



تغییر شکل پلاستیک ورق‌های آلومینیومی با روکش پلیمری تحت بارگذاری انفجار مخلوط گازها: بخش اول: مطالعات تجربی

توحید میرزابابایی^۱ و هاشم بابایی^{۲*}

^۱ مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

نوع مقاله، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

چکیده

در این تحقیق، از یک فرآیند شکل‌دهی نوین به نام روش انفجار مخلوط گازها برای تغییر شکل بزرگ ورق‌های نازک مستطیلی آلومینیومی با روکش پلیمری استفاده شده است. بر اساس این ایده جدید، یک مجموعه آزمایش روی رفتار پلاستیک ساختارهای دولایه فلز-پلیمری با هدف افزایش آستانه تحمل بار دفعی انجام شده است. در این ساختارها، از روکش پلیمری پلی‌اوره با ضخامت‌های مختلف ۳ و ۴ میلی‌متری به‌عنوان یک لایه تقویت‌کننده برای ورق‌های آلومینیومی استفاده شده است. در این سری از آزمایش‌ها، اثر ضخامت لایه‌های عقبی و جلویی بر رفتار ساختار دولایه فلز-پلیمری تحت پنج بار دفعی مختلف، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تجربی نشان داد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان ۱۲/۷٪ و ۲۱/۱٪ در ایمپالس ۱۹/۱ N·s، ۲۲/۲٪ و ۳۰/۹٪ در ایمپالس ۲۸/۱ N·s و در نهایت ۲۳/۳٪ و ۳۱/۳٪ در ایمپالس ۳۲/۳ N·s می‌شود. برای ورق‌های آلومینیومی با ضخامت ۱ میلی‌متر، استفاده از روکش پلیمری ۳ و ۴ میلی‌متری، به ترتیب موجب ۲/۴ و ۲/۱ برابر کردن آستانه تحمل بار دفعی می‌شود.

کلمات کلیدی: آزمایش؛ تغییر شکل پلاستیک؛ روکش پلیمری؛ شکل‌دهی با انفجار مخلوط گاز؛ ورق آلومینیومی.

Plastic Deformation of Polymeric-Coated Aluminum Plates Subjected to gas Mixture Detonation Loading: Part I: Experimental Studies

T. Mirzababaei¹, H. Babaei^{2*}

¹ Lecturer, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

In this study, a novel processing technique, namely gas mixture detonation method, was used for large plastic deformation of thin rectangular aluminum plates reinforced by polymeric coating. Based on this new idea, a series of experimental tests were conducted on plastic behavior of metal-elastomer bilayer structures with the aim of increasing the threshold of the impulsive load. In these structures, polyurea coating with different thicknesses of 3 mm and 4 mm was used as a reinforcing layer for aluminum plates. In this series of experiments, the effects of the back and front layer thicknesses on the behavior of the structure subjected to five different impulsive loads have been studied. The experimental results indicated that addition of polymeric coating with thicknesses of 3 mm and 4 mm to the 2 mm thick aluminum sheet led to a decrease in the permanent deflections of structure by 12.7% and 21.1% at impulse of 19.1 N·s, 22.2% and 30.9% at impulse of 28.1 N·s, and eventually, 23.3% and 31.3% at impulse of 32.3 N·s, respectively. For 1 mm thick aluminum sheet, using polymeric coating of 3 and 4 mm led to increase of the threshold of the impulsive load 2.1 and 2.4 times, respectively.

Keywords: Experimental Test; Plastic Deformation; Polymeric Coating; Gas Mixture Detonation Forming; Aluminum Plate.

۱- مقدمه

از سال‌های دور، به دلیل نیاز بشر به ساخت قطعه‌ها و شکل‌دهی فلزات، درک این شاخه از علم همواره مورد توجه محققان و صنعتگران بوده است. هم‌زمان با انقلاب صنعتی اروپا، پیشرفت علم و فناوری سبب شد تا شکل‌دهی فلزات در مسیر تازه‌ای قرار گیرد. در زمان جنگ جهانی دوم، روش‌های شکل‌دهی انفجاری و ضربه‌ای به‌منظور ساخت و شکل‌دهی فلزات با اشکال پیچیده پیشنهاد شد، اما به علت محدودیت‌هایی که این روش دارا بود، چندان مورد استفاده قرار نمی‌گرفت [۱-۱۵]. در دهه اخیر، یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی با استفاده از انفجار مخلوط گازها است که در تحقیق حاضر، از انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن استفاده می‌شود [۱۶-۳۴].

فرآیند شکل‌دهی با روش انفجار مخلوط گازها، نتیجه یک فرایند شیمیایی گرمازا میان یک ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. پس از ایجاد شوک ناشی از انفجار، فشار دینامیکی باعث تغییر شکل جسم می‌شود. با توجه به اینکه مخلوط کردن سوخت‌های گازی با هوا نسبتاً آسان است، لذا برای رسیدن به احتراق کامل سوخت‌های گازی، از مقدار کمی هوای اضافی استفاده می‌شود که مقدار آن به نوع سوخت بستگی دارد. به‌طور کلی، هوای اضافی موردنیاز برای احتراق کامل سوخت‌های گازی کمتر از سوخت‌های جامد و مایع است [۲۰ و ۲۱]؛ لذا در این فرآیند، در صورتی که نسبت سوخت به هوا در حد استوکیومتری خود باشد، در مخلوط حاصل، گازهای نسوخته و یا اکسیژن اضافی وجود نخواهد داشت. از مزیت‌های روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی با سرعت‌بالا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) به حداقل رساندن خطر انفجار مخلوط گاز استیلن و اکسیژن نسبت به مواد منفجره (۲) قابلیت انجام آزمایش با روش موردنظر در کارگاه معمولی (۳) قابل کنترل بودن فشارهای ورودی برای رسیدن به فشار نهایی خاص (۴) خودکار کردن مراحل استفاده از انفجار گاز که سبب می‌شود تکرار آزمایش آسان باشد (۵) به حداقل رساندن صدای تولیدشده (۶) به حداقل رساندن هزینه‌های تحقیقاتی و آزمایش‌ها [۱۶-۱۸].

