوشش داد؛ بنابراین، شش مدل مختلف عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس ساخته شد و ۴۲۰ مورد مختلف در محدود ایمپالس ۱۰ تا ۱۱۰ نیوتن در ثانیه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج عددی شامل موارد زیر است:

- ۱) ارتعاشات الاستیک و برگشت الاستیک فتری با افزایش ایمپالس و همچنین برای ایمپالس‌های بیشتر از ۱۰ نیوتن در ثانیه از بین می‌روند و در ایمپالس‌های بالاتر از ۱۰ نیوتن در ثانیه انرژی کرنش الاستیک ناچیز بوده و بیشتر تغییر شکل‌ها به‌صورت پلاستیک و دائمی است.
- ۲) با افزایش ایمپالس و به دلیل افزایش انرژی جنبشی، مقدار بیشترین خیز دائمی لایه‌های عقبی و جلویی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.
- ۳) مکانیسم تغییر شکل پلاستیک و شکست برای هر نوع لایه چینی متفاوت است و مقاومت انفجاری ساختارهای مختلف دولایه با یکدیگر کاملاً تفاوت دارد. این اثر برای ساختارهای DWA و DCW زمانی که مقادیر شعاع خرج و ایمپالس ثابت است، بیشتر احساس می‌شود.
- ۴) برای حالت‌های مشابه بارگذاری، مقایسه بین مقدار بیشترین خیز دائمی لایه‌های عقبی بیان‌گر آن است که زمانی که

در این نمودارها، بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی نسبت به ضخامت کلی که از رابطه تجربی حاصل شده است برحسب نتایج شبیه‌سازی و مطالعه پارامتریک مشخص گردیده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، خط مشکی منقطع‌شده بیانگر این است که بیشترین خیز دائمی لایه نسبت به ضخامت در نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از معادلات تجربی با یکدیگر برابر بوده و مقدار خطا صفر است. همچنین باند ایجادشده بین دو خط سیاه محدوده نتایج پیش‌بینی‌شده با خطای کمتر از ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. برای همه لایه‌بندی‌ها، سازگاری خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از معادلات تجربی مشاهده می‌گردد به‌طوری‌که اکثر نقاط در محدوده قابل‌اطمینان قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، معادلات تجربی ارائه‌شده، پیش‌بینی خوبی از بیشترین خیز دائمی لایه‌های عقبی و جلویی ساختارهای دولایه دایره‌ای در معرض توزیع بار دفعی غیریکنواخت در محدوده ۱۱/۴ تا ۶۲/۸ میلی‌متر ارائه می‌دهد. شایان توجه است که این روابط نسبت به تغییر کمیت‌هایی نظیر شعاع و ضخامت ورق، ایمپالس بار اعمالی، خواص مکانیکی ماده و لایه‌بندی‌ها، مقاوم بوده و پیش‌بینی بسیار خوبی از خود در گستره وسیعی از داده‌ها نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف آن بود تا بتوان در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تجاری آباکوس به انجام شبیه‌سازی‌های موردنیاز برای بررسی پاسخ دینامیکی ساختارهای دایره‌ای دولایه هم‌جنس و غیر هم‌جنس تحت بارگذاری انفجاری با توزیع غیریکنواخت پرداخت و سپس معادله تجربی بر مبنای عدد بی‌بعد برای پیش‌بینی خیز نهایی این ساختارها ارائه داد. لذا، در اولین گام از این تحقیق، شش کار آزمایشگاهی روی ساختارهای دولایه مس-آلومینیوم انجام شد. در ادامه، با انجام شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، مدل‌های عددی ساخته‌شده با کارهای آزمایشگاهی انجام‌شده در تحقیق حاضر و داده‌های تجربی موجود در ادبیات تحقیق صحت‌سنجی شد. در گام بعدی، مطالعه پارامتریک عددی انجام شد تا بتوان به یک دید کلی از مقاومت انفجاری ساختارهای یک‌لایه و دولایه فلزی در معرض بارگذاری دفعی غیریکنواخت دست‌یافت. در مرحله نهایی، با استفاده از داده‌های

- study, International Journal of Impact Engineering, 74 45-36 (2014).
- [3] F. Zhu, Z. Wang, G. Lu, L. Zhao, Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading, Materials & Design, 100-91 (2009) (1)30.
- [4] 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, 125 106-93 (2019).
- [5] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: experimental studies, International journal of impact engineering, (2)8 186-171 (1989).
- [6] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part i: Theoretical considerations, International Journal of Impact Engineering, 170-159 (1989) (2)8.
- [7] S.C.K. Yuen, G. Nurick, The significance of the thickness of a plate when subjected to localised blast loads, Blast Impact Load. Struct, (499-471 (2000).
- [8] 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, 2736-2723 (2007) (10)29.
- [9] H. Gharababaei, A. Darvizeh, M. Darvizeh, Analytical and experimental studies for deformation of circular plates subjected to blast loading, Journal of mechanical Science and Technology, 1864-1855 (2010) (9)24
- [10] H. Babaei, A. Darvizeh, Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 526-507 (2011) (4)39.
- [11] C. Geretto, S.C.K. Yuen, G. Nurick, An experimental study of the effects of degrees of confinement on the response of square mild steel plates subjected to blast loading, International Journal of Impact Engineering, 79 44-32 (2015).

اهداف از ترکیب مواد مشابه ساخته شده‌اند (DAA و DWW)، ساختار دولایه ۲+۴ میلی‌متر کمترین خیز مرکزی و بهترین عملکرد انفجاری را در برابر بار دفعی غیریکنواخت دارد. این نتیجه به علت آن است که لایه دوم در مقایسه با لایه اول ضخیم‌تر است، سفتی و مقاومت خمشی بالاتری دارد و همچنین بیشتر انرژی ناشی از انفجار توسط لایه دوم جذب می‌گردد.

(۵) نتیجه فوق‌الذکر همچنین برای ساختارهایی که در آن‌ها میزان چگالی لایه جلویی و عقبی به هم نزدیک است، برقرار است.

(۶) برای ساختارهای دولایه حاصل از ترکیب لایه‌های غیر هم‌جنس که در آن چگالی لایه‌های عقبی و جلویی نزدیک به یکدیگر نیست، ترکیب بندی ۲+۴ میلی‌متر دارای ضعیف‌ترین عملکرد است. این نتیجه به علت آن است که در ساختارهای مورد بحث، کمترین چگالی مربوط به لایه ضخیم‌تر است.

(۷) در ایمپالس یکسان، مقاومت انفجاری ساختارها با افزایش شعاع خرج افزایش می‌یابد.

(۸) برای ساختار دولایه با ترکیب مواد غیر هم‌جنس، بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

(۹) برای لایه‌بندی‌های DCW و DCA، بیشترین خیز دائمی لایه جلویی کمی بیشتر از لایه عقبی است و این بدان علت است که لایه اول استحکام و همچنین مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک کمتری نسبت به لایه دوم دارد.

(۱۰) برای ساختارهای دولایه ساخته شده از مواد مشابه، تفاوت بین بیشترین خیز دائمی لایه عقبی و جلویی قابل توجه بوده به طوری که در ساختارهای DAA و DWW به ترتیب در ایمپالس‌های ۵۰ و ۲۰ نیوتن در ثانیه خیز دائمی لایه عقبی از جلویی بسیار بیشتر است.

(۱۱) هیچ‌گونه رابطه آشکاری بین چگالی سطحی و بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی وجود ندارد.

مراجع

- [1] 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, 15-3 (2014) 74.
- [2] T.F. Henschel, S.C.K. Yuen, G. Nurick, N. Ranwaha, V. Balden, The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical

- Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation, *Strain*, (4)53 (2017)) e12235.
- [22] 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 11-1 (2017).
- [23] E. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards, Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a -7.62mm APM2 projectile, *International Journal of Impact Engineering*, 1032-1022 (2011) (12)38.
- [24] M. Rezasefat, T.M. Mostofi, T. Ozbakkaloglu. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*, 144 106332 (2019).
- [25] M.S. Chafi, G. Karami, M. Ziejewski, Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALEmulti-material formulations, *International Journal of Impact Engineering*, 1275-1269 (2009) (11-10)36.
- [26] S.M. Nelson, B.J. O'Toole, Computational analysis of blast loaded composite cylinders, *International Journal of Impact Engineering*, 39-26 (2018) 119.
- [27] D. Karagiozova, G. Langdon, G. Nurick, S.C.K. Yuen, Simulation of the response of fibre-metal laminates to localised blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 782-766 (2010) (6)37.
- [28] D. Bonorchis, G. Nurick, The influence of boundary conditions on the loading of rectangular plates subjected to localised blast loading—importance in numerical simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 52-40 (2009) (1)36.
- [29] G.R. Johnson, W.H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, in: *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Netherlands, 1983, pp. 547-541.
- [12] G. Langdon, W. Lee, L. Louca, The influence of material type on the response of plates to air-blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, (2015) 78 160-150.
- [13] W. Huang, B. Jia, W. Zhang, X. Huang, D. Li, P. Ren, Dynamic failure of clamped metallic circular plates subjected to underwater impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering*, 108-96 (2016) 94.
- [14] W. Huang, W. Zhang, N. Ye, Y. Gao, P. Ren, Dynamic response and failure of PVC foam core metallic sandwich subjected to underwater impulsive loading, *Composites Part B: Engineering*, 238-226 (2016) 97.
- [15] V. Aune, E. Fagerholt, K.O. Hauge, M. Langseth, T. Børvik, Experimental study on the response of thin aluminium and steel plates subjected to airblast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 121-106 (2016) 90.
- [16] V. Aune, G. Valsamos, F. Casadei, M. Larcher, M. Langseth, T. Børvik, Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates, *International Journal of Impact Engineering*, (2017) 99 144-131.
- [17] 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*, 93-81 (2018) 115.
- [18] D. Zhang, S. Yao, F. Lu, J. Song, Y. Ding, Dynamic response and damage analysis of steel box wall under internal blast loading, *Advances in Mechanical Engineering*, (1)11 1687814018822601 (2019).
- [19] M.S. Ahmad, G. Langdon, G. Nurick, S. Yuen, A study on the response of single and double circular plates subjected to localised blast loading, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2018) (11)15).
- [20] M.S. Ahmad, Study of dynamic behaviour of multi-layered structures subjected to blast loading, University of Cape Town, 2012.
- [21] T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli,

- square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 265-257 (2016) 107.
- [39] 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*, 124-118 (2017) 112.
- [40] A. Jamali, H. Babaei, N. Nariman-Zadeh, S. Ashraf Talesh, T. Mirzababaie Mostofi, 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*, 378-368 (2020) (3)234.
- [41] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, N. Namazi, A. Rahmanpoor, Dynamic compaction of cold die Aluminum powders, *Geomech Eng*, 124-109 (2016) 10.
- [42] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, -246 (2020) (2)234 254.
- [43] 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*, (2016) 109 376-367.
- [44] 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*, 56-48 (2018) 123.
- [45] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process, *Experimental Techniques*, 1494-1485 (2016) (6)40.
- [30] G. Johnson, W. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates and temperatures and pressures. *Engg. Fract. Mech.*, vol. 1) 1), in, 1985
- [31] P.M. Elek, S.S. Jaramaz, D.M. Micković, N.M. Miloradović, Experimental and numerical investigation of perforation of thin steel plates by deformable steel penetrators, *Thin-Walled Structures*, 67-58 (2016) 102.
- [32] T. Børvik, M. Langseth, O. Hopperstad, K. Malo, Ballistic penetration of steel plates, *International journal of impact engineering*, 886-855 (1999) (10-9)22.
- [33] N. Gupta, M. Iqbal, G. Sekhon, Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt-and hemispherical-nosed projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 1944-1921 (2006) (12)32.
- [34] Q. Li, N. Jones, On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members, *Archive of Applied Mechanics*, 254-245 (2000) (4)70.
- [35] 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*, 1736-1721 (2006) (10)32.
- [36] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, E. Armoudli, On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 950-939 (2017) (5)231.
- [37] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 245-231 (2020) (2)234.
- [38] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic

- [50] M. Alitavoli, E. Khaleghi, H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, N. Namazi, N, Modeling and prediction of metallic powder behavior in explosive compaction process by using genetic programming method based on dimensionless numbers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 201-195 (2019) (2)233.
- [51] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Saeidinejad. Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 147-139 (2017) (1)58.
- [52] B.C. Cerik, Damage assessment of marine grade aluminium alloy-plated structures due to air blast and explosive loads, *Thin-Walled Structures*, -123 (2017) 110 132.
- [46] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Study on the response of circular thin plate under low velocity impact, *Geomechanics and Engineering*, 218-207 (2015) (2)9.
- [47] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Namdari-Khalilabad, M. Alitavoli, K. Mohammadi, Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling, *Powder Technology*, 181-171 (2017) 315.
- [48] H. Babaei, T.M. Mostofi, S.H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, *Struct Eng Mech*, 548-535 (2015) (4)56.
- [49] 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*, 496-490 (2017) (3)231.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

T. Mirzababaie Mostofi, M. Rezasefat, M. Sayah Badkhor, H. Babaei, Effect of intense impulsive loading on performance of multi-layered plates, AmirKabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 2639-2670.

DOI: [10.22060/mej.2020.18203.6763](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18203.6763)



جدول ب: نتایج مطالعه پارامتریک برای ساختارهای دولایه در معرض بارگذاری دغمی غیریکساخت با چیدمان (۲+۴ میلی‌متر)
Table B: Parametric study results for double-layered configurations under localized impulsive loading (4+2 mm)

خیز لایه عقی (mm)										خیز لایه جلویی (mm)										امپالس (N-s)						ρ_1	مدل	کد عددی	هندسه
پاره	پاره	۳۰/۷	۲۷/۷	۲۵/۶	۲۰/۷	۱۶/۲	۲۳/۳	۲۲/۱	۲۰/۴	۱۸/۹	۱۷/۹	۱۵/۳	۱۳/۱	۲۰	۱۹	۱۷/۵	۱۶	۱۵	۱۲/۵	۱۰	۱۶/۲	DAA24-100-16.5							
پاره	۳۰/۶	۲۸/۴	۲۶	۲۲/۱	۱۸/۲	۱۴/۵	۳۳/۶	۲۵/۵	۲۳/۵	۲۱/۴	۱۸	۱۴/۷	۱۲	۲۵	۲۰	۱۷/۵	۱۵	۱۲/۵	۱۰										
پاره	۴۸/۶	۴۴/۴	۴۰/۳	۳۶/۳	۳۲/۳	۲۸/۴	پاره	۳۸/۴	۳۲/۶	۲۹/۶	۲۶/۷	۲۳/۸	۲۰/۹	۴۰	۳۵	۳۲/۵	۲۵	۲۲/۵	۲۰										
پاره	۴۹/۱	۴۱/۶	۳۸	۳۴/۴	۲۷/۳	۱۹/۷	۴۴/۸	۳۹/۷	۳۴/۴	۳۱/۸	۲۹/۲	۲۳/۶	۱۷/۷	۴۰	۳۵	۳۷/۵	۳۷/۵	۲۵	۲۰	۱۵									
پاره	۳۹	۳۵/۳	۳۱/۴	۲۷/۸	۲۴/۱	۲۰/۴	۳۵/۲	۳۲/۲	۲۹/۲	۲۶/۳	۲۳/۳	۲۱	۱۷/۷	۶۰	۵۵	۴۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۴۷/۱	DWW24-100-16.5							
پاره	۳۹/۴	۳۵/۱	۳۱/۹	۲۸/۸	۲۵/۴	۲۲/۱	۲۸/۴	۲۵/۵	۲۳/۲	۲۰/۴	۱۷/۶	۱۳/۵	۶۵	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰									
پاره	۵۰/۹	۴۴/۲	۳۷/۹	۳۱/۵	۲۵	۴۴/۹	۴۰/۸	۳۶/۴	۳۲/۱	۲۷/۶	۲۳	۱۸/۵	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰									
پاره	۵۴/۸	۴۹/۱	۴۴/۵	۳۸	۳۲/۶	۲۷	۵۲/۵	۴۷/۹	۴۳/۴	۳۸/۸	۳۴/۲	۲۹/۵	۲۴/۷	۱۱۰	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰									
پاره	۲۶	۲۲/۵	۲۹/۱	۲۵/۸	۲۲/۷	۱۶/۶	۳۷	۳۱/۷	۲۹	۲۶/۳	۲۳/۸	۲۱/۶	۱۶/۱	۳۵	۳۰	۲۷/۵	۲۵	۲۲/۵	۲۰	۱۵	۲۶/۵	DWA24-100-16.5							
پاره	۴۱/۳	۳۵/۴	۳۰/۴	۲۴/۹	۱۹/۴	۱۴	۵۲/۶	۴۲/۲	۳۶/۶	۳۱/۱	۲۵/۷	۲۰/۴	۱۴/۳	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵									
پاره	۴۹	۴۴/۹	۳۴/۴	۲۹/۶	۲۹/۶	۱۹/۶	۵۲/۹	۴۸/۴	۴۳/۴	۳۸/۵	۳۳/۶	۲۸/۶	۱۸/۹	۶۰	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۰									
پاره	۶۲/۸	۵۲/۳	۳۵/۴	۲۶/۶	۱۷/۱	۱۷/۱	۵۲/۹	۶۱/۸	۵۲/۹	۴۴/۱	۳۵/۳	۲۶/۴	۱۷/۳	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰									
پاره	۳۱/۲۲	۲۴/۷	۲۲/۴	۲۱/۵	۱۸/۳	۱۱/۷	۵۲/۶	۴۵/۶	۳۴/۲	۳۲/۲	۲۲/۲	۱۸/۸	۱۲	۳۰	۲۵	۱۷/۵	۱۹	۱۷/۵	۱۵	۱۰	۲۸/۶۸	DCA24-100-16.5							
پاره	۳۷/۴	۳۱/۹	۲۶/۴	۲۳/۸	۱۹/۱	۱۶/۷	۴۴/۲	۳۸/۵	۳۲/۸	۲۹/۹	۲۷	۲۴/۲	۲۱/۵	۴۰	۳۵	۳۷/۵	۳۷/۵	۲۵	۲۲/۵	۲۰									
پاره	۴۳/۶	۳۸/۷	۳۳/۸	۲۸/۹	۲۳/۹	۱۹/۱	۵۰/۳	۴۵	۳۹/۸	۳۴/۶	۲۹/۵	۲۴/۳	۱۹/۴	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰									
پاره	۲۵/۵	۲۱/۸	۱۷/۴	۱۵/۶	۱۳/۷	۱۳/۷	۵۲/۶	۴۵/۶	۳۲/۴	۲۰/۴	۱۷/۹	۱۶	۱۴	۴۰	۳۵	۳۷/۵	۳۷/۵	۲۵	۲۲/۵	۲۰									
پاره	۳۲/۴	۲۰	۲۶/۲	۲۳	۱۹/۷	۱۵/۸	۵۲/۶	۳۳/۵	۳۰/۵	۲۷/۱	۲۳/۶	۲۰/۱	۱۶/۲	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۴۹/۲۸	DCW24-100-20							
۴۴/۳	۳۸	۳۱/۸	۲۵/۶	۲۲/۳	۱۸/۹	۱۸/۹	۳۷/۴	۳۱/۴	۲۷/۸	۲۴/۹	۲۱/۸	۲۱/۸	۱۸/۸	۷۰	۶۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۰									
۵۰/۵	۳۹/۴	۳۳/۷	۲۸	۲۲/۴	۱۶/۴	۱۶/۴	۴۶/۱	۴۰/۲	۳۴/۲	۲۸/۲	۲۲/۵	۲۲/۵	۱۶/۶	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰									

جدول ج: نتایج مطالعه پارامتریک برای ساختارهای دولایه در معرض بارگذاری دغمی غیر یکنواخت با چیدمان (۲+۴ میلی‌متر)
Table C: Parametric study results for double-layered configurations under localized impulsive loading (2+4 mm)

خیز لایه عقبی (mm)										خیز لایه جلویی (mm)										ایمپالس (N-s)	ρ_A	مدل عددی	هندسه
۳۳/۸	۲۹/۵	۲۷/۴	۲۵/۴	۲۲/۴	۱۷/۸	۲۸/۵	۲۶/۷	۲۵/۷	۲۰/۳	۱۸/۸	۱۶/۵	۱۳/۱	۲۰	۱۷/۵	۱۶	۱۵	۱۴	۱۲/۵	۱۰	۱۶/۲	DAA24-100-16.5 DAA24-100-20 DAA1224-150-27 DAA24-150-31.5		
۳۵/۸	۳۴/۵	۳۱/۲	۲۹/۴	۲۵/۲	۲۱/۱	۲۹/۷	۲۶/۷	۲۵/۷	۲۳	۲۱/۵	۱۸	۱۴/۵	۲۲/۵	۲۱	۱۸/۵	۱۷/۵	۱۵	۱۲					
۴۵	۴۰/۴	۳۵/۹	۳۱/۴	۲۶/۹	۲۲/۶	۳۷/۸	۳۱/۴	۲۸/۱	۲۴/۸	۲۱/۴	۱۷/۹	۱۴/۴	۳۰	۲۲/۵	۲۰	۱۷/۵	۱۵	۱۲					
۴۳/۸	۳۹/۹	۳۶/۱	۳۲/۵	۲۸/۹	۲۵/۳	۴۳/۱	۳۷	۳۴	۳۰/۹	۲۷/۷	۲۴/۵	۲۱/۱	۳۵	۳۷/۵	۲۵	۲۲/۵	۲۰	۱۷/۵					
۴۲	۳۸	۳۳/۵	۳۰	۲۶/۳	۲۲/۷	۳۵/۷	۳۵/۷	۳۱/۴	۲۷/۴	۲۴/۱	۲۰/۸	۱۷/۶	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۴۷/۱	DWW24-100-16.5 DWW24-100-20 DWW24-150-27 DWW24-150-31.5		
۴۰	۳۶/۷	۳۳/۷	۳۲/۷	۳۰/۲	۲۶/۸	۳۳/۱	۲۹/۵	۲۶/۳	۲۳/۸	۲۰/۸	۱۷/۸	۱۴/۵	۶۵	۶۰	۵۵	۴۵	۴۰	۳۵					
۵۱/۵	۴۸/۲	۴۴/۶	۴۱/۱	۳۷/۷	۳۴/۳	۴۱/۴	۳۶/۳	۳۳/۷	۳۳/۷	۳۱/۱	۲۸/۴	۲۵/۸	۸۰	۷۵	۷۰	۶۵	۶۰	۵۵					
۵۴/۸	۵۲	۴۹	۴۶/۲	۴۲/۴	۴۰/۶	۴۹/۸	۴۷/۳	۴۴/۸	۴۲/۳	۳۹/۸	۳۷/۴	۳۴/۹	۱۰۰	۹۵	۹۰	۸۵	۸۰	۷۵	۷۰				
۴۱/۲	۳۶/۶	۳۲/۳	۲۸/۱	۲۳/۹	۱۹/۸	۱۵/۷	۳۷/۱	۳۲/۶	۲۸/۳	۲۴	۲۰	۱۵/۹	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۳۶/۸	DWA24-100-16.5 DWA24-100-20 DWA24-150-27 DWA24-150-31.5		
۴۰/۳	۳۶/۴	۳۱/۹	۲۷/۶	۲۳/۶	۱۹/۸	۴۱/۴	۳۷/۳	۳۳/۹	۲۹/۸	۲۵/۹	۲۱/۹	۱۸	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵				
۵۲/۳	۴۸/۲	۴۴/۳	۴۰/۵	۳۶/۷	۳۳/۱	۵۴	۵۰/۳	۴۶/۶	۴۲/۹	۳۹/۳	۳۵/۷	۳۲	۷۵	۷۰	۶۵	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵				
۵۶/۷	۵۲/۲	۴۹/۸	۴۶/۴	۴۳	۳۹/۶	۵۵/۷	۵۲/۲	۴۸/۹	۴۵/۶	۴۲/۲	۳۹/۱	۳۶/۹	۹۰	۸۵	۸۰	۷۵	۷۰	۶۵	۶۰				
۳۳/۵	۲۸/۴	۲۵/۶	۲۰/۳	۱۸/۶	۱۷/۵	۲۹/۲	۲۶/۳	۲۶/۳	۲۳/۵	۲۰/۵	۱۸/۸	۱۷/۷	۳۰	۲۵	۲۲/۵	۲۰	۱۷/۵	۱۶	۱۵	۴۱/۱۶	DCA24-100-16.5 DCA24-100-20 DCA24-150-27 DCA24-150-31.5		
۳۷	۳۱/۶	۲۹/۱	۲۶/۵	۲۳/۹	۲۱/۴	۳۷/۸	۳۲/۳	۳۲/۳	۲۹/۶	۲۶/۹	۲۴/۳	۲۱/۷	۴۰	۳۵	۳۰	۲۷/۵	۲۵	۲۲/۵	۲۰				
۴۶/۳	۳۱/۹	۲۷/۴	۲۳/۱	۲۰/۹	۱۸/۷	۳۶/۸	۳۲/۲	۳۲/۲	۲۷/۷	۲۳/۳	۲۱	۱۸/۸	۵۰	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۲/۵	۲۰				
۴۰/۹	۳۶/۹	۳۲/۹	۲۸/۹	۲۴/۹	۲۰/۰	۴۱/۶	۳۷/۴	۳۳/۱	۳۳/۱	۲۹/۲	۲۵/۱	۲۱	۶۰	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵				
۳۰/۴	۲۶/۳	۲۲	۱۷/۷	۱۳/۵	۱۱/۴	۲۶/۷	۲۲/۳	۲۲/۳	۱۷/۸	۱۵/۷	۱۳/۶	۱۱/۵	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۷/۵	۱۵	۱۲/۵	۵۱/۴۶	DCW24-100-16.5 DCW24-100-20 DCW24-150-27 DCW24-150-31.5		
۳۵/۱	۳۱/۳	۲۷/۵	۲۳/۷	۲۱/۹	۲۰	۳۵/۸	۳۱/۸	۳۱/۸	۲۷/۹	۲۴/۱	۲۲/۲	۲۰/۳	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۷/۵	۲۵				
۳۵/۵	۳۲/۱	۲۸/۶	۲۵/۱	۲۱/۷	۱۸/۲	۳۵/۸	۳۲/۳	۳۲/۳	۲۸/۸	۲۵/۲	۲۱/۷	۱۸/۱	۶۰	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵				
۳۸/۵	۳۵/۳	۳۲/۲	۲۹/۱	۲۶	۲۲/۸	۳۸/۸	۳۵/۶	۳۲/۴	۳۲/۴	۲۹/۴	۲۶	۲۲/۷	۷۰	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵				