



بررسی رفتار نفوذ در اهداف تک و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه

توحید میرزابابای مستوفی^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: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۰۷

کلمات کلیدی:

مقاومت بالستیک
ساختار چند لایه
ساختار تک لایه
شبکه عصبی
مدل سازی.

خلاصه: در این مقاله، به بررسی تجربی و مدل سازی رفتار نفوذ ورق های تک لایه و چند لایه آلومینیومی، فولادی و یا ترکیبی از فولاد و آلومینیوم تحت ضربه پرتابه کروی صلب پرداخته شده است. برای انجام کارهای تجربی در قالب ۶۶ آزمون، هشت نوع لایه بندی مختلف در نظر گرفته شد و نمونه ها در محدوده سرعت ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه تحت ضربه پرتابه قرار گرفتند. این لایه بندی ها شامل ورق تک لایه آلومینیومی و فولادی با ضخامت ۲ و ۳ میلی متر، ساختار دولایه آلومینیومی و فولادی با ضخامت کلی ۲ میلی متر، ساختار سه لایه هم جنس آلومینیومی و فولادی با ضخامت کلی ۳ میلی متر و ساختارهای سه لایه غیر هم جنس آلومینیوم - فولاد - آلومینیوم و فولاد - آلومینیوم - فولاد با ضخامت کلی ۳ میلی متر بود. در تمامی آزمایش ها، سرعت برخورد پرتابه و میزان تغییر شکل پلاستیک نمونه اندازه گیری شد. در بخش مدل سازی عددی، از شبکه عصبی از نوع دسته بندی گروهی داده ها برای ارائه یک مدل ریاضی بر مبنای اعداد بی بعد جهت پیش بینی بیشترین خیز دائمی ساختارهای تک لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه صلب استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که توافق خوبی بین مدل ارائه شده با مقادیر تجربی برقرار است به طوری که ۹۴٪ از نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار گرفتند.

۱- مقدمه

علم و به روز ماندن آن شده است [۱-۴]. در ادامه، ابتدا به تحقیقات نزدیک به موضوع در زمینه برخورد اجسام صلب به اهداف فلزی پرداخته می شود و در ادامه به تشریح تحقیقات انجام گرفته در زمینه مدل سازی و لزوم در نظر گرفتن این موضوع در بحث نفوذ پرداخته می شود.

مکانیک ضربه یکی از موضوع های مهم و کاربردی در علم مهندسی مکانیک است. مکانیک ضربه شامل برخوردهای سرعت پایین که در بخش های صنعتی و علمی پر کاربرد است تا برخوردهای سرعت بالا که در بخش های نظامی مورد توجه است، می گردد. مکانیک نفوذ به عنوان یکی از زیرشاخه های علم مکانیک ضربه معرفی می گردد. در مکانیک نفوذ برخوردها از نوع سرعت بالا هستند. در این نوع برخوردها، افزایش کارایی ضربه زننده و ضربه گیرنده اهمیت بسیار بالایی دارد. در کنار پیچیدگی های مربوط به نفوذ، رقابتی هم بین ضربه زننده و ضربه گیرنده ها برقرار است و این موضوع باعث ایجاد جذابیت در این *نویسنده عهده دار مکاتبات: ghababaei@guilan.ac.ir

یو و شین در سال ۲۰۰۴، به بررسی نفوذ مایل پرتابه هایی با آلیاژ تنگستن در هدف دولایه فولادی با استفاده از نرم افزار المان محدود اتوداین پرداختند [۵]. لیاقت و همکارانش در سال ۲۰۰۴، به ارائه یک مدل اصلاحی برای نفوذ پرتابه ها بر اساس مدل وودوارد پرداختند. آن ها در اصلاحات خود، مقدار زاویه تشکیل مخروط سرامیکی، مقاومت سرامیک و مقدار سایش پرتابه را مورد بررسی قرار دادند [۶].



لیانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۵، به ارائه یک روش تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های تخت در اهداف چندلایه پرداختند. آن‌ها در روش خود از قوانین بقای انرژی و بقای اندازه حرکت استفاده کردند. آنها نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل را با نتایج تجربی مورد مقایسه قراردادند و مطابقت خوبی داشت [۷]. گاپتا و همکارانش در سال ۲۰۰۷، به بررسی تجربی و عددی فرآیند نفوذ توسط پرتابه‌های با دماغه‌های متفاوت در اهداف آلومینیومی با ضخامت‌های متفاوت پرداختند. در این بررسی، آن‌ها تأثیر شکل هندسه دماغه پرتابه بر مقدار نفوذ را تعیین کردند [۸]. فلورس و جانسون در سال ۲۰۱۱، به بررسی عددی عملکرد بالستیک ورق‌های فلزی تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه تحت ضربه با پرتابه APM2 با کالیبر ۷/۶۲ میلی‌متر در محدوده سرعت ۷۷۵ تا ۹۵۰ متر بر ثانیه با به‌کارگیری نرم‌افزار تجاری المان محدود ال‌اس‌داین‌ا پرده‌پرداختند. در این سری از شبیه‌سازی‌ها، ورق‌ها از جنس فولاد، آلومینیوم و یا ترکیبی از این مواد در نظر گرفته شدند. نتایج عددی به‌دست‌آمده نشان داد که ساختارهای تک‌لایه دارای عملکرد بالستیک بهتر نسبت به ساختارهای چندلایه ساخته‌شده از همان ماده هستند. همچنین مشخص شد که ساختارهای دولایه با ورق جلویی نازک از جنس آلومینیوم و ورق عقبی ضخیم از جنس فولاد نشان‌دهنده مقاومت بیشتری نسبت به صفحات فولادی چندلایه با چگالی سطحی مشابه هستند. این پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که اهداف چندلایه با استفاده از مواد مختلف فلزی برای بهبود عملکرد بالستیک و صرفه‌جویی در وزن باید مورد بررسی قرار گیرد [۹]. دنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲، به بررسی تجربی نفوذ پرتابه با دماغه نیم‌کره‌ای در ساختارهای تک، دو، سه، چهار و شش لایه فلزی پرداختند. در این تحقیق، سرعت حد بالستیک برای هر ساختار چندلایه بر اثر مطالعات روی فاصله بین لایه‌ها، تعداد، جهت و ضخامت لایه‌ها بر مقاومت بالستیک به‌دست‌آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اهداف نازک تک‌لایه نسبت به ساختارهای چندلایه در زمانی که پاسخ غالب اهداف تک‌لایه به‌صورت گودافتادگی و بادکردن است، دارای عملکرد بالستیکی بهتری بوده و سرعت حد بالستیک ساختارهای چندلایه با افزایش تعدادی از لایه‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که این عملکرد همچنان نسبت به ساختارهای تک لایه ضعیف‌تر است [۱۰]. دنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳، در ادامه کارهای خود به بررسی تجربی نفوذ پرتابه با دماغه مخروطی

در ساختارهای فولادی تک، دو، سه و چهار لایه پرداختند. آنها در آزمایش‌های خود، ساختارهای چندلایه در ترکیب‌های مختلف را با ضخامت کلی یکسان در نظر گرفتند. آنها سرعت حد بالستیک را برای هر ساختار چندلایه بر اثر مطالعات روی فاصله بین لایه‌ها، تعداد، ترتیب و ضخامت لایه‌ها بر مقاومت بالستیک به‌دست‌آوردند. نتایج نشان داد که اگر ضخامت کل کمتر از یک مقدار خاص باشد، اهداف تک‌لایه نازک دارای سرعت حد بالستیک بیشتری نسبت به اهداف چندلایه هستند و همچنین سرعت محدود بالستیک اهداف چندلایه با افزایش تعداد لایه‌ها کاهش می‌یابد. اگرچه، اهداف تک‌لایه با ضخامت متوسط، سرعت‌های حد بالستیک پایین‌تری نسبت به اهداف چندلایه را فراهم می‌کنند [۱۱]. تیواری و همکارانش در سال ۲۰۱۴، به بررسی تجربی و المان محدود نفوذ پرتابه در اهداف نازک آلومینیومی تحت تأثیر شرایط مرزی مختلف گیرداری پرداختند. آنها از تفنگ گازی برای انجام آزمایش‌ها و همچنین نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس برای شبیه‌سازی استفاده کردند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده از مدل ماده الاستو-ویسکوپلاستیک جانسون-کوک استفاده شد. ورق‌های آلومینیومی H12-1100 با قطر آزاد و ضخامت به ترتیب ۲۵۵ و ۱ میلی‌متر تحت ضربه پرتابه‌های سر تخت و مخروطی قرار داده شدند. شرایط مرزی ورق‌ها با تغییر منطقه گیردار در طول محیط با میزان ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها همراه شد. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌ها برای مقایسه پاسخ ورق‌هایی با ۵۰٪ و ۷۵٪ گیرداری پیوسته با نمونه‌هایی با دو و سه منطقه متناوب ناپیوسته ۲۵٪ گیردار انجام شد. آنها دریافتند که تغییرات در شرایط مرزی تأثیر ناچیزی در حالت شکست هدف داشته است [۱۲]. اقبال و همکارانش در سال ۲۰۱۵، به بررسی تجربی و المان محدود اثر نسبت قطر هدف به قطر پرتابه بر عملکرد بالستیک ورق‌های آلومینیومی نازک و مکانیسم شکست آنها پرداختند. شبیه‌سازی‌های عددی در مقادیر مختلف ۳/۶، ۵، ۷/۹، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ برای نسبت قطر هدف به قطر پرتابه انجام شد. آنها دریافتند که افزایش اولیه نسبت قطر هدف به قطر پرتابه از ۳/۶ به ۱۰، اثر قابل توجهی بر سرعت حد بالستیک به‌خصوص در پرتابه‌های سر تخت دارد [۱۳]. الک و همکارانش در سال ۲۰۱۶، به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی سوراخ‌شدن ورق‌های نازک فولادی توسط پرتابه‌های استوانه‌ای فولادی پرداختند. در این مطالعه، یک تحقیق تجربی جامع انجام و



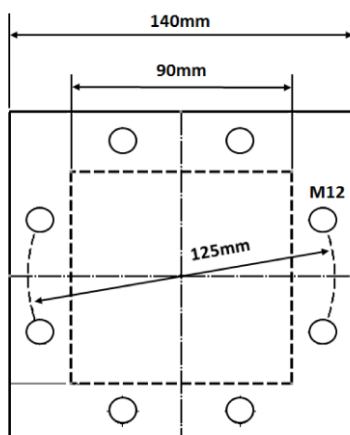
شکل ۱. سامانه تفنگ گازی

Fig. 1. Gas gun apparatus

تیت-الکسویسکی، انبساط حفره، راوید-بادنر، والکر-اندرسون و مدل‌های شبیه‌سازی است. آنها شرایط نفوذ را به صورت نفوذ جسم صلب، نفوذ سایشی، نفوذ پایدار و انتقالی و نفوذ کامل بررسی کردند [۱۷].

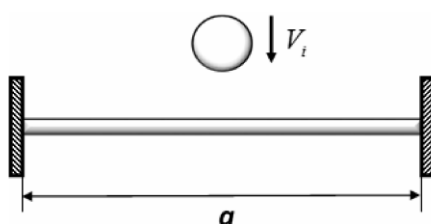
با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تحقیقات بسیار مناسب و زیادی در زمینه فرآیند نفوذ در اهداف تک‌لایه فلزی و یا حتی ساختارهای کامپوزیتی انجام شده؛ اما مطالعه روی اهداف چندلایه فلزی تحقیقات محدود بوده و نمی‌توان یک نتیجه جامع و کامل گرفت؛ بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای فلزی تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه به منظور مطالعه پارامترهای مختلف، بررسی اثرگذاری آن‌ها و همچنین ارائه یک تابع صریح از مشخصات فیزیکی سیستم‌ها و فرآیندها مبتنی بر شبکه عصبی [۱۸-۲۰] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ورودی و خروجی می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها یک روش خودسازمان‌ده است که به وسیله آن، مدل‌های پیچیده قابل‌محاسبه هستند. این روش بر اساس یک دسته داده‌های چند ورودی و یک خروجی عمل می‌کند. روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها برای اولین بار توسط ایوانکو [۲۱] برای غلبه بر

داده‌های مربوط به سامانه آزمایشی و تجهیزات اندازه‌گیری گزارش شد. آنها دریافتند که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مکانیسم‌های اصلی فرایند نفوذ مانند فرورفتگی، بادکردن و پلاگینگ را به درستی تولید می‌نماید [۱۴]. شارما و همکارانش در سال ۲۰۱۷، به بررسی تجربی و عددی پاسخ دینامیکی سازه آلومینیومی AA2014-T652 به ضخامت ۱۵ میلی‌متر تحت تأثیر ضربه پرتابه کرومی در محدوده سرعت ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ متر بر ثانیه پرداختند. آنها پرتابه‌های کرومی با قطر ۱۰ میلی‌متر از جنس فولاد سخت و آهن نرم را از داخل یک تفنگ با لوله‌ای به قطر ۳۰ میلی‌متر پرتاب می‌کردند [۱۵]. در سال ۲۰۱۹، سیاح بادخور و همکارانش نیز به بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک-آلومینیوم پرداختند. آنها در تحلیل خود به اصلاح مدل تحلیلی فلوز پرداختند؛ بنابراین آنها ضمن بهبود نتایج مدل تحلیلی فلوز، ضعف این مدل را که مربوط به عدم پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های پایین بوده برطرف کردند [۱۶]. در سال ۲۰۱۹، سیاح و همکارانش به بررسی نفوذ پرتابه در اهداف پرداختند. آنها علاوه بر مرور مدل‌های تحلیلی نفوذ، دسته‌بندی و خلاصه آنها را نیز بیان کردند. مدل‌های بیان‌شده شامل، معادله پانسلت، تئوری هیدرودینامیک، تئوری هیدرودینامیک اصلاح‌شده، رچت-ایپسون،



شکل ۲. هندسه نمونه

Fig. 2. Dimensions of the specimen



شکل ۳. شماتیک نحوه برخورد گلوله با نمونه

Fig. 3. Schematic configuration of target and projectile

مدل‌سازی شامل ارائه یک مدل با روش شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختار تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه صلب کرومی است.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

با توجه به آنچه در پیشینه تحقیق بیان شد، در این بخش هدف آن است تا بتوان دید بهتری نسبت به تحلیل رفتار ورق‌های فلزی تک‌لایه و چندلایه با جنس‌های مختلف آلومینیومی و فولادی تحت ضربه پرتابه کرومی صلب داشت. به‌طور جزئی‌تر، هدف بخش تجربی این تحقیق این است تا بتوان میزان تغییر شکل پلاستیک (عمق نفوذ) و همچنین مکانیسم تخریب ورق‌های تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه آلومینیومی، فولادی و همچنین ساختارهای ترکیبی فلزی تحت ضربه پرتابه صلب با سرعت‌های اولیه مختلف را به دست آورد.

مشکلات حاکم بر حل مسائل مربوط به سیستم‌های پیچیده ارائه شد. ایده اصلی روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها، ساختن یک تابع تحلیلی در یک شبکه پیش‌خور بر اساس تابع انتقال گره‌ای چهارتایی است. ضرایب این شبکه پیش‌خور توسط تکنیک رگرسیون به دست می‌آید [۱۸-۲۱]. شایان توجه است که در تحقیقات انجام‌شده توسط محققان، تاکنون مطالعه‌ای روی مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف چندلایه فلزی و شناسایی پارامترهای مؤثر بر آن نیز انجام نگرفته است [۲۲-۲۸]. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل بررسی تغییر شکل پلاستیک و همچنین مکانیسم تخریب ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کرومی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه با انجام ۶۶ آزمون ضربه در هشت گروه‌بندی مختلف برای ساختار است. همچنین نوآوری این تحقیق در بخش

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد

Table 1. Mechanical properties of materials

ماده	ضخامت ورق (mm)	میانگین تنش تسلیم استاتیکی (MPa)	میانگین تنش نهایی (MPa)
فولاد نرم	۳ و ۲،۱	۲۸۱	۴۳۲/۶
آلومینیوم	۳ و ۲،۱	۱۱۹	۱۲۵/۱

جدول ۲. گروه‌بندی نمونه‌های آزمایشی

Table 2. Layering configuration of specimens

تعداد آزمایش	سرعت اولیه آزمایش (m/s)	گروه آزمایشی	شماطیک ساختار
۸	۱۵۴ و ۱۵۱، ۱۴۵، ۱۳۵، ۱۲۰، ۱۰۸، ۸۴، ۴۵	M A T3	
۶	۱۰۱، ۹۰، ۸۹، ۷۳، ۶۶، ۴۲	M A T2	
۹	۱۵۵ و ۱۵۲، ۱۴۸، ۱۴۴، ۱۳۸، ۱۱۴، ۹۷، ۶۶، ۴۴	M S T3	
۸	۱۵۶ و ۱۵۰، ۱۴۳، ۱۴۰، ۱۱۸، ۹۶، ۷۴، ۴۴	M S T2	
۶	۱۰۳، ۱۰۲، ۸۹، ۸۶، ۷۴، ۴۴	D A T1	
۷	۱۵۸ و ۱۵۱، ۱۴۴، ۱۳۸، ۱۲۰، ۷۳، ۴۴	D S T1	
۴	۱۵۰ و ۱۳۷، ۱۲۵، ۱۱۸	TR A T1	
۷	۱۵۶ و ۱۵۲، ۱۴۶، ۱۴۴، ۱۲۰، ۶۶، ۴۴	TR S T1	
۶	۱۴۹ و ۱۴۲، ۱۳۸، ۱۲۷، ۱۱۹، ۶۶	TRM SAS T1	
۵	۱۴۳ و ۱۳۸، ۱۲۸، ۱۲۱، ۶۶	TRM ASA T1	

قبل و پس از آن و همچنین یک استند چرخان برای نگه‌داشتن نمونه‌های آزمایشگاهی جهت برخورد عمودی و بازویه گلوله است. مکانیسم پرتاب گلوله این سامانه شامل یک مخزن کامپوزیتی از گازی فشرده‌شده به حجم ۲ لیتر، شیر سولنوئید ۲/۲ با ظرفیت ۲۵۰ بار به‌منظور تحریک و سریع آزادسازی گلوله و حس‌گر فشار ۲۴ ولت^۲

در این تحقیق، فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف فلزی تک‌لایه و چندلایه توسط یک سامانه آزمایشگاهی تک‌مرحله‌ای به نام تفنگ گازی که تصویر آن در «شکل ۱» آمده، انجام شده است.

سامانه آزمایشگاهی فوق‌الذکر شامل چندین بخش اصلی مانند مخزن ذخیره هوا ۲۰۰ بار جهت پرتاب گلوله، لوله شش متری با سطح داخلی کاملاً صیقلی در قطرهای داخلی مختلف از ۳/۸ میلی‌متر تا ۱۸/۸ میلی‌متر، سامانه اندازه‌گیری سرعت اولیه گلوله

1 Co-ax valve KB15
2 XML-F600D2025

تک لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه، ۶۶ نمونه آزمایشگاهی در هشت گروه بندی مختلف، مطابق با جدول ۲ طراحی و ساخته شده اند. نمادهای هر آزمایش مربوط به مواد مورداستفاده، نحوه لایه بندی و ضخامت کل اهداف است، به طوری که: A، آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰؛ S، فولاد نرم St-13؛ M، ساختار تک لایه؛ D، ساختار دولایه؛ TR، ساختار سه لایه هم جنس؛ TRM؛ ساختار سه لایه غیر هم جنس؛ T؛ ضخامت لایه.

۳- مدل سازی

۳-۱- اصول و قواعد

در مدل سازی عددی، اجزاء سیستم مجهول بوده و تنها ورودی و خروجی آن در دسترس است. در مدل سازی عددی، شناسایی سیستم مبتنی بر اطلاعات ورودی و خروجی مورد نظر است. حاصل این شناسایی یک تابع تقریبی ریاضی است. این تابع چند جمله ای، رابطه ای میان ورودی ها و خروجی و مدلی برای سیستم است [۲۰]. به طور کلی مسائل شناسایی سیستم بدین گونه مطرح می گردد که فرض می شود که رابطه خروجی (y) یک سیستم ناشناخته با m ورودی آن به صورت رابطه (۱) است.

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

با داشتن N نمونه از این داده های ورودی و خروجی، سیستمی همانند ماتریس زیر در رابطه (۲) به دست می آید [۲۰ و ۲۷].

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

عمل شناسایی سیستم را می توان انجام داد که حاصل آن تقریب تابع \hat{f} می باشد. که به موجب آن می توان به ازای بردار ورودی $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ مقدار خروجی \hat{f} را به صورت رابطه (۳) تقریب زد [۲۰ و ۲۷].

است. در این تحقیقات، سرعت پرتابه با فشار نیتروژن در سیلندر کامپوزیتی گازی اداره می شود. به منظور اندازه گیری سرعت پرتابه، دو جفت لیزر با فاصله ۱۵ سانتی متر بین آنها قبل از نمونه قرار دارد. با تغییر فشار نیتروژن در سیلندر کامپوزیتی، سرعت پرتابه تا ۱۵۸ متر بر ثانیه تغییر می یابد. پس از پیش رانش، پرتابه کروی با جرم ۲۵/۱ گرم و قطر ۱۸/۲۹ میلی متر در کل مسیر خود به سمت محفظه مهار حرکت می کند.

نمونه ورق های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم^۱ و آلیاژ آلومینیوم^۲ در ضخامت های متفاوت ۲ و ۳ میلی متر برای هدف های تک لایه و ۱+۱ و ۱+۱+۱ میلی متر به ترتیب برای هدف های دولایه و سه لایه تهیه شد. در ابتدا نمونه ورق ها به صورت مربعی در ابعاد ۱۴۰×۱۴۰ میلی متر مربع برش زده شدند. ورق های برش خورده جهت نصب در نگه دارنده های جلویی و عقبی با ناحیه شکل گیری ۹۰×۹۰ میلی متر مربع، سوراخ کاری (با قطرهای ۱۲/۵ میلی متر) شدند. هندسه نمونه آزمایشی و همچنین نحوه برخورد گلوله با نمونه به ترتیب در «شکل ۲» و «شکل ۳» نشان داده شده است. لازم به توضیح است که هندسه پرتابه و ورق در طول آزمایش ثابت است.

خواص مکانیکی مواد فلزی مورداستفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک محوره روی نمونه های آماده شده از ورق هایی از جنس فولاد نرم و آلیاژ آلومینیوم تعیین شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب نمونه هایی را برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شد. برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو نمونه آزمایشگاهی تهیه شد. در انجام آزمایش، نمونه ها با سه سرعت ۵، ۱۰ و ۱۵ (میلی متر بر دقیقه) تحت کشش قرار گرفته اند. با توجه به طول اولیه نمونه ها (۵۰ میلی متر)، سه نرخ کرنش با مقادیر $1/67 \times 10^{-2} s^{-1}$ ، $3/33 \times 10^{-2} s^{-1}$ و $5 \times 10^{-2} s^{-1}$ اعمال شد. مقادیر تنش نهایی و تنش تسلیم برای هر نوع جنس در «جدول ۱» درج شده است. لازم به ذکر است که برای ورق های فولادی و آلومینیومی در ضخامت های متفاوت، منحنی تنش و کرنش کاملاً مشابه و منطبق بر یکدیگر هستند، لذا نمودارها بر حسب ضخامت ورق تفکیک نشده اند.

به منظور بررسی تغییر شکل و مکانیسم تخریب ساختارهای

1 St-13
2 Al-1100

اصطلاحاً به این گونه عصب‌های حذف‌شده، عصب مرده گفته می‌شود. عصب‌هایی که برای ادامه و گسترش شبکه باقی می‌مانند، امکان دارند برای ایجاد فرم همگرایی شبکه و عدم ارتباط آنها با عصب لایه آخر حذف گردند، که اصطلاحاً به آنها عصب غیرفعال می‌گویند. میزان مجموع مربعات خطا r_j^2 میان مقادیر خروجی واقعی y_i و خروجی عصب z_j (y_{ij}^*) ملاک و معیاری برای حذف مجموعه‌ای از عصب‌ها در یک لایه است که در رابطه (۶) نشان داده شده است [۲۷ و ۲۹].

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

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

نگاشتی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط این نوع از شبکه‌های عصبی برقرار می‌شود به صورت تابع غیرخطی ولترا، به فرم رابطه (۷) است [۲۷ و ۲۹].

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

ساختاری که برای عصب‌ها در نظر گرفته می‌شود، به صورت چندجمله‌ای دومتغیره درجه دوم، همانند رابطه (۸) است [۲۷ و ۲۹].

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

هدف در الگوریتم دسته‌بندی گروهی داده‌ها یافتن ضرایب ناشناخته a_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 5$) است. تابع f در رابطه (۷) دارای شش ضریب مجهول است. لذا بایستی آنها را طوری تعیین کنیم که به ازای تمام نمونه‌های دو متغیر وابسته به سیستم $\{(x_{ip}, x_{iq}), i = 1, 2, \dots, N\}$

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

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

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

که در آن تابع (\hat{f}) می‌تواند به صورت تابع خطی و یا غیرخطی از متغیرهای ورودی سیستم باشد [۲۰ و ۲۷].

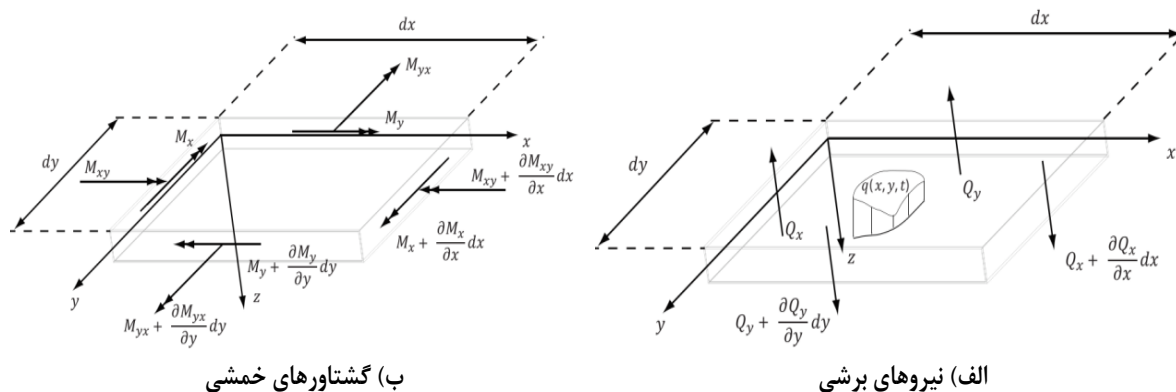
۲-۳- به کار بردن شبکه‌های عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها

شبکه دسته‌بندی گروهی داده‌ها، شبکه‌ای خودسازمانده و یک‌سویه است که از چندین لایه و هر لایه نیز از چندین عصب تشکیل شده است. تمامی عصب‌ها از یک ساختار مشابهی برخوردار می‌باشند، همگی آنها دارای دو ورودی و یک خروجی‌اند و هر نرون با ۵ وزن و یک بایاس عمل پردازش را میان داده‌های ورودی و خروجی برقرار می‌کند که در رابطه (۵) نشان داده شده است [۲۷ و ۲۹].

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

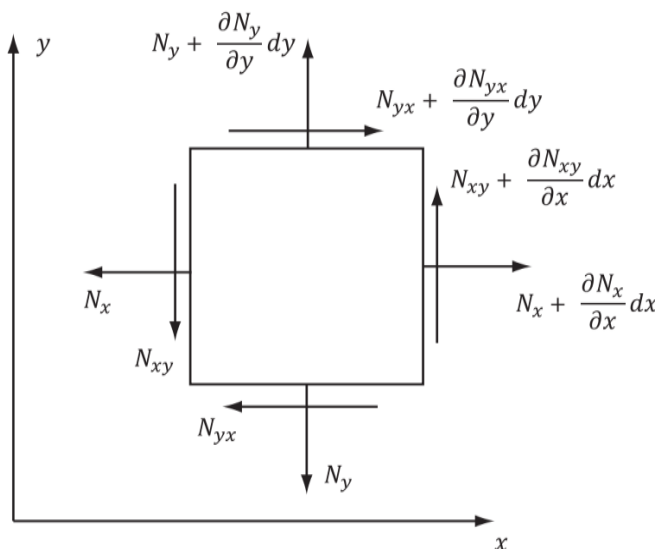
رابطه بالا، $i = 1, 2, 3, \dots, N$ است که در آن N تعداد نمونه‌های ورودی و خروجی بوده و $(K = 1, 2, 3, \dots, C_m^2)$ و $\{\alpha, \beta \in \{1, 2, 3, \dots, m\}\}$ تعداد نرون‌های لایه قبلی است.

وزن‌ها بر اساس روش کمترین مربعات خطا محاسبه شده و سپس به عنوان مقادیر مشخص و ثابت در داخل هر عصب جایگذاری می‌شود. در این نوع از شبکه‌ها عصب‌های مرحله قبلی و یا لایه قبلی (m) عامل و یا مولد تولید عصب‌های جدید (به تعداد $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{m}$) هستند. از میان عصب‌های تولیدشده، لزوماً بایستی تعدادی از آنها حذف گردند تا بدین وسیله از واگرایی شبکه جلوگیری به عمل آید.



شکل ۴. دیاگرام آزاد در یک المان از ورق

Fig. 4. Free diagram for an element of a plate



شکل ۵. دیاگرام آزاد نیروهای غشایی در یک المان از ورق

Fig. 5. Free diagram of the membrane forces on a plate element

را که دارای شش مجهول و N معادله است حل شود که در رابطه (۱۰) آمده است.

خروجی مطلوب $\{(y_i), i=1,2,\dots,N\}$ برقرار گردد. به همین خاطر تابع f بر اساس قاعده کمترین مربعات خطا، طبق رابطه (۹) ارائه شده است [۲۷ و ۲۹].

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

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

با این شرایطی که بر مسئله حاکم است، بایستی دستگاه معادله‌ای

برد. با توجه به تحلیل نیرویی نشان داده شده در «شکل ۴» و «شکل ۵» برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به صورت رابطه (۱۵) ارائه می شود [۳۲ و ۴۰].

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

در معادلات بالا M_x ، M_y و M_{xy} به ترتیب نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی هستند. همچنین P نیروی دینامیکی، H ضخامت ورق و W میزان جابجایی ورق است. با تعریف پارامترهای بی بعد $X = x/L$ ، $Y = y/L$ ، $W = w/H$ ، $T = C_s t/H$ ، $m_x = M_x/M_0$ ، $m_y = M_y/M_0$ ، $m_{xy} = M_{xy}/M_0$ ، $n_x = N_x/N_0$ ، $n_y = N_y/N_0$ ، $n_{xy} = N_{xy}/N_0$ و همچنین اضافه نمودن اثر نیروهای غشایی، معادله حاکم بر ورق مربعی به فرم بی بعد تبدیل می شود (معادله (۱۶)) [۳۲ و ۳۴].

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

در تعاریف بالا، L نصف طول ورق مربعی، M_0 گشتار خمشی کاملاً پلاستیک، N_0 نیروی غشایی کاملاً پلاستیک، C_s سرعت صوت در محیط، X و Y مختصات بی بعد، T زمان بی بعد و W خیز بی بعد هستند؛ همچنین، m_x ، m_y و m_{xy} ، گشتاورهای خمشی بی بعد و n_x ، n_y و n_{xy} ، نیروهای غشایی بی بعد هستند. جهت افزودن اثر نرخ کرنش، رابطه (۱۶) به صورت معادله (۱۷) تغییر می کند [۳۲ و ۳۴].

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

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

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

که در آن a و A از رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) به دست می آیند [۲۸].

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

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

و بردار Y مقادیر خروجی نیز از رابطه (۱۴) بدست آمده است [۲۸].

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

برای حل معادله لازم است که شبه معکوس ماتریس غیر مربعی A محاسبه گردد. به همین خاطر برای محاسبه شبه معکوس ماتریس غیرمربعی A ، از روش تجزیه مقادیر تکینه^۱ استفاده می شود [۲۸].

۳-۳- ارائه اعداد بی بعد جهت مدل سازی فرآیند نفوذ پرتابه کروی در اهداف چهارگوش

با مرور مطالعات و تحقیقات انجام شده روی تحلیل ابعادی رفتار پلاستیک-دینامیکی و شکست سازه های متفاوت اعم از تیر، ورق و پوسته ها تحت بارگذاری دفعی [۳۰-۳۹] این نتیجه به دست آمد که روش تحلیل ابعادی و به تبع آن استخراج روابط تجربی بر اساس اعداد بی بعد پیشنهادی، دارای مزیت های مانند سازمان دهی کارهای تجربی و دوری از انجام آزمایش های غیر ضروری است؛ لذا می توان از این روش به عنوان یک روش جایگزین مؤثر برای به دست آوردن یک رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی مسئله در هر فرآیندی نام

1 SVD

جدول ۳. نتایج کارهای تجربی
Table 3. Experimental results

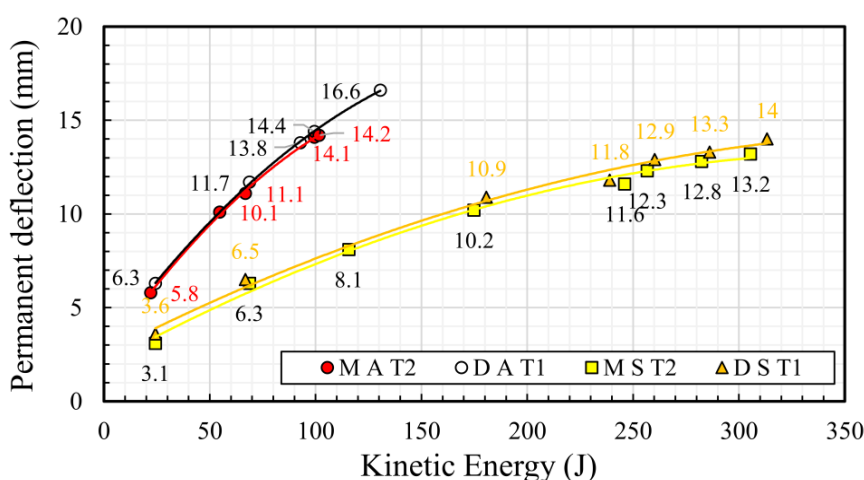
نمونه آزمایشی	ضخامت کل (mm)	سرعت اولیه (m/s)	انرژی جنبش (J)	خیز (mm)
M A T3_1	۳	۴۵	۲۵/۴	۴/۵
M A T3_2	۳	۸۴	۸۸/۶	۹/۳
M A T3_3	۳	۱۰۸	۱۴۶/۴	۱۲/۲
M A T3_4	۳	۱۲۰	۱۸۰/۷	۱۳/۵
M A T3_5	۳	۱۳۵	۲۲۸/۷	۱۵/۳
M A T3_6	۳	۱۴۵	۲۶۳/۹	۱۷/۸
M A T3_7	۳	۱۵۱	۲۸۶/۲	۱۸/۸
M A T3_8	۳	۱۵۴	۲۹۷/۷	پارگی
M A T2_1	۲	۴۲	۲۲/۱	۵/۸
M A T2_2	۲	۶۶	۵۴/۷	۱۰/۱
M A T2_3	۲	۷۳	۶۶/۹	۱۱/۱
M A T2_4	۲	۸۹	۹۹/۴	۱۴/۱
M A T2_5	۲	۹۰	۱۰۱/۷	۱۴/۲
M A T2_6	۲	۱۰۱	۱۲۸	پارگی
M S T3_1	۳	۴۴	۲۴/۳	۲
M S T3_2	۳	۶۶	۵۴/۷	۳/۱
M S T3_3	۳	۹۷	۱۱۸/۱	۵/۴
M S T3_4	۳	۱۱۴	۱۶۳/۱	۶/۶
M S T3_5	۳	۱۳۸	۲۳۹	۸/۳
M S T3_6	۳	۱۴۴	۲۶۰/۲	۸/۶
M S T3_7	۳	۱۴۸	۲۷۴/۹	۹/۱
M S T3_8	۳	۱۵۲	۲۹۰	۹/۴
M S T3_9	۳	۱۵۵	۳۰۱/۵	۱۰

ادامه جدول ۳.
Table 3. continued

نمونه آزمایشی	ضخامت کل (mm)	سرعت اولیه (m/s)	انرژی جنبش (J)	خیز (mm)
M S T2_1	۲	۴۴	۲۴/۳	۳/۱
M S T2_2	۲	۷۴	۶۸/۸	۶/۳
M S T2_3	۲	۹۶	۱۱۵/۷	۸/۱
M S T2_4	۲	۱۱۸	۱۷۴/۷	۱۰/۲
M S T2_5	۲	۱۴۰	۲۴۶	۱۱/۶
M S T2_6	۲	۱۴۳	۲۵۶/۶	۱۲/۳
M S T2_7	۲	۱۵۰	۲۸۲/۴	۱۲/۸
M S T2_8	۲	۱۵۶	۳۰۵/۴	۱۳/۲
D A T1_1	۲	۴۴	۲۴/۳	۶/۳
D A T1_2	۲	۷۴	۶۸/۷	۱۱/۷
D A T1_3	۲	۸۶	۹۲/۸	۱۳/۸
D A T1_4	۲	۸۹	۹۹/۴	۱۴/۴
D A T1_5	۲	۱۰۲	۱۳۰/۶	۱۶/۶
D A T1_6	۲	۱۰۳	۱۳۳/۱	پارگی
D S T1_1	۲	۴۴	۲۴/۳	۳/۶
D S T1_2	۲	۷۳	۶۶/۹	۶/۵
D S T1_3	۲	۱۲۰	۱۸۰/۷	۱۰/۹
D S T1_4	۲	۱۳۸	۲۳۹	۱۱/۸
D S T1_5	۲	۱۴۴	۲۶۰/۲	۱۲/۹
D S T1_6	۲	۱۵۱	۲۸۶/۲	۱۳/۳
D S T1_7	۲	۱۵۸	۳۱۳/۳	۱۴
TR A T1_1	۳	۱۱۸	۱۷۴/۷	۱۵/۴
TR A T1_2	۳	۱۲۵	۱۹۶/۱	۱۷
TR A T1_3	۳	۱۳۷	۲۳۵/۶	۱۸/۹
TR A T1_4	۳	۱۵۰	۲۸۲/۴	پارگی
TR S T1_1	۳	۴۴	۲۴/۳	۲/۳
TR S T1_2	۳	۶۶	۵۴/۷	۴/۳
TR S T1_3	۳	۱۲۰	۱۸۰/۷	۸/۳
TR S T1_4	۳	۱۴۴	۲۶۰/۲	۹/۷
TR S T1_5	۳	۱۴۶	۲۶۷/۵	۱۰/۳
TR S T1_6	۳	۱۵۲	۲۹۰	۱۰/۷
TR S T1_7	۳	۱۵۶	۳۰۵/۴	۱۱
TRM SAS T1_1	۳	۶۶	۵۴/۷	۵/۲

ادامه جدول ۳.
Table 3. continued

نمونه آزمایشی	ضخامت کل (mm)	سرعت اولیه (m/s)	انرژی جنبش (J)	خیز (mm)
TRM ASA T1_1	۳	۶۶	۵۴/۷	۶/۴
TRM ASA T1_2	۳	۱۲۱	۱۸۳/۷	۱۲
TRM ASA T1_3	۳	۱۲۸	۲۰۵/۶	۱۲/۵
TRM ASA T1_4	۳	۱۳۸	۲۳۹	۱۳/۸
TRM ASA T1_5	۳	۱۴۳	۲۵۶/۶	۱۴



شکل ۶. منحنی بیشترین خیز نمونه بر حسب انرژی جنبشی اولیه برای ساختارهای تک‌لایه و دولایه با ضخامت کل ۲ میلی‌متر

Fig. 6. Maximum deflection versus initial kinetic energy for single- and double-layered plates with the total thickness of 2 mm

$$\eta = \left(\frac{V_0 H}{3\sqrt{2}\rho BLD} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (19)$$

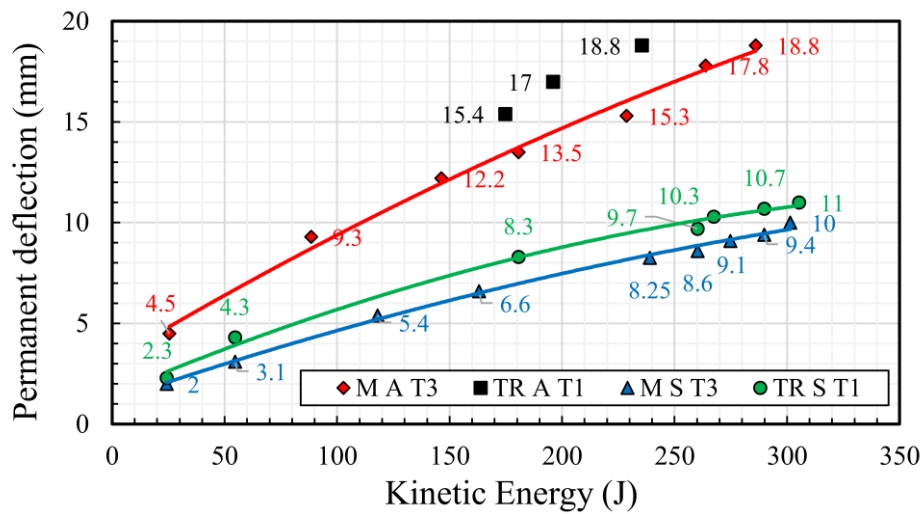
با جایگذاری معادلات (۱۸) و (۱۹) در معادله (۱۷)، تحلیل ابعادی برای معادله بی‌بعد حاکم بر ورق منجر می‌شود به:

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

لازم به توضیح است که رابطه (۲۰) برای تحلیل ورق‌های

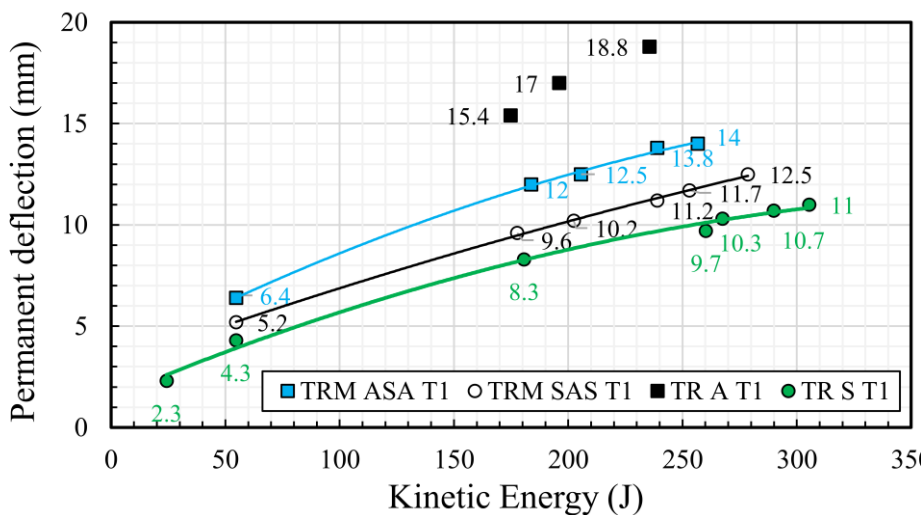
همان‌طور که از معادله (۱۷) برمی‌آید، سه عبارت در آن وجود دارد: هندسه ساختار L/H ، توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک $1/\sigma_d$ و نسبت بار دینامیکی به مقاومت ماده P/σ_d که فشار دینامیکی متناسب است با ρV_0^2 . اکنون با به‌کارگیری معادله ساختاری کوپر-سیموندز (q و D ثابت‌های ماده هستند) و استفاده از تقریب جونز [۴۱-۴۴]، برای محاسبه مقدار نرخ کرنش متوسط $\dot{\epsilon}_m = \frac{W_0 V_0}{3\sqrt{2}\rho B L}$ ، عدد بی‌بعد اثر نرخ کرنش ξ به صورت معادله ۱۹ تعریف می‌شود.

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



شکل ۷. منحنی بیشترین خیز نمونه برحسب انرژی جنبشی اولیه برای ساختارهای تک‌لایه و سه‌لایه با ضخامت کل ۳ میلی‌متر

Fig. 7. Maximum deflection versus initial kinetic energy for single- and triple-layered plates with the total thickness of 3 mm



شکل ۸. منحنی بیشترین خیز نمونه برحسب انرژی جنبشی اولیه برای ساختارهای تک‌لایه و سه‌لایه ترکیبی

Fig. 8. Maximum deflection versus initial kinetic energy for single and triple mixed layered plates

ساختارهای چندلایه در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی به ضخامت کل برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه مربعی تحت ضربه پرتابه صلب کروی به صورت رابطه (۲۱) و (۲۲) بیان می‌شود.

$$\frac{W_0}{H_t} = f\left(\frac{LB}{H_t d}, \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\eta}\right) \quad (21)$$

مربعی تحت بار دینامیکی پیشنهاد شده که از معادله بی‌بعد حاکم بر ورق استخراج شده است. شایان توجه است که در تحلیل ابعادی ساختارهای مربعی تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه صلب کروی نسبت به تحلیل ابعادی ورق‌های تک‌لایه تحت بار دینامیکی یکنواخت، کمیت‌های فیزیکی بیشتری وارد می‌شود. این کمیت‌ها شامل هندسه پرتابه و همچنین خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش ماده برای هر لایه است که باید در تحلیل رفتار پلاستیک

جدول ۴. منحنی‌های برازش برای مقادیر بیشترین خیز بر حسب انرژی جنبشی

Table 4. Fitted curves for the maximum deflection versus kinetic energy

هندسه	کد	منحنی برازش شده	R^2
تک لایه	M A T2	$W_0 = -0.0005E_k^2 + 0.16E_k + 2.4$	۱
	M A T3	$W_0 = -0.00005E_k^2 + 0.07E_k + 3.2$	۰/۹۹
	M S T2	$W_0 = -0.00008E_k^2 + 0.06E_k + 2.0$	۰/۹۹
	M S T3	$W_0 = -0.00003E_k^2 + 0.04E_k + 1.1$	۱
دولایه	D A T1	$W_0 = 0.0004E_k^2 + 0.15E_k + 2.8$	۱
	D S T1	$W_0 = -0.00007E_k^2 + 0.06E_k + 2.6$	۰/۹۹
سه لایه	TR A T1	$W_0 = 0.0006E_k^2 + 0.29E_k - 17.8$	۱
	TR S T1	$W_0 = -0.00005E_k^2 + 0.05E_k + 1.5$	۰/۹۹
سه لایه ترکیبی	TRM ASA T1	$W_0 = -0.00007E_k^2 + 0.06E_k + 3.3$	۱
	TRM SAS T1	$W_0 = -0.00003E_k^2 + 0.04E_k + 3.1$	۱

۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- نتایج تجربی

در جدول ۳، کلیه داده‌ها و نتایج کارهای آزمایشگاهی انجام گرفته روی نمونه‌های تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه فولادی و آلومینیومی جمع‌آوری شده است. نتایج به‌دست‌آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ساختارهای تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه تحت ضربه پرتابه کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه است که در آن اثر تغییرات جنس ورق، ضخامت لایه، نحوه لایه‌بندی ساختارها و همچنین تغییرات مقدار انرژی جنبشی وارد شده یا همان سرعت گلوله قبل از برخورد بر میزان تغییر شکل و مکانیسم تخریب ساختارها بررسی شده است.

بیشترین خیز دائمی ساختار بر حسب انرژی جنبشی گلوله برای اهداف مختلف در «شکل ۶» تا «شکل ۸» ترسیم شده است. در این اشکال، یک چندجمله‌ای روی داده‌ها به منظور ایجاد ارتباطی بین خیز و انرژی جنبشی برازش شده که در جدول ۴ ذکر شده است.

در حالت کلی، شکل‌های ۶ تا ۸ نشان می‌دهند که بیشترین خیز دائمی ساختار به ترتیب با افزایش سرعت ضربه‌زننده و کاهش ضخامت هدف افزایش می‌یابد، همان‌طور که به دلیل افزایش انرژی

$$\frac{W_0}{H_t} = f\left(\frac{LB}{H_t d}, \frac{\rho_{eq} V_0^2}{\sigma_{0,eq}}, \frac{1}{\eta_{eq}}\right) \quad (22)$$

که H_t ضخامت کل سازه، d قطر پرتابه کروی، V_0 سرعت اولیه پرتابه، ρ چگالی ماده، σ تنش تسلیم ماده فلزی و η نرخ کرنش است. در این روابط، عدد بی‌بعد اول مربوط به هندسه ساختار می‌شود؛ عدد بی‌بعد دوم، انرژی وارد بر سازه همراه با خواص مکانیکی ساختار را شامل می‌شود و در نهایت اعداد بی‌بعد سوم مربوط به نرخ کرنش ورق فلزی است. شایان توجه است که برای ساختارهای چندلایه از مفهوم ساده مهندسی میانگین استفاده شده برای هر نوع لایه‌بندی مقادیر میانگین چگالی، تنش تسلیم و نرخ کرنش لحاظ شده است. اکنون، روابط فوق را می‌توان به صورت رابطه (۲۳) در نظر گرفت.

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

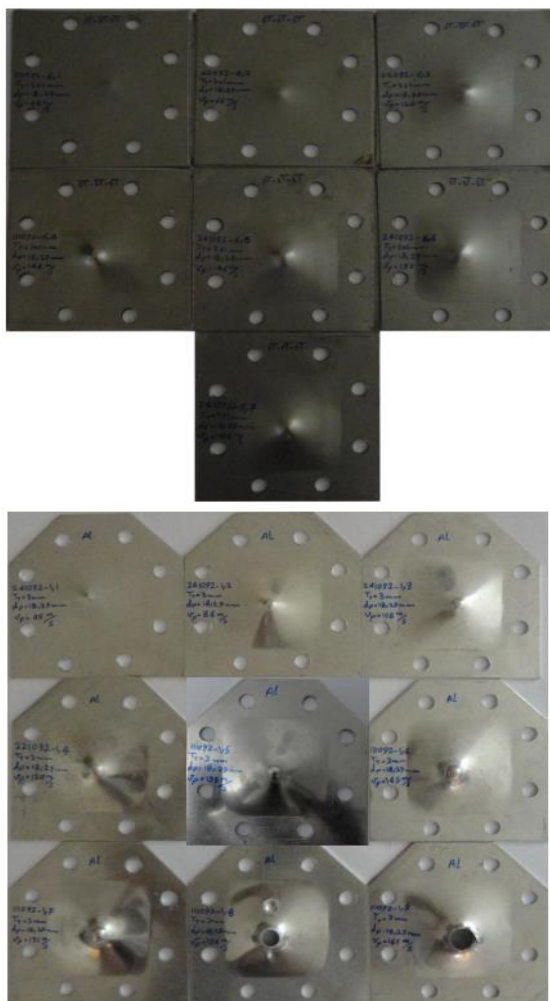
در این معادلات (X_1, X_2, X_3) داده‌های ورودی و Y داده خروجی شبکه است.

افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق فولادی به میزان ۸۰/۶٪، ۲۰۲/۸٪، ۲۲۷/۸٪، ۲۵۸/۳٪، ۲۶۹/۴٪ و ۲۸۸/۹٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۷۳، ۱۲۰، ۱۳۸، ۱۴۴، ۱۵۱ و ۱۵۸ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۴ متر بر ثانیه می‌شود. شایان توجه است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۸۰/۶٪، ۶۷/۷٪، ۸/۳٪، ۹/۳٪، ۳/۱٪ و ۵/۳٪. نتایج تجربی ارائه شده در «شکل ۶» را می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که افزایش تعداد لایه در ساختار آلومینیومی با ضخامت کل ۲ میلی‌متر منجر به افزایش خیز با نمو نمایی کاهشی در محدوده ۲٪ تا ۹٪ در بازه سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۰۳ متر بر ثانیه می‌گردد. همچنین، افزایش تعداد لایه در ساختار فولادی با ضخامت کل ۲ میلی‌متر منجر به افزایش خیز با نمو نمایی کاهشی در محدوده ۶٪ تا ۱۶٪ در بازه سرعت اولیه ۴۴ تا ۱۵۶ متر بر ثانیه می‌گردد.

علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده در «شکل ۷» برای ساختارهای تک‌لایه و سه‌لایه با ضخامت کل ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که در ضخامت‌های بیشتر از ۲ میلی‌متر، برخلاف حالت قبلی (ضخامت ۲ میلی‌متر) اختلاف بیشترین خیز ساختارهای تک‌لایه و دو‌لایه ناچیز نبوده و افزایش تعداد لایه تأثیر زیادی روی این کمیت دارد. به‌طور دقیق‌تر این نمودار نشان می‌دهد که برای ساختار تک‌لایه آلومینیومی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۱۰۶/۷٪، ۱۷۱/۱٪، ۲۰۰/۰٪، ۲۴۰/۰٪، ۲۹۵/۶٪ و ۳۱۷/۸٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۸۴، ۱۰۸، ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۴۵ و ۱۵۱ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۵ متر بر ثانیه می‌شود. لازم به توضیح است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۱۰۶/۷٪، ۳۱/۲٪، ۱۰/۷٪، ۱۳/۳٪، ۱۶/۳٪ و ۵/۶٪. همچنین برای ساختار تک‌لایه فولادی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق فولادی به میزان ۵۵/۰٪، ۱۷۰/۰٪، ۲۳۰/۰٪، ۳۱۲/۵٪، ۳۳۰/۰٪، ۳۵۵/۰٪، ۳۷۰/۰٪ و ۴۰۰/۰٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۶۶، ۹۷، ۱۱۴، ۱۳۸، ۱۴۴، ۱۴۸، ۱۵۲ و ۱۵۵ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۴ متر بر ثانیه می‌شود. شایان توجه است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۵۵/۰٪، ۷۴/۲٪، ۲۲/۲٪، ۲۵/۰٪، ۴/۲٪، ۵/۸٪، ۳/۳٪ و ۶/۴٪. نتایج تجربی همچنین نشان می‌دهد که برای ساختار سه‌لایه آلومینیومی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق

جنبشی اولیه و همچنین افزایش توانایی جذب انرژی در اهداف ضخیم‌تر پیش‌بینی می‌شود. همچنین نتایج داده‌های تجربی نشان می‌دهد که در صورت ثابت‌بودن ضخامت کل هدف، جابجایی نهایی یا همان بیشترین خیز دائمی با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد و مقاومت سازه در برابر بار ضربه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که چیدمان لایه‌بندی TRM ASA T1 مقاومت خمشی کمتری نسبت به صفحات فولادی تک‌لایه، دو‌لایه و سه‌لایه نشان می‌دهد. این در حالی است که آرایش لایه‌بندی SAS T1 TRM مقاومت خمشی بیشتری نسبت به M S T2 و D S T1 نشان می‌دهد.

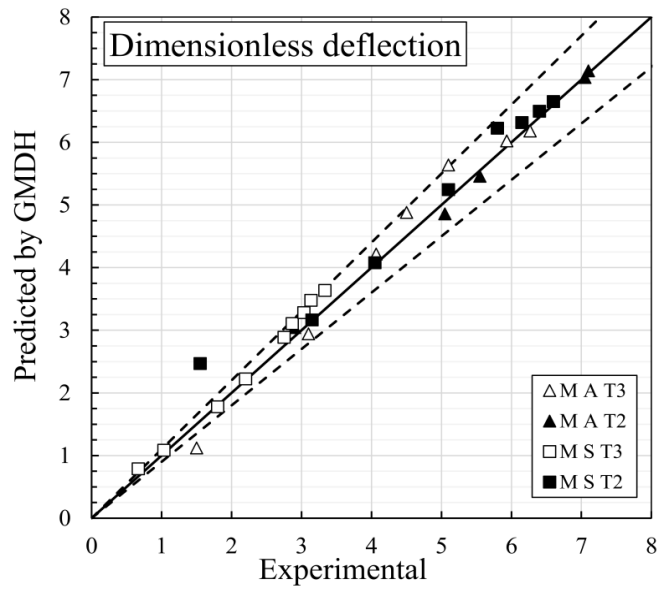
علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده در «شکل ۶» برای ساختارهای تک‌لایه و دو‌لایه با ضخامت کل ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که در ضخامت پایین، اختلاف بیشترین خیز ساختارهای تک‌لایه و دو‌لایه ناچیز بوده و افزایش تعداد لایه تأثیر چندانی روی این کمیت ندارد. به‌طور دقیق‌تر این نمودار نشان می‌دهد که برای ساختار تک‌لایه آلومینیومی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۵۷/۱٪، ۷۳/۸٪، ۱۱۱/۹٪ و ۱۱۴/۳٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۶۶، ۷۳، ۸۹ و ۹۰ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۲ متر بر ثانیه می‌شود. لازم به توضیح است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۵۷/۱٪، ۱۰/۶٪، ۲۱/۹٪ و ۱/۱٪. همچنین برای ساختار تک‌لایه فولادی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق فولادی به میزان ۱۰۳/۲٪، ۱۶۱/۳٪، ۲۲۹/۰٪، ۲۷۴/۲٪، ۲۹۶/۸٪، ۳۱۲/۹٪ و ۳۲۵/۸٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۷۴، ۹۶، ۱۱۸، ۱۴۰، ۱۴۳، ۱۵۰ و ۱۵۶ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۴ متر بر ثانیه می‌شود. شایان توجه است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۱۰۳/۲٪، ۲۸/۶٪، ۲۵/۹٪، ۱۳/۷٪، ۶/۰٪، ۴/۱٪ و ۳/۱٪. نتایج تجربی همچنین نشان می‌دهد که برای ساختار دو‌لایه آلومینیومی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۸۵/۷٪، ۱۱۹/۰٪، ۱۲۸/۶٪ و ۱۶۳/۵٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۷۴، ۸۶، ۸۹ و ۱۰۲ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۴ متر بر ثانیه می‌شود. لازم به توضیح است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۸۵/۷٪، ۱۷/۹٪، ۴/۳٪ و ۱۵/۳٪. همچنین برای ساختار دو‌لایه فولادی،



شکل ۹. نمونه‌هایی از ورق‌های تغییرشکل یافته و پاره شده
Fig. 9. Photographs of some tested specimens

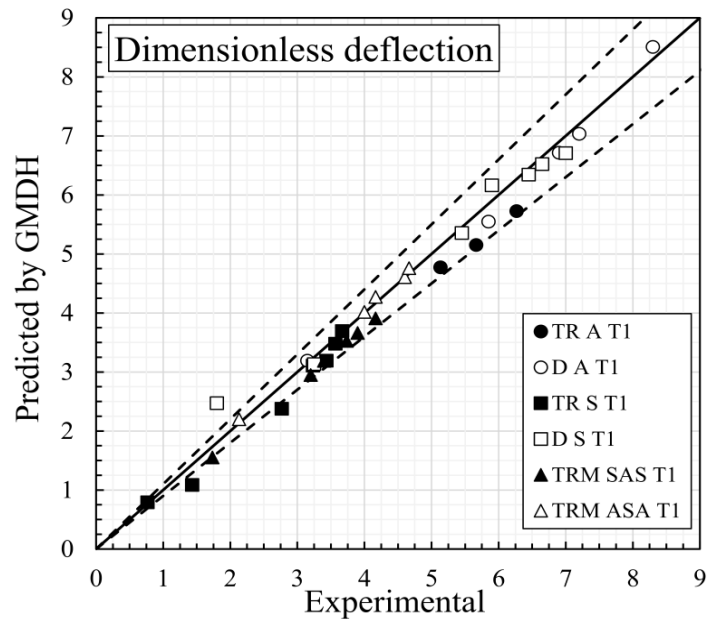
جمع‌بندی کرد که افزایش تعداد لایه در ساختار فولادی با ضخامت کل ۳ میلی‌متر منجر به افزایش خیز با نمو‌نمایی کاهشی در محدوده ۱۰٪ تا ۱۵٪ در بازه سرعت اولیه ۴۴ تا ۱۵۵ متر بر ثانیه می‌گردد. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده در «شکل ۸» برای ساختارهای تک لایه و سه لایه ترکیبی با ضخامت کل ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که برای ساختار سه لایه ترکیبی TRM ASA T1، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ساختار ترکیبی به میزان ۸۷/۵٪، ۹۵/۳٪، ۱۱۵/۶٪ و ۱۱۸/۸٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۱۲۱، ۱۲۸، ۱۳۸ و ۱۴۳ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۶۶ متر بر ثانیه می‌شود. لازم به توضیح است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۸۷/۵٪، ۴/۲٪، ۱۰/۴٪

آلومینیومی به میزان ۱۰/۴٪ و ۲۲/۱٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۱۲۵ و ۱۳۷ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۱۱۸ متر بر ثانیه می‌شود. لازم به توضیح است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۱۰/۴٪ و ۱۰/۶٪. همچنین برای ساختار سه‌لایه فولادی، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ورق فولادی به میزان ۸۷/۰٪، ۲۶۰/۹٪، ۳۲۱/۷٪، ۳۴۷/۸٪، ۳۶۵/۲٪ و ۳۷۸/۳٪ به ترتیب در سرعت‌های اولیه ۶۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۴۶، ۱۵۲ و ۱۵۶ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۴۴ متر بر ثانیه می‌شود. شایان توجه است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۸۷/۰٪، ۹۳/۰٪، ۱۶/۹٪، ۶/۳٪، ۳/۹٪ و ۲/۸٪. نتایج تجربی ارائه‌شده در «شکل ۷» را می‌توان این‌گونه



شکل ۱۰. مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه شده توسط روش شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها برای ساختارهای تک لایه

Fig. 10. Comparison of experimental results and mathematical model presented by GMDH neural network for single-layered plates



شکل ۱۱. مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه شده توسط روش شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها برای ساختارهای چندلایه

Fig. 11. Comparison of experimental results and mathematical model presented by GMDH neural network for multi-layered plates

اولیه ۱۱۹، ۱۲۷، ۱۳۸، ۱۴۲ و ۱۴۹ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت اولیه ۶۶ متر بر ثانیه می‌شود. شایان توجه است که این مقادیر نسبت به وضعیت قبلی سرعت به ترتیب برابر است با ۸۴/۶٪، ۶/۳٪، ۹/۸٪،

و ۱/۴٪. همچنین برای ساختار سه لایه ترکیبی TRM SAS T1، افزایش سرعت اولیه منجر به افزایش خیز ساختار ترکیبی به میزان ۸۴/۶٪، ۹۶/۲٪، ۱۱۵/۴٪، ۱۲۵/۰٪ و ۱۴۰/۴٪ به ترتیب در سرعت‌های

۴/۵٪ و ۶/۸٪.

در «شکل ۹»، نمونه‌هایی از تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه نشان داده شده است.

۲-۴- نتایج مدل‌سازی با روش شبکه عصبی

در مدل‌سازی فرآیند نفوذ در ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب از ۶۲ دسته داده ورودی-خروجی آن به‌عنوان ورودی شبکه عصبی از نوع دسته‌بندی گروهی داده‌ها استفاده شده است. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دودسته تقسیم شده‌اند که شامل دسته داده‌های آموزشی و پیش‌بینی هستند؛ بنابراین، ۴۳ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۹ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، نسبت بیشترین خیز دائمی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه به ضخامت کل با استفاده از شش سری معادلات ارائه‌شده در قسمت پیوست ارائه‌شده، به دست می‌آید. لازم به توضیح است که این معادلات به‌صورت شبکه به یکدیگر متصل هستند. مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل ریاضی بدست‌آمده از شبکه عصبی از نوع دسته‌بندی گروهی داده‌ها و خروجی‌های تجربی در ۶۲ داده ورودی-خروجی فرآیند نفوذ در ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی در «شکل ۱۰» و «شکل ۱۱» نشان داده شده است. 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 خط چین مشکی‌رنگ با فاصله کوتاه، محدوده‌ای است که در آن خطای پیش‌بینی کمتر از ۱۰٪ است و جهت سنجش میزان دقت مدل تجربی پیشنهادی رسم شده است.

مطابق با شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی مدل و مقادیر تجربی مشاهده می‌شود به‌طوری‌که در مجموع ۶۲ داده تجربی، ۹۴٪/۵۸ داده از کل نقاط تجربی در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند. آمده و انحراف داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها بسیار اندک است. این انحراف در بعضی از بخش‌ها به صفر می‌رسد. نتایج روش مدل‌سازی انجام‌شده برای فرآیند نفوذ در ساختارهای تک‌لایه

و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب، نشان‌دهنده دقت بالا و توانایی شبکه عصبی ارائه‌شده در طراحی و مدل‌سازی این فرآیند است. کاملاً مشخص است که هم خطای مدل‌سازی و هم خطای پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در این تحقیق به نتایج خوبی منجر شده، به‌خصوص این مورد را می‌توان در مورد خطای پیش‌بینی مشاهده کرد. با توجه به کم‌بودن خطای پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان از آن به‌عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش‌بینی رفتار پلاستیک ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، به‌منظور بررسی تغییر شکل و مکانیسم تخریب ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه، ۶۶ نمونه آزمایشگاهی در هشت گروه‌بندی مختلف، طراحی و ساخته شد. نتایج تجربی به‌دست‌آمده به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردد: (۱) برای مواردی که سرعت ضربه زننده ۴۴ متر بر ثانیه و ضخامت کل ساختار ۲ و ۳ میلی‌متر است؛ بیشترین خیز هدف فولادی دولایه و سه‌لایه تقریباً ۱/۱۶ برابر بزرگ‌تر از هدف فولادی تک‌لایه است. این مقدار برای هدف فولادی دولایه در حدود ۵۷/۵٪ در مقایسه باهدف آلومینیومی کوچک‌تر است. همچنین، این مقدار با اضافه‌کردن یک لایه به ساختار فولادی تک‌لایه، به ۶۲/۵٪ تغییر می‌یابد، (۲) برای حالتی که سرعت ضربه‌زننده ۶۶ متر بر ثانیه باشد، این نتیجه حاصل می‌شود که ترتیب لایه‌بندی ASA ۱/۲۲ برابر بیشتر از لایه‌بندی SAS تغییر شکل می‌دهد، (۳) برای حالتی که سرعت ۱۲۰ و ۱۴۴ متر بر ثانیه است، خیز اهداف فولادی سه‌لایه به ترتیب ۰/۷۶ و ۱/۱۳ برابر بیشتر از اهداف فولادی دولایه و تک‌لایه است. در این سری از آزمون‌ها، نفوذ کامل برای اهداف فولادی تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه رخ نمی‌دهد.

در بخش مدل‌سازی، از روش شبکه عصبی برای ارائه یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختار تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه صلب کروی استفاده شد. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند به‌طوری‌که ۴۳ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۹ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شد.

- behavior of aluminum plates, *International Journal of Solids and Structures*, 44(10) (2007) 3411-3439.
- [9] E. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards, Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, *International Journal of Impact Engineering*, 38(12) (2011) 1022-1032.
- [10] Y. Deng, W. Zhang, Z. Cao, Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against hemispherical-nosed projectiles impact, *Materials & Design*, 41 (2012) 266-281.
- [11] Y. Deng, W. Zhang, Z. Cao, Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against ogival-nosed rigid projectiles impact, *Materials & Design*, 44 (2013) 228-239.
- [12] G. Tiwari, M. Iqbal, P. Gupta, N. Gupta, The ballistic resistance of thin aluminium plates with varying degrees of fixity along the circumference, *International Journal of Impact Engineering*, 74 (2014) 46-56.
- [13] M. Iqbal, G. Tiwari, P. Gupta, P. Bhargava, Ballistic performance and energy absorption characteristics of thin aluminium plates, *International Journal of Impact Engineering*, 77 (2015) 1-15.
- [14] 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*, 102 (2016) 58-67.
- [15] P. Sharma, P. Chandel, V. Bhardwaj, M. Singh, P. Mahajan, Ballistic impact response of high strength aluminium alloy 2014-T652 subjected to rigid and deformable projectiles, *Thin-Walled Structures*, 126 (2018) 205-219.
- [16] M. Sayahbadkhor, K. Vahedi, A.R. Naddaf Oskouei, Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic - metal semi-infinite targets, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 9(2) (2019) 31-45. (In Persian)
- [17] M. Sayahbadkhor, A.R. Naddaf Oskouei, K. Vahedi, Evaluation of the projectile penetration models in the metal and ceramic targets, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 9(4) (2019) 77-92. (In Persian)
- [18] A. Jamali, H. Babaei, N. Nariman-Zadeh, S. Ashraf Taleh, نتایج حاصل شده بیانگر توافق خوب بین مدل ارائه شده با مقادیر تجربی است به طوری که ۹۴٪ از نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند؛ بنابراین، با توجه به کم بودن خطای پیش بینی مدل ارائه شده در این تحقیق می توان از آن به عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش بینی رفتار پلاستیک ساختار تک لایه و چند لایه تحت ضربه پرتابه صلب کروی استفاده کرد.
- ### مراجع
- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] T. Børvik, M. Langseth, O. Hopperstad, K. Malo, Ballistic penetration of steel plates, *International journal of impact engineering*, 22(9-10) (1999) 855-886.
- [4] J. Jovicic, A. Zavaliangos, F. Ko, Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armors, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 31(8) (2000) 773-784.
- [5] Y.H. Yoo, H. Shin, Protection capability of dual flying plates against obliquely impacting long-rod penetrators, *International journal of impact engineering*, 30(1) (2004) 55-68.
- [6] G. Liaghat, A. Malekzadeh, A modification to the mathematical model of perforation by Dikshit and Sundararajan, *International journal of impact engineering*, 22(5) (1999) 543-550.
- [7] C.-C. Liang, M.-F. Yang, P.-W. Wu, T.-L. Teng, Resistant performance of perforation of multi-layered targets using an estimation procedure with marine application, *Ocean engineering*, 32(3-4) (2005) 441-468.
- [8] N. Gupta, M. Iqbal, G. Sekhon, Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation

- loading, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58(1) (2017) 139-147.
- [27] N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, M. Felezi, H. Gharababaei, Polynomial modelling of explosive compaction process of metallic powders using GMDH-type neural networks and singular value decomposition, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 10(6) (2002) 727.
- [28] H. Gharababaei, N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition, *Journal of Mechanics*, 26(3) (2010) 355-361.
- [29] F. Farrokhi, A. Firoozfar, M.S. Maghsoudi, Evaluation of liquefaction-induced lateral displacement using a GMDH-type neural network optimized by genetic algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1) (2020) 4.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with 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*, 234(3) (2020) 368-378.
- [19] 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.
- [20] M. Rezasefat, T.M. Mostofi, T. Ozbakkaloglu, Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates, *Thin-Walled Structures*, 144 (2019) 106332.
- [21] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, N. Namazi, A. Rahmanpoor, Dynamic compaction of cold die Aluminum powders, *Geomech Eng*, 10 (2016) 109-124.
- [22] 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*, 234(2) (2020) 246-254.
- [23] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, M. Namdari, Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 15(5) (2015) 357-366.
- [24] R.A. Aliev, B. Guirimov, B. Fazlollahi, R.R. Aliev, Evolutionary algorithm-based learning of fuzzy neural networks. Part 2: Recurrent fuzzy neural networks, *Fuzzy sets and systems*, 160(17) (2009) 2553-2566.
- [25] I.P. Panapakidis, A.S. Dagoumas, Day-ahead natural gas demand forecasting based on the combination of wavelet transform and ANFIS/genetic algorithm/neural network model, *Energy*, 118 (2017) 231-245.
- [26] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Saeidinejad, Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic

- theoretical, *Struct Eng Mech*, 56(4) (2015) 535-548.
- [40] 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.
- [41] N. Jones, *Structural impact*, Cambridge university press, 2011.
- [42] 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.
- [43] M. Ziya-Shamami, H. Babaei H, T.M. Mostofi, H. Khodarahmi. Structural response of monolithic and multi-layered circular metallic plates under repeated uniformly distributed impulsive loading: An experimental study, *Thin-Walled Structures*, 157 (2020) 107024.
- [44] T.M. Mostofi, M. Sayah-Badkhor, M. Rezasefat, T. Ozbakkaloglu, H. Babaei. Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates, *Thin-Walled Structures*, 155 (2020) 106851.
- 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.
- [35] 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*, 231(5) (2017) 939-950.
- [36] 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*, 40(6) (2016) 1485-1494.
- [37] 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.
- [38] 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*, 315 (2017) 171-181.
- [39] H. Babaei, T.M. Mostofi, S.H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and

$H_1 = -0.004514 - 0.09051X_1 + 18.88X_2 + 0.002464X_1^2 - 22.48X_2^2 + 0.01832X_1X_2$	(1)
$H_2 = -1.204 + 1.490X_3 + 0.4438H_1 - 0.2821X_3^2 + 0.04431H_1^2 + 0.1517X_3H_1$	(2)
$H_3 = 0.5090 - 3.684X_2 + 0.5362H_2 + 9.249X_2^2 + 0.06364H_2^2 - 0.06317X_2H_2$	(3)
$H_4 = 0.06671 - 0.017H_1 + 1.177H_3 - 0.1908H_1^2 - 0.1139H_3^2 + 0.2709H_1H_3$	(4)
$H_5 = -0.7336 + 0.8320X_3 + 0.9453H_4 - 0.1112X_3^2 - 0.01903H_4^2 - 0.04988X_3H_4$	(5)
$H_6 = -0.2493 + 0.5109H_2 + 0.5932H_5 + 0.03795H_2^2 + 0.1538H_5^2 - 0.2046H_2H_5$	(6)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

T. Mirzababaie Mostofi, M. Sayah Badkhor, H. Babaei, Investigation of penetration behavior of monolithic and multi-layered metallic targets subjected to a projectile impact, *AmirKabir J. Mech Eng.*, 53(4) (2021) 2309-2330.

DOI: [10.22060/mej.2020.17871.6678](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17871.6678)