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی با سرعت‌بالا، استفاده از روش انفجار مخلوط گازهاست که در دهه اخیر تحقیقات نسبت خوبی در این زمینه انجام شده است. هرچند به دلیل نوین بودن آن، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه شکل‌دهی ورق با استفاده از این روش ارائه شده است. در ادامه به چندین مرجع مهم در این مورد اشاره می‌شود.

در سال ۱۹۹۹، هوندا و سوزوکی مقاله‌ای با عنوان شکل‌دهی فلزات با انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و متان ارائه دادند. در این تحقیق، آن‌ها به ذکر اصول این روش پرداختند و با ساخت سامانه موردنظر و استفاده از مخلوط استوکیومتری متان و اکسیژن، کاربردهای این روش را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توانستند در نهایت ورق با قطر ۱ متر را شکل دهند [۱۶].

در طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶، یاشار و همکارانش در دانشگاه کارابوک ترکیه به بررسی تجربی، عددی و بهینه‌سازی پارامترهای موجود در شکل‌دهی ساختارهای فنجان‌ی با استفاده از روش انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن پرداختند. در بخش تجربی آن‌ها با در نظر گرفتن نسبت حجمی برابر برای گازهای استیلن و اکسیژن، از سامانه شکل‌دهی انفجاری دومرحله‌ای برای ایجاد ساختارهای فنجان‌ی شکل استفاده کردند. بر این اساس، سرعت شوک و مقادیر فشار حاصل از آن با استفاده از سامانه‌های اندازه‌گیری ثبت شد. آن‌ها با مدل کردن دوبعدی و سه‌بعدی این فرآیند با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ال اس-داین، موفق به شبیه‌سازی این فرآیند شدند. در ادامه کارهای عددی آن‌ها توانستند، بازگشت فنری این فرآیند را بهینه‌سازی کنند [۱۷] و [۱۸].

در سال ۲۰۰۷، وبر و همکارانش از دانشگاه‌های مختلف در آلمان از کاربرد مستقیم موج‌های حاصل از انفجار گازها به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای انبساط لوله‌ها استفاده کردند. در بخش تجربی، آن‌ها در ابتدا به تشریح کامل سامانه ساخته شده و تجهیزات اندازه‌گیری برای ثبت نمودار فشار-زمان پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌دهی آزاد و با قالب انبساط لوله‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌دهی شبه استاتیک آن‌ها در روش هیدروفورمینگ مقایسه شد. در این سری از آزمایش‌ها، آن‌ها از آلومینیوم خالص و آلیاژ

در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، در ادامه مجموعه کارهای تجربی انجام‌گرفته در آزمایشگاه موج شوک دانشگاه RWTH آلمان، پاتیل و همکارانش به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای فنجانی فولادی با استفاده از روش انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و هیدروژن پرداختند. در بخش شبیه‌سازی عددی، شبیه‌سازی‌ها روی مدل‌های سه‌بعدی محاسباتی با استفاده از مدل ماده جانسون-کوک و تحلیل دینامیکی صریح انجام شد. یکی از نکات بسیار مهم در بخش عددی، در نظر گرفتن منحنی واقعی فشار-زمان به‌دست‌آمده از حس‌گر به‌عنوان ورودی مسئله بود. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده بیانگر، وابستگی قابل‌توجه مد تغییر شکل و توزیع ضخامت به تغییر نرخ بارگذاری بود. لازم به توضیح است که مدل عددی ارائه شده در این تحقیق، در مقایسه با کارهای عددی انجام شده در ادبیات تحقیق، قادر به پیش‌بینی لبه‌های بسیار تیز و تخمین درست آسیب ابتدایی و سیر تکامل تدریجی آن بود که عمدتاً به علت میزان بالای فشار یا جابجایی اولیه قطعه کار در آزمایش رخ می‌داد. آن‌ها همچنین در ادامه تحقیقات خود، به بررسی تجربی و عددی اتصال لوله‌های فولادی و مسی با استفاده از روش شکل‌دهی مذکور پرداختند [۲۶-۲۸].

در طی سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹، میرزابابای مستوفی و همکارانش، مطالعات تجربی خود را روی شکل‌دهی ورق‌های مستطیلی تک‌لایه [۲۹ و ۳۰] و دولایه [۳۱] با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها ادامه دادند. مشابه با ساختارهای تک‌لایه، نمونه‌های دولایه نیز از ترکیب، یک لایه جلویی از جنس آلایژ آلومینیوم (صفحه‌ای که بار انفجاری را تحمل می‌کند) و یک لایه عقبی از جنس فولاد نرم ساخته شدند. چهار نوع متفاوت از پیکربندی‌های با ضخامت مختلف، یعنی، $1\text{mm}+1\text{mm}$ ، $1\text{mm}+2\text{mm}$ ، $2\text{mm}+1\text{mm}$ و $2\text{mm}+2\text{mm}$ انتخاب شدند تا بتوان تاثیر ضخامت لایه‌های جلویی و عقبی بر مقاومت تغییر شکل ساختار دو لایه بررسی شود. هر گروه آزمایشی در معرض پنج فشار پیش از انفجار مخلوط اکسیژن و استیلن قرار گرفت. 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

آلومینیوم-منیزیم-سیلیسیم استفاده کردند که به ترتیب ۲۵٪ و ۲۰٪ در نمونه‌ها انبساط داشتند. در تحقیقی دیگر، آن‌ها این نوع روش شکل‌دهی را به‌عنوان روشی جایگزین برای شکل‌دهی قطعات توخالی، بدنه ماشین و اجزاء آگزوز در صنعت خودرو به‌جای استفاده از روش هیدروفرمینگ معرفی کردند. آن‌ها روش معرفی شده را در دسته‌بندی روش‌های شکل‌دهی سرعت‌بالا قراردادند و به مزیت مهم آن مانند، دست یافتن به کرنش‌های بیشتر و دوری از نیروهای پرس بالا در مقایسه با فرآیندهای شکل‌دهی شبه استاتیک با فشار آب بالا اشاره کردند [۱۹].

در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳، خالقی میبیدی و همکارانش مقاله‌ای تحت عنوان فرآیند شکل‌دهی فلزات به کمک انفجار مخلوط گاز ارائه کردند که در آن انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره، عامل شکل‌دهی ورق‌های فلزی بود. در این تحقیق، ابتدا به بررسی این فرآیند پرداخته و سپس با استفاده از مخلوط گاز هیدروژن و اکسیژن، شکل‌دهی صفحات آلومینیومی انجام شده و پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی، مورد بحث قرار گرفته که در این خصوص شرایط مطلوب با مخلوط ۳۰ درصد اکسیژن و ۷۰ درصد هیدروژن حاصل شده است. سپس با استفاده نرم‌افزار المان محدود به شبیه‌سازی این فرآیند پرداخته شد و برای اعتبار سنجی نرم‌افزار، نتایج حاصل با کار عملی مقایسه گردید [۲۰ و ۲۱].

در طی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، بابایی و همکارانش مطالعات خود را روی شکل‌دهی ورق‌های دایره‌ای با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان متمرکز کردند. در مطالعات انجام‌گرفته، از دو گاز اکسیژن و استیلن برای تولید بار دفعی (بار ایمپالسیو وارد شده به نمونه) و شکل‌دهی نمونه به دو طریق با قالب مخروطی و بدون قالب، به‌صورت تجربی پرداخته شد. در این راستا از سه ماده متفاوت برنجی، آلومینیومی و فولادی در ضخامت‌های مختلف بهره گرفته شد. آزمایش‌های تجربی با درصد متفاوتی از مخلوط دو گاز اکسیژن و استیلن انجام شد و به‌تبع آن اثر میزان بار آبی اعمال شده بر میزان تغییر شکل پلاستیک ورق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۲۲-۲۴]. در سال ۲۰۱۷، آن‌ها در ادامه تحقیقات خود، به معرفی روش شکل‌دهی انفجار مخلوط گازها به‌عنوان یک فرآیند جدید برای تغییر شکل پودرهای فلزی پرداختند [۲۵].

شکل ۱ نشان داده شده، انجام گرفته است. این سامانه آزمایشی شامل چهار بخش اصلی است: (۱) واحد اشتعا، (۲) شیر کنترل گاز (۳) واحد سیستم اندازه‌گیری فشار (۴) واحد شکل‌دهی.

واحد اشتعال این سامانه شامل، سیلندره‌های ذخیره گاز اکسیژن و استیلن و یک محفظه احتراق ۶ لیتری از جنس فولاد ضدزنگ با قطر داخلی ۱۲۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۰۰ میلی‌متر، ضخامت دیواره ۴۰ میلی‌متر و طول ۵۳۰ میلی‌متر است که توسط گازهای اکسیژن و استیلن پر می‌شود. این محفظه احتراق دارای یک شیر تخلیه جهت خارج کردن گازهای موجود در سیلندر نیز است. در بخش دوم، به منظور تنظیم میزان فشار قبل از انفجار هر یک از گازهای ورودی، از شیرهای کنترل گاز استفاده می‌شود. مخلوط گاز در انتهای بسته محفظه احتراق توسط یک سیستم جرعه زن منفجر می‌شود. موج شوک حاصل از انفجار مخلوط گازی در طول محفظه احتراق حرکت می‌کند و در نهایت موجب تغییر شکل ورق می‌شود. واحد سیستم اندازه‌گیری فشار شامل، یک مانومتر به منظور اندازه‌گیری میزان فشار وارد شده داخل محفظه احتراق قبل از انفجار، یک حسگر فشار پیزوالکتریک به منظور ثبت فشار پس از انفجار اعمالی بر سطح نمونه، یک سیستم تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی از حسگر پیزوالکتریک و یک سامانه ثبت داده‌های دینامیکی برای ذخیره نمودار فشار-زمان از حسگر پیزوالکتریک است. لازم به توضیح است که تمامی تجهیزات اندازه‌گیری استفاده شده در این سامانه، ساخت شرکت SINOCERA [۳۵ و ۳۶] است.

در اولین قسمت از واحد شکل‌دهی، یک حوضچه مستطیلی با ابعاد ۲۵۰×۲۰۵ میلی‌متر مربع از یک طرف به سیلندر محفظه احتراق با ۸ پیچ M14 متصل گشته و از طرف دیگر به نگه‌دارنده عقبی با ابعاد ۳۹۰×۳۴۵ میلی‌متر مربع جوش شده است. نمونه‌های آزمایشی بین دو نگه‌دارنده عقبی و جلویی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده و توسط ۱۴ پیچ M12 به‌طور کاملاً گیردار مهار می‌شوند. با توجه به شرایط هندسی مسئله، هر دو نگه‌دارنده دارای سوراخی با ابعاد ۲۵۰×۲۰۵ میلی‌متر مربع هستند که این سوراخ در نگه‌دارنده عقبی برای اعمال بار روی ورق و در

بسته مبتنی بر روش انرژی برای ساختارهای دو لایه در معرض بار دفعی یکنواخت حاصل از انفجار مخلوط گازها ارائه شد. علاوه بر این، فرمول‌های طراحی تجربی براساس اعداد بدون بعد جدید برای پیش‌بینی حداکثر خیز دایمی لایه‌های عقب و جلو بدست آمدند. لازم به توضیح است که در روابط تحلیلی و بی‌بعد، تاثیر حساسیت نرخ کرنش مواد در نظر گرفته شد [۲۹-۳۱].

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه شکل‌دهی با روش انفجار مخلوط گازها، به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی روی ورق‌های دایره‌ای انجام گرفته، به طوری که در شبیه‌سازی‌ها از نمودارهای تخمینی و فرضی برای اعمال بار دفعی استفاده شده است [۱۶-۲۸]؛ لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای مستطیلی آلومینیومی تقویت شده با روکش پلیمری به منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آن‌ها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل، بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای آلومینیومی تقویت شده با روکش پلیمری مستطیلی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها و مقایسه عملکرد آن‌ها با ساختارهای فلزی تک‌لایه گزارش شده توسط نویسندگان در تحقیقات پیشین خود [۲۹ و ۳۰] است.

۲- مطالعات تجربی

آنچه در مطالعات تجربی فرآیند شکل‌دهی تحت بار دفعی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارها تحت آزمایش نسبت به بار دفعی اعمالی است؛ لذا در این تحقیق، هدف از کارها آن است تا بتوان با افزودن یک لایه تقویت‌کننده، از به وجود آمدن مدهای تخریب در ورق‌های آلومینیومی پیش‌گیری کرد و آستانه تحمل بار دفعی اعمال شده بر این ساختارها را افزایش داد. به همین منظور در مطالعه حاضر، از روکش پلی‌اوره به‌عنوان لایه پوشش یا تقویت‌کننده استفاده می‌شود.

شکل‌دهی آزاد ساختارهای آلومینیومی تقویت شده با روکش پلیمری مستطیلی تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها در یک سامانه آزمایشی که تصویر آن در



شکل ۱- تصویر سامانه انفجار مخلوط گازها جهت تحلیل تجربی

با توجه به توضیحات ارائه شده و مطابق با جدول ۲، ۲۰ ساختار دولایه فلز-پلیمری در چهار گروه بندی E، F، G و H به منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با روکش پلی‌اوره در برابر بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها طراحی و ساخته شده‌اند.

لازم به توضیح است که در این ساختارها، لایه جلویی و عقبی به ترتیب از جنس ورق آلومینیومی و ماده پلیمری پلی‌اوره در نظر گرفته شده و هر گروه آزمایشی تحت پنج بارگذاری با فشارهای قبل از انفجار متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. شایان توجه است که در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام گرفته بر میزان اثربخشی افزایش ضخامت لایه فلزی و پلیمری بر مقاومت دینامیکی ساختار دولایه فلز-پلیمری و افزایش آستانه تحمل بار دفعی ورق‌های آلومینیومی است. نمونه‌ای از ساختارهای دولایه فلز-پلیمری ساخته شده قبل از انجام آزمایش، در شکل ۲ نشان داده شده است.

نگه‌دارنده جلویی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس آلیاژ آلومینیوم (Al-1100) در ضخامت‌های ۱ و ۲ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد ۳۹۰×۳۴۵ میلی‌متر مربع برش زده شدند. در این تحقیق همچنین از روکش پلیمری پلی‌اوره جهت بهبود مقاومت و تقویت ورق‌های آلومینیومی در برابر بار انفجاری استفاده شده که از شرکت سپنتا سروین سازه پارس تهیه شده است. مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۱ داده شده است [۲۹-۳۱].

جدول ۱- خواص مکانیکی مواد

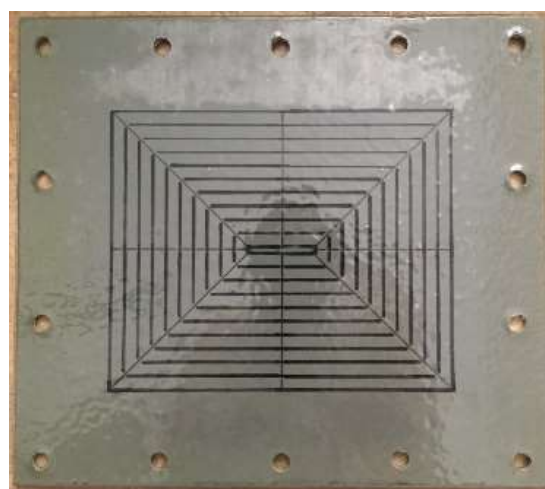
ماده	ضخامت (mm)	چگالی (kg/m ³)	تنش تسلیم (MPa)
آلومینیوم	۲،۱	۲۷۰۰	۱۱۹
پلی‌اوره	۴،۳	۹۵۰	۱۶/۲

جدول ۲- گروه‌بندی نمونه‌های آزمایشی

شماتیک ساختار	گروه آزمایشی	ضخامت لایه جلویی (mm)	ضخامت لایه عقبی (mm)
	E-AI-1-PU-3	۱	۳
	F-AI-1-PU-4	۱	۴
	G-AI-2-PU-3	۲	۳
	H-AI-2-PU-4	۲	۴

جدول ۳- نتایج کارهای تجربی

شماره آزمایش	ایمپالس (N·s)	فشار اکسیژن (bar)	فشار استیلن (bar)	بیشترین خیز دائمی (mm)
E-1	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۳۴/۲
E-2	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۴۷/۴
E-3	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	پارگی
E-4	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	پارگی
E-5	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
F-6	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۳۰/۱
F-7	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۴۲/۱
F-8	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۴۸/۱
F-9	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	پارگی
F-10	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
G-11	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۲۱/۹
G-12	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۳۰/۷
G-13	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۵/۵
G-14	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۶/۸
G-15	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
H-16	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۱۹/۸
H-17	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۲۷/۳
H-18	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۱/۸
H-19	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۱/۸
H-20	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	۴۸/۳



شکل ۲- نمونه‌ای از ساختار دولایه فلز-پلیمری E-AI-1-PU-3 قبل از انجام آزمایش

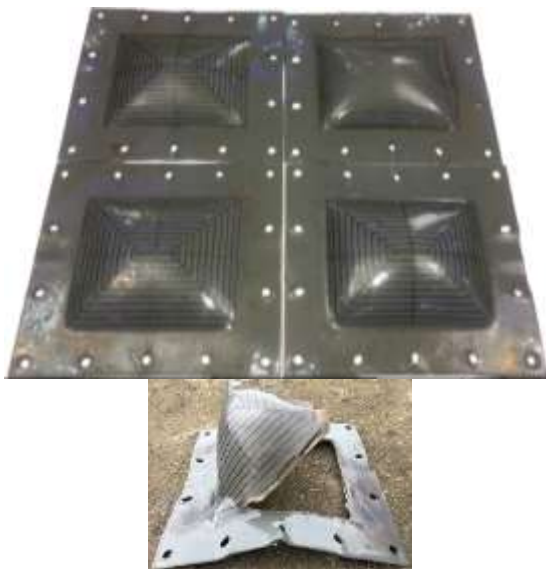
۳- بحث و بررسی نتایج تجربی

در جدول ۳، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری ارائه شده است. در این جدول مقادیر میانگین ایمپالس برای آزمایش‌هایی که در آن میزان بارگذاری (مقادیر پیش فشار) یکسان بوده، محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام‌گرفته روی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری، نشان دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با روکش پلیمری پلی‌اوره تحت بار دفعی حاصل از انفجار

مخلوط گازها است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق آلومینیومی و روکش پلیمری و تغییرات مقدار ایمپالس یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی شده است. شایان توجه است که هدف از انجام این سری از آزمایش‌ها، پیش‌گیری از پارگی

شکل ۳ نشان می‌دهد: (۱) ناحیه دومی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند (۲) سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند (۳) نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار مشابه با ورق‌های تک‌لایه و دولایه مشهود است و این نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است (۴) لولاهای پلاستیک در امتداد خط‌های قطری کشیده شده روی نمونه از گوشه‌های ساختار تا مرکز آن گسترش می‌یابد. اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای دولایه فلز-پلیمری به تحلیل نتایج تجربی کمی به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود. به همین منظور در شکل ۴، نمودار لگاریتمی تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با روکش پلیمری پلی‌اوره برحسب ایمپالس، نمایش داده شده است.

در این نمودار، برای بیان رابطه بین بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز-پلیمری و ایمپالس در هر مجموعه آزمایشی از توابع توانی استفاده شده است تا بتوان با ترسیم آن‌ها در نمودار لگاریتمی، شیب نمودار را به دست آورد. نتایج مربوط به این بحث در جدول ۴ ارائه شده است.

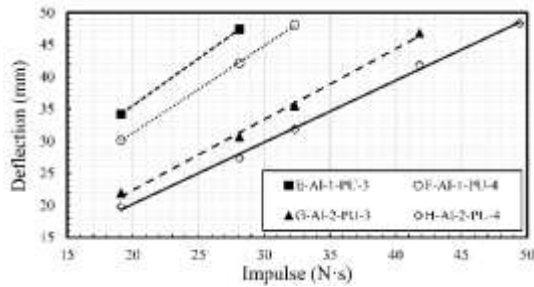


شکل ۳- نمونه‌ای از ساختارهای دولایه فلز-پلیمری تغییر شکل یافته

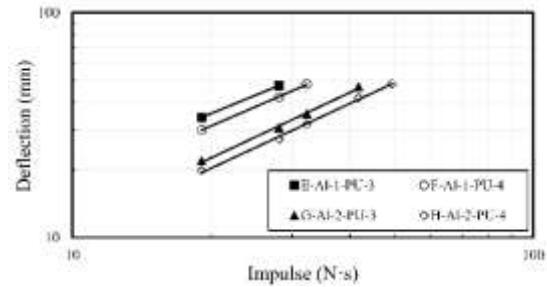
ورق‌های نازک آلومینیومی با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر به ترتیب در ایمپالس‌های بیشتر از $13/4 N\cdot s$ و $32/7 N\cdot s$ است (برای درک بهتر موضوع به نتایج تجربی موجود در مرجع [۲۹ و ۳۰] مراجعه شود). از دیگر اهداف این بخش، می‌توان به تلاش برای بالا بردن آستانه تحمل ورق آلومینیومی در برابر بار دفعی اشاره کرد. لازم به توضیح است که در این جدول، برای هر آزمایش، مقدار ایمپالس با انتگرال‌گیری عددی از منحنی فشار-زمان به‌دست آمده است.

در این قسمت از تحقیق، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند، افزایش میزان ایمپالس، افزایش ضخامت ورق آلومینیومی و روکش پلیمری پلی‌اوره بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز-پلیمری، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز-پلیمری تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها نشان می‌دهد که در طول ۲۰ آزمایش، تمامی ساختارها به‌غیر از ۶ نمونه شامل، E-4، E-3، E-5، F-9، F-10 و G-15، سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز-پلیمری در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل ورق آلومینیومی تقویت شده با روکش پلی‌اوره نیز، به‌صورت دومی شکل یا محدب بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولیدشده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح ساختار دولایه فلز-پلیمری وارد می‌شود. شایان توجه است که در نمونه‌های پاره نشده، هیچ‌گونه جدایشی بین روکش پلیمری و ورق آلومینیومی مشاهده نشد و بدان علت است که هنگام تهیه نمونه‌ها، خراش‌هایی روی ورق‌های آلومینیومی (فرآیند اچ‌اینگ) جهت چسبیدن کامل روکش پلیمری ایجاد شده بود. با توجه به توضیحات ارائه شده، در این نمونه‌ها انرژی قابل‌توجه انفجار مخلوط گاز توسط ورق و روکش پلیمری به‌صورت هم‌زمان جذب و تغییر شکل دائمی ساختار رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روکش پلی‌اوره، به‌عنوان یک‌لایه تقویت‌کننده تأثیر چشم‌گیری در بالا بردن آستانه تحمل این ورق‌ها در برابر بار دفعی دارد. به‌طورکلی



شکل ۵- تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب ایمپالس



شکل ۴- نمودار لگاریتمی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب ایمپالس

جدول ۵- منحنی‌های درجه اول برازش شده

R^2	منحنی برازش شده	مشخصات آزمایش
۱	$W_0 = 1.47I + 6.19$	E-AI-1-PU-3
۰/۹۹۹	$W_0 = 1.36I + 4.09$	F-AI-1-PU-4
۰/۹۹۷	$W_0 = 1.10I + 0.39$	G-AI-2-PU-3
۰/۹۹۸	$W_0 = 0.96I + 0.98$	H-AI-2-PU-4

جدول ۴- منحنی‌های توانی برازش شده

R^2	منحنی برازش شده	مشخصات آزمایش
۱	$W_0 = 2.83I^{0.85}$	E-AI-1-PU-3
۰/۹۹۹	$W_0 = 2.19I^{0.89}$	F-AI-1-PU-4
۰/۹۹۶	$W_0 = 1.25I^{0.97}$	G-AI-2-PU-3
۰/۹۹۶	$W_0 = 1.16I^{0.96}$	H-AI-2-PU-4

انفجار مخلوط گازها برخلاف ساختارهای تک‌لایه این بود که تغییر شکل پلاستیک این ساختارها در دو مرحله با نرخ‌های افزایشی مختلف رخ می‌دهد؛ لذا به‌منظور بررسی این موضوع، مقادیر بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب میزان ایمپالس بار وارده در شکل ۵ رسم شده است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در این ساختارها، مطابق با نمونه‌های تک و دولایه، ایمپالس و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی دارند. لازم به توضیح است که رفتار نمونه‌های دولایه فلز-پلیمری مشابه با ورق‌های تک‌لایه و برخلاف ساختارهای دولایه است، یعنی؛ تغییر شکل پلاستیک به‌صورت تک‌مرحله‌ای افزایش می‌یابد؛ همچنین در این نمودار، مقادیر خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب ایمپالس برای گروه‌های آزمایشی مختلف به‌صورت منحنی درجه‌یک برازش شده‌اند. توابع برازش در جدول ۵ بیان شده است. به‌طور مشابه، با توجه به اینکه در گروه‌های آزمایشی E-AI-1-PU-3 و F-AI-1-PU-4 تعداد داده‌های تجربی برابر با ۳ یا کمتر از آن است، لذا

در شکل ۴، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری با بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴ برای مقادیر مختلف شیب در مجموعه‌های آزمایشی این تحقیق، نشان‌دهنده آن است که این مقادیر در منحنی‌های برازش شده بسیار به ۱ نزدیک بوده و مشابه با ساختارهای تک و دولایه [۲۹-۳۱]، در ساختارهای دولایه فلز-پلیمری نیز انرژی کرنشی غشایی، نقش بسیار کلیدی را بازی می‌کند و می‌توان از انرژی کرنشی خمشی در مدل‌سازی تحلیلی صرف‌نظر کرد. شایان ذکر است که در گروه‌های آزمایشی E-AI-1-PU-3 و F-AI-1-PU-4، با توجه به اینکه تعداد داده‌های تجربی برابر با ۳ یا کمتر از آن است، لذا نمی‌توان به منحنی‌های برازش شده اطمینان زیادی داشت. این در صورتی است که در گروه آزمایشی H-AI-2-PU-4، با ۵ داده تجربی توان به‌دست‌آمده تقریباً برابر با ۱ است و ادعای مذکور در سطرهای بالاتر را کاملاً اثبات می‌کند. همان‌طور که در تحقیقات پیشین [۲۹-۳۱] ذکر شد، یکی از نکات جالب در رفتار ساختارهای دولایه تحت بار

ورق‌های آلومینیومی با ضخامت ۱ [۲۹ و ۳۰]، استفاده از روکش پلیمری ۳ و ۴ میلی‌متری، به ترتیب موجب ۲/۱ و ۲/۴ برابر کردن آستانه تحمل بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها شده است. به‌منظور درک بهتر اثر چگالی سطحی بر مقاومت ساختارهای دولایه فلز-پلیمری تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی این ساختارها برحسب چگالی سطحی در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش چگالی سطحی نمونه، باعث کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک در هر شرایط بارگذاری می‌شود.

به‌طور مثال، برای هنگامی‌که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار $P_{O_2} = 0.2 \text{ bar}$ و $P_{C_2H_2} = 0.15 \text{ bar}$ قرار دارند، با تغییر چگالی سطحی از $6/0 \text{ kg/m}^2$ به $7/1 \text{ kg/m}^2$ ، خیز دائمی ساختار از $34/2$ میلی‌متر به $30/1$ میلی‌متر کاهش می‌یابد. این بدان معناست که شیب کاهشی خیز دائمی ساختار برحسب چگالی سطحی در مرحله اول $2/69 \text{ mm}^2/\text{kg}$ است. لازم به توضیح است که این شیب کاهشی برای مراحل دوم و سوم یعنی زمانی که چگالی سطحی به ترتیب از $7/1 \text{ kg/m}^2$ به $8/7 \text{ kg/m}^2$ و از $8/7 \text{ kg/m}^2$ به $9/8 \text{ kg/m}^2$ تغییر می‌کند، برابر است با $5/16 \text{ mm}^2/\text{kg}$ و $1/89 \text{ mm}^2/\text{kg}$ ؛ همچنین برای هنگامی‌که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار $P_{O_2} = 0.3 \text{ bar}$ و $P_{C_2H_2} = 0.25 \text{ bar}$ قرار دارند، این مقادیر به ترتیب برابر است با $4/77 \text{ mm}^2/\text{kg}$ و $7/76 \text{ mm}^2/\text{kg}$. شایان توجه است که در ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برخلاف نمونه‌های دولایه این شیب کاهشی از روندی منطقی پیروی نمی‌کند و کمترین میزان شیب را در تمامی گروه‌ها در مرحله دوم داراست.

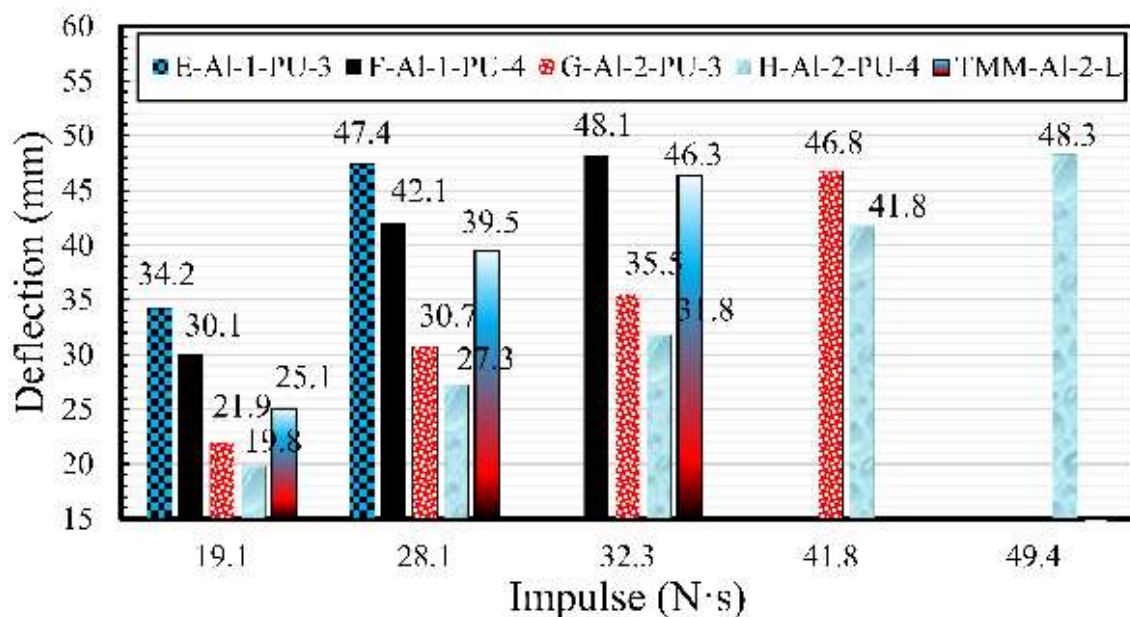
۴- نتیجه‌گیری

روش انفجار مخلوط گازها به‌عنوان روش مناسب برای تولید انرژی با نرخ بسیار بالا، مسیری جهت مطالعه و بررسی عملکرد این روش در فرآیند شکل‌دهی ورق، انبساط لوله‌ها و تراکم دینامیکی پودر فراهم کرده است. در این روش از اختلاط دو گاز اکسیژن و استیلن در یک محفظه احتراق

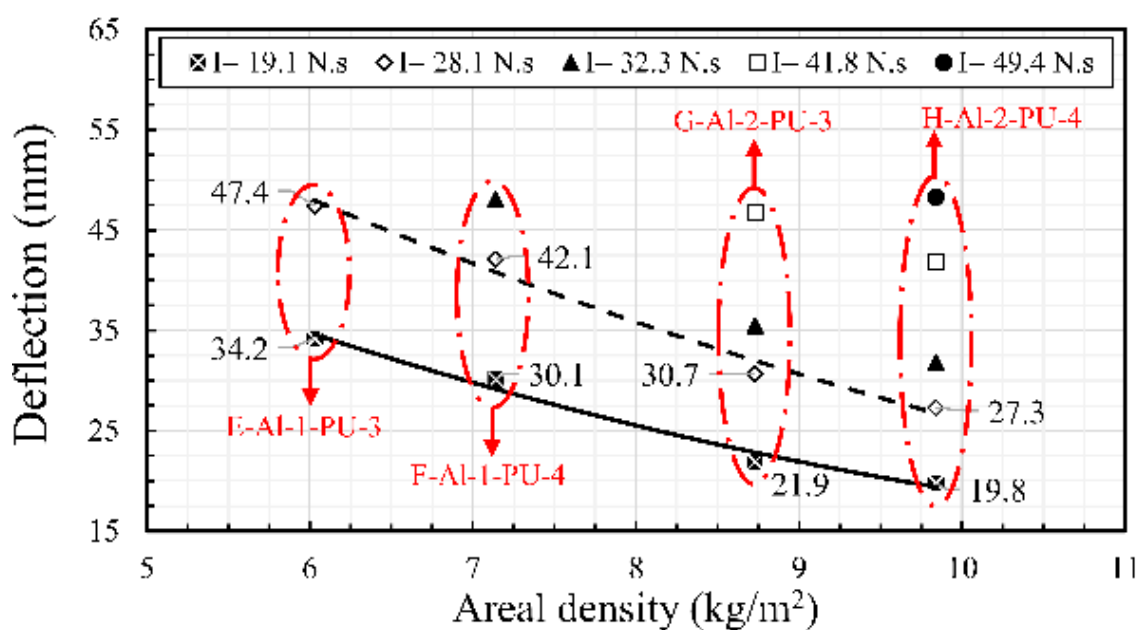
نمی‌توان به منحنی‌های برآزش شده برای این دو گروه اطمینان زیادی داشت.

به‌منظور درک و توضیح بهتر میزان اثربخشی، استفاده از روکش پلیمری و تغییر ضخامت آن بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز-پلیمری، در شکل ۶، نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری و ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی برحسب ایمپالس نمایش داده شده است.

مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی E-Al-1-PU-3 و F-Al-1-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با ورق آلومینیومی ۱ میلی‌متر [۲۹ و ۳۰] به میزان ۱۱/۹٪ و ۱۱/۱٪ به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی E-Al-1-PU-3 و G-Al-2-PU-3 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۳ میلی‌متر به میزان ۳۵/۹٪ و ۳۵/۲٪ به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی G-Al-2-PU-3 و H-Al-2-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متر به میزان ۹/۶٪، ۱۱/۱٪، ۱۰/۴٪ و ۱۰/۷٪ به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $41/8 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی F-Al-1-PU-4 و H-Al-2-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۴ میلی‌متر به میزان ۳۴/۲٪، ۳۵/۲٪ و ۳۳/۹٪ به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان ۱۲/۷٪ و ۲۱/۱٪ در ایمپالس $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، ۲۲/۲٪ و ۳۰/۹٪ در ایمپالس $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و در نهایت ۲۳/۳٪ و ۳۱/۳٪ در ایمپالس $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$ شده است. لازم به توضیح است که برای



شکل ۶- نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب ایمپالس



شکل ۷- تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب چگالی سطحی

برای تولید انرژی با نرخ بالا، می‌توان به افزایش ایمنی و بازدهی بار انفجاری، کاهش صدا، در دسترس بودن منبع انرژی و انجام آن در محیط‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. در مطالعه حاضر، تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق‌های نازک

استفاده می‌شود. با به‌کارگیری یک سیستم جرعه زن، مخلوط گاز منفجرشده و موج شوک تولیدی در طول محفظه احتراق حرکت می‌کند و در نهایت موجب تغییر شکل نمونه می‌شود. از مزیت‌های این روش نسبت به استفاده از خرج‌های انفجاری

به ضخامت ۴ میلی‌متر به میزان ۳۴/۲٪، ۳۵/۲٪ و ۳۳/۹٪ به ترتیب در ایمپالس‌های N-s ۱۹/۱، N-s ۲۸/۱ و N-s ۳۲/۳ شد.

(۵) افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان ۱۲/۷٪ و ۲۱/۱٪ در ایمپالس N-s ۱۹/۱، ۲۲/۲٪ و ۳۰/۹٪ در ایمپالس N-s ۲۸/۱ و در نهایت ۳۳/۳٪ و ۳۱/۳٪ در ایمپالس N-s ۳۲/۳ شد.

(۶) برای ورق‌های آلومینیومی با ضخامت ۱ میلی‌متر، استفاده از روکش پلیمری ۳ و ۴ میلی‌متری، به ترتیب موجب ۲/۱ و ۲/۴ برابر کردن آستانه تحمل بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها شد.

۵- مراجع

- [1] Jones N (2010) Inelastic response of structures due to large impact and blast loadings. *J Strain Anal Eng Des* 45(6): 451-464.
- [2] Babaei H, Darvizeh A (2010) Experimental and analytical investigation of large deformation of thin circular plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Mech Based Des Struc* 38(2) : 171-189.
- [3] Babaei H, Darvizeh A (2011) Investigation into the Response of Fully Clamped Circular Steel, Copper, and Aluminum Plates Subjected to Shock Loading. *Mech Based Des Struc* 39(4): 507-526.
- [4] Micallef K, Fallah AS, Pope DJ, Louca LA (2013) Dynamic performance of simply supported rigid plastic circular thick steel plates subjected to localized blast loading. *J Eng Mech* 140(1): 159-171.
- [5] Jones N (2014) Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. *Int J Impact Eng* 74: 3-15.
- [6] Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaei Mostofi T (2015) Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. *Journal of Modares Mechanical Engineering* 15(2): 305-312 (In Persian).
- [7] Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. *Journal of Modares Mechanical Engineering* 15(4): 361-368. (In Persian).

آلومینیومی تقویت‌شده با روکش پلیمری پلی‌اوره تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به صورت تجربی، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر پارامترهایی مانند، جنس ماده، لایه‌بندی‌های مختلف در ساختارهای دولایه فلز-پلیمری و میزان انرژی وارده یا همان ایمپالس بر تغییر شکل پلاستیک ساختار بررسی شد. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از کارهای آزمایشگاهی تحقیق حاضر به صورت زیر خلاصه می‌شود:

(۱) در این نمونه‌ها نیز مشابه با ساختارهای تک‌لایه و دولایه، پروفیل تغییر شکل پلاستیک نمونه به صورت دومی شکل بود.

(۲) برخلاف ساختارهای دولایه و مشابه با ساختارهای تک‌لایه، با افزایش میزان بار اعمالی، بیشترین خیز دائمی نمونه دولایه فلز-پلیمری به صورت تک‌مرحله‌ای افزایش یافت.

(۳) مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی E-Al-1-PU-3 و F-Al-1-PU-4 نشان داد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با ورق آلومینیومی ۱ میلی‌متر به میزان ۱۱/۹٪ و ۱۱/۱٪ به ترتیب در ایمپالس‌های N-s ۱۹/۱ و N-s ۲۸/۱ شد. در دو لایه‌بندی E-Al-1-PU-3 و G-Al-2-PU-3، افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۳ میلی‌متر به میزان ۳۵/۹٪ و ۳۵/۲٪ به ترتیب در ایمپالس‌های N-s ۱۹/۱ و N-s ۲۸/۱ شد.

(۴) مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی G-Al-2-PU-3 و H-Al-2-PU-4 نشان داد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متر به میزان ۹/۶٪، ۱۱/۱٪، ۱۰/۴٪ و ۱۰/۷٪ به ترتیب در ایمپالس‌های N-s ۱۹/۱، N-s ۲۸/۱ و N-s ۳۲/۳ شد. در دو لایه‌بندی F-Al-1-PU-4 و H-Al-2-PU-4، افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری

- [19] Kleiner M, Hermes M, Weber M, Olivier H, Gershteyn G, Bach FW, Brosius A (2007) Tube expansion by gas detonation. *Product Eng* 1(1): 9-17.
- [20] Meybodi MK, Bisadi H (2009) Gas Detonation Forming by a Mixture of H₂+ O₂ Detonation. *World Acad Sci Eng Tech* 33: 55-58.
- [21] Meybodi MK, Aghazadeh BS, Bisadi H (2013) Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming. *Int J Mech Mechatron Eng* 7: 1748-1754.
- [22] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH (2015) Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Struct Eng Mech* 56(4): 535-548.
- [23] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2015) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci* 0954406215614336.
- [24] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Darvizeh A (2016) Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Exp Tech* 40(6): 1485-1494.
- [25] Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K (2017) Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Tech* 315: 171-81.
- [26] Patil SP, Popli M, Jenkoug V, Markert B (2016) Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal forming. *J Phys Conf Ser* 2016;734(3): 032099.
- [27] V. Jenkoug, S. Patil, and B. Markert (2016) Joining of tubes by gas detonation forming. *J Phys Conf Ser* 734(3): 032101.
- [28] Patil SP, Prajapati KG, Jenkoug V, Olivier H, Markert B (2017) Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process. *Metals* 7(12): 556-572.
- [29] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin Walled Struct* 2017;118:1-11.
- [30] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain* 53(4): e12235.
- [31] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-
- [8] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Geomech Eng* 9(2): 207-218.
- [9] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2016) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420716654195.
- [10] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Struct* 109: 367-376.
- [11] Remennikov A, Ngo T, Mohotti D, Uy B, Netherton M (2017) Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges. *Int J Impact Eng* 101: 78-89.
- [12] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E J Process MechEng* 231(5): 939-950.
- [13] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng* 231(3):490-496.
- [14] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) 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 Struct* 123: 48-56.
- [15] Rezasafat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2018) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420718760640.
- [16] Honda A, Suzuki M (1999) Sheet metal forming by using gas imploding detonation. *J Mater Process Tech* 85(1-3): 198- 203.
- [17] Yaşar M (2004) Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction. *J Mater Process Tech* 150(3): 270- 279.
- [18] Yaşar M, Demirci HI, Kadi I (2006) Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling. *Mater Des* 27(5): 397-404

- pressure-pulse experiments. *Mech Mater* 42(6): 615-627.
- [35] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) 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 Struct* 107: 257-265.
- [36] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) 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 Struct* 112: 118-24.
- layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *Int J Impact Eng* 125: 93-106.
- [32] Amini MR, Isaacs JB, Nemat-Nasser S (2010) Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. *Int J Impact Eng* 37(1): 82-89.
- [33] Amini MR, Isaacs JB, Nemat-Nasser S (2010) Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments. *Mech Mater* 42(6): 628-639.
- [34] Amini MR, Simon J, Nemat-Nasser S (2010) Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct