

شکل‌دهی ناگهانی ورق‌های آلومینیومی و فولادی در بستر سیال آب و هوا

حسین تقی پور^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱-/ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱-/ واژگان کلیدی: شکل‌دهی ناگهانی، انتشار موج، سیال واسط، ورق آلومینیوم، بررسی تجربی.	فرایند شکل‌دهی انفجاری ورق به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و سریع در شکل‌دهی قطعات فلزی، توجه بسیاری از محققان و صنایع را به خود جلب کرده است. این روش با استفاده از انرژی موج‌های انفجاری، امکان شکل‌دهی ورق‌های فلزی را با کاهش چشمگیر هزینه و زمان تولید فراهم می‌کند. در این پژوهش، تولید قطعات عدسی‌شکل با استفاده از این فرایند به‌طور جامع بررسی و تحلیل شده است. برای اجرای آزمایش‌ها، از ورق‌های آلایژی آلومینیوم (AL5010) و فولاد (St37) با ضخامت یک میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر همراه با ماده منفجره PETN استفاده شد. طراحی آزمایش‌ها شامل بررسی تأثیر سه عامل کلیدی، یعنی جنس ورق، نوع سیال واسط (آب و هوا) و فاصله ماده منفجره از سطح ورق بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که کاهش فاصله ماده منفجره از ۶ به ۵ میلی‌متر، قدرت موج انفجار را ۵۸.۲ درصد افزایش می‌دهد. کاهش این فاصله به ۳ میلی‌متر، قدرت موج را تا ۸۶۳ درصد افزایش داد که نشان‌دهنده امکان بهبود قدرت موج انفجار تا ۹ برابر با کاهش فاصله است. بررسی‌های کیفی نیز نشان داد که استفاده از آب به‌عنوان سیال واسط به‌طور قابل‌توجهی کیفیت سطح قطعات شکل‌داده‌شده را در مقایسه با استفاده از هوا افزایش می‌دهد. این به دلیل ویژگی تراکم‌ناپذیری آب است که باعث انتقال یکنواخت‌تر موج انفجار به سطح ورق می‌شود. همچنین، مقایسه بین ورق‌های آلومینیومی و فولادی نشان داد که ورق‌های آلومینیومی خیز و تغییر شکل بیشتری نسبت به ورق‌های فولادی دارند، که این امر به خواص مکانیکی و متالورژیکی این مواد مرتبط است. این یافته‌ها تأثیر بسزایی در ارتقای دانش علمی و عملی در حوزه شکل‌دهی انفجاری دارد و پتانسیل این روش را برای تولید قطعات با کیفیت سطح بالا و کارایی بیشتر در صنایع مختلف نشان می‌دهد.

^۱ استادیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، ایران. H.taghipoor@velayat.ac.ir

۱. مقدمه

استفاده از انرژی موج‌های انفجاری در شکل دهی، اتصال، ساخت و تصحیح ابعادی قطعات در صنایع هوافضا کاربرد گسترده‌ای یافته است. در کنار روش‌های معمول شکل دهی فلزات، یک سری از روش‌ها به انرژی بالایی برای شکل دادن نیاز دارند. که اصطلاحاً به این روش‌ها، روش‌های شکل دهی با نرخ انرژی بالا گفته می‌شود. شکل دهی انفجاری نیز جزو روش‌های شکل دهی با نرخ انرژی بالا می‌باشد که منبع تامین کننده انرژی آن ماده منفجره می‌باشد. کاربرد وسیع پوسته‌ها با اشکال مختلف با دقت‌های ابعادی گوناگون، شناخت روش‌های مختلف شکل دهی پوسته‌ها را ضروری ساخته است. جدا از کاربرد پوسته‌ها در صنایع مختلف، پوسته‌های استوانه‌ای که در صنایع هوافضا کاربرد دارند، به دلیل داشتن اشکال نسبتاً پیچیده و تلورانس‌های بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. که اغلب برای شکل دادن این پوسته‌های استوانه‌ای، از روش‌های شکل دهی با نرخ انرژی بالا مثل شکل دهی انفجاری استفاده می‌شود [۱ و ۲]. در جریان جنگ جهانی دوم تیلور^۲، هودسون^۳، ریچاردسون^۴ و کیرک وود^۵، اولین محققینی بودند که در زمینه اثر بارهای دینامیکی بر روی رفتار صفحات فلزی نازک مطالعاتی انجام دادند. گریفیث^۶ و ونزنت^۷ گزارش داده‌اند که ظرفیت حمل بار دینامیکی ورق بزرگتر از حالت استاتیکی می‌باشد. نتیجه کار آنها نشان داد که در حالت بارگذاری دینامیکی المان‌های ورق تمایل به حرکت عرضی داشته و همچنین در معرض کرنش‌های محیطی کوچکتری نسبت به حالت استاتیکی قرار می‌گیرند. هاپکینز و پرگر اثر پالس مربعی را بر صفحه‌ای با مهار ساده مورد مطالعه قرار دادند [۳]. اهمی و همکاران [۴]، نشان دادند که فرم‌پذیری ورق‌های فولادی در شکل دهی انفجاری به طور مطلوبی متاثر از میزان فشار انفجار می‌باشد. همچنین بهرا [۵]، گزارش کرده است که قابلیت فرم‌پذیری آلومینیوم و فولاد با یازده درصد کرنش با افزایش دمای عملیات انفجاری افزایش

می‌یابد. پیکریشویلی و همکاران [۶]، اذعان نموده است که پیش گرم نمودن آلیاژهای WC-CO (سمانتید کاربرد) قبل از شکل دهی انفجاری سبب کاهش میزان ترک خوردن آنها در جریان عملیات شکل دهی می‌گردد. تحقیق گزیید و همکاران [۷]، بر روی مس خالص نشان داده است که اندازه دانه در عملیات شکل دهی انفجاری تاثیر کمتری در قیاس با فرآیندهای استاتیکی دارد. مهدی ظهور و کریمی [۸]، مطالعه بر روی شبیه سازی شکل دهی انفجاری ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم را انجام دادند و دریافتند که با توجه به اینکه برای هر ضخامت فرایند شکل دهی در حدود ۲۵۰ ثانیه به اتمام رسیده است می‌توان گفت فقط موج شوک اولیه ناشی از انفجار در برخورد با ورق عامل اصلی تغییر شکل بوده و موج‌های ثانویه ناشی از انبساط، انقباض و برخورد حباب‌های گازی ایجاد شده در انفجار نقشی در عملیات شکل دهی نداشته‌اند.

مهدی ظهور و رضوانی [۹]، مطالعه بر روی اندازه‌گیری تغییرشکل صفحات فولادی مدور به روش شکل دهی انفجاری برای مقاوم سازی درپچه‌های مدور در برابر بارگذاری انفجاری را انجام دادند و در این تحقیق از یک سری روابط تئوریک و تجربی استفاده کردند و آزمایشهایی روی صفحه فولادی St37 مدور انجام دادند و تغییرشکل قطعه را اندازه‌گیری کردند و از ماده منفجره C4 با جرم‌های متفاوت در فواصل مختلف استفاده نمودند در پایان نتایج تجربی بدست آمده را با نتایج تئوری سایر محققان مقایسه کرده‌اند.

ویجایادونگا^۸ و وب^۹ [۱۰]، کار بر روی تغییرشکل تجربی و شبیه سازی المان محدود شکل دهی انفجاری یک فنجان چهارگوش صفحه برنجی با ماده منفجره را انجام دادند و دریافتند که روش پیشرفته شبیه سازی تست‌های آزمایشی کشش عمیق در اثر ضربه زیر آب در صورت نبود پیچ اتصال باعث ناپایداری قطعه و ناهمواری ضخامت مواد در سرتاسر ناحیه شکل داده شده و در نتیجه باعث تخریب و شکست آن می‌شود.

هابسون و امینی از طراحی یک ماشین شکل دهی انفجاری که مناسب انجام عملیات در یک کارگاه معمولی

² -Taylor

³ -Hudson

⁴ -J.M.Richardson

⁵ -J.G.Kirkwood

⁶ -Griffith

⁷ -Vanzant

⁸ V.N. Wijayathunga

⁹ Webb

می باشد خبر دادند این ماشین مجهز به وسایل اندازه گیری متعدد می باشد [۱۱]. اندازه گیری فشار گذاری انفجار با استفاده از مبدلهای پیزو - الکترونیک از نوع کریستال کوارتز صورت می پذیرفت و این به دلیل این بود که فرکانس طبیعی سیستم اندازه گیری بایستی بیشتر از معکوس زمان برقراری موج شوک در یک نقطه بخصوص باشد، معمولاً این مقدار زمان برقراری شوک در حدود ۱۰۰ میکرو ثانیه می باشد که در نتیجه پاسخ طبیعی سیستم اندازه گیری می بایستی از ۱۰ کیلو سیکل بر ثانیه بیشتر باشد و این تنها با استفاده از پیزوالکترونیک از نوع کریستال کوارتز میسر است. کریستسکو^{۱۰} تجربیاتی بر روی ورق های کربن متوسط با ضخامت ۰.۰۳۶ اینچ انجام دادند و گراف هایی در خصوص توزیع کرانش محیطی و شعاعی و ضخامتی بدست آوردند [۱۲]. شکل دهی انفجاری مخروط های مدور بوسیله تاردیف و ترویس و جانسون^{۱۱} انجام شد [۱۳، ۱۴]. در کار ترویس و جانسون تاثیر مقدار شارژ، فاصله استقرار و میزان خلاء بر پروفیل نهایی تغییر شکل و کرنش مورد بررسی قرار گرفته شده است. ورقهایی از جنس فولاد متوسط کربن و آلومینیوم و قالب های مخروطی با زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، درجه در این تجربیات مورد استفاده قرار گرفتند. در زاویه ۶۰ درجه پدیده چروکیدگی مشاهده می شود که البته در این تحقیقات مورد توجه قرار نگرفته است.

جهت شکل دهی پوسته های بزرگ بدون استفاده از قالب و سمبه روشی انفجاری موسوم به Plug-Cushion ابداع گشت که هدف اساسی از آن نیل به توزیع یکنواخت کرنش و همچنین کنترل پروفیل نهایی تغییر شکل در روش شکل دهی آزاد بود. در این روش، ورق قطعه کار با ورقه ای از جنس سرب پوشیده می شود که کار این ورقه سرب انتقال انرژی به قطعه کار می باشد. همچنین این روش عمق کشش بیشتری نسبت به سایر روش ها دارا می باشد. کرمی و جانسون از این روش جهت کشش عمیق فنجان های استوانه ای بطور موفق استفاده کردند [۱۵]. در برخی موارد در قسمت لبه این فنجان ها پدیده چروکیدگی مشاهده می شود.

تحلیل شکل دهی انفجاری ورق مدور به روش انرژی توسط جواب ور و حبیب پور انجام شد [۱۶]. در تحقیق آنها، ابتدا مقدار انرژی منتقله به یک ورق فلزی مدور، در اثر انفجار زیر آب یک خرج انفجاری متمرکز و مستقر در فاصله ای معین از سطح ورق، محاسبه شد. سپس، انرژی کرنش ناشی از تغییر شکل ورق به یک قطعه مخروطی برآورد شد. برای تحلیل پذیری مدل، سه فرض اساسی در نظر گرفته شده که عبارتند از: ثابت در نظر گرفتن ضخامت ورق قبل و بعد از تغییر شکل، عدم کرنش سختی ماده مورد استفاده برای قطعه کار و تغییرات خطی کرنش موثر. در نهایت، با مساوی قرار دادن انرژی دریافتی ورق، ناشی از انفجار و انرژی کرنش، مقدار ماده منفجره مورد نیاز برای عملیات شکل دهی انفجاری مخروط به دست می آید. علاوه بر این، آزمایشاتی در این زمینه طراحی و اجرا شده که نتایج حاصل از آن ها به همراه نتایج تجربی محققین دیگر با نتایج نظری به دست آمده از این تحقیق مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه ها توافقات نسبتاً خوبی را بین نتایج تحقیق آنها و نتایج تجربی نشان داد.

هاشمی و ساده [۱] در یک تحقیق روش جدیدی برای شکل دهی لوله آلومینیومی با انفجار مخلوط دو گاز هیدروژن و اکسیژن با نسبت اختلاط ۳۲٪ اکسیژن - ۶۸٪ هیدروژن بررسی کردند. به منظور ایجاد تغییر شکل پلاستیک لوله آلومینیومی AA6063 تحت اثر انرژی حاصل از شوک انفجاری یک مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. نتایج تجربی تحقیق آنها نشان داد که فشار اولیه گاز bar 12 بر اساس نسبت اختلاط ۳۲٪ اکسیژن - ۶۸٪ هیدروژن می تواند باعث شکل دهی کامل لوله متناسب مطابق با شکل قالب شود. فشار اولیه بالاتر منجر به ترکیدگی لوله قبل از رسیدن به دیواره قالب می شود. همچنین بهترین مکان برای جرقه زنی برای دستیابی به شکل دهی کامل وسط لوله می باشد. تعیین مقدار مواد منفجره در شکل دهی فلز توسط سانجیک و بولجان^{۱۲} انجام شد [۱۷]. در مطالعه ای آنها بدست آوردن جرم مورد نیاز مواد منفجره برای نیمکره با ضخامت دیواره های مختلف ارائه شد. نتایج کار آنها نشان داد استفاده از ۲۷۰ گرم مواد منفجره، خیز نیمکره ۵

¹⁰ Cristescu

¹¹ Corbett, 1964

نگهدارنده مناسب در زیر قالب جهت خروج موج انفجار (موج انفجار) جهت جلوگیری از تغییر شکل ثانویه استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد آزمون

برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری در سیال‌های آب و هوا، آزمون‌ها بر روی دو جنس مختلف (آلومینیوم و فولاد) انجام شد. برای تشخیص نوع آلیاژ بر روی آن تست کوانتومتری صورت پذیرفت. نتایج این آزمون در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به نتایج و با مراجعه به استاندارد مشخص گردید که آلیاژ مورد نظر از سری آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم با شماره شناسه AL5010 می‌باشد (جدول ۲). همچنین یک سری ورق دایروی از جنس فولاد St37 نیز تهیه گردید. در ادامه برای تعیین خصوصیات مکانیکی دو ماده مختلف، روی هر جنس سه نمونه تست کشش (دو تست کشش طولی و یک تست کشش عرضی) انجام گردید. همچنین میانگین نتایج این تستها در جدول ۳ آورده شده است.

میلی متری به دست آمد. در پایان گزارش کردند که تفاوت‌های زیادی در خیز اتفاق افتاده با میزان ماده منفجره وجود دارد و هیچ فرمول واحدی برای دسترسی به مقدار دقیق استفاده از ماده منفجره جهت دسترسی به خیزی مشخص وجود ندارد. در حین آزمایش، لازم است با کمترین مقدار مواد منفجره، فرآوری شروع شود و به تدریج آن را افزایش داد تا قطعه کار، ابزار و در نتیجه آزمایش، از بین نرود.

در این تحقیق فرایند شکل‌دهی انفجاری ورق‌ها و تولید قطعات عدسی شکل با این پروسه مورد بررسی و تحلیل واقع شده است. با انجام آزمایش‌های تجربی فرایند شکل‌دهی ورق با انفجار در سیال انجام شده و اثر پارامترهای مختلف در فرایند شکل‌گیری شامل نوع سیال واسط، فاصله مواد منفجره تا سطح ورق و جنس ورق مورد بررسی قرار گرفته است. ورق‌های مورد استفاده از جنس AL5010 و فولاد St37 با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر بوده، و از ماده منفجره PETN استفاده شده است. از نوآوری مطالعه حاضر می‌توان به استفاده از نوع ماده منفجره PETN و مقایسه نتایج آن با C4 اشاره کرد همچنین، استفاده از آب به عنوان سیال مورد نظر در داخل کفه رویی نگه دارنده و قرار دادن ماده منفجره نسبت به سطح ورق در بیرون از آب از نوآوری دیگر مطالعه حاضر است. در این مقاله از یک پایه

جدول ۱: درصد وزنی عناصر موجود در آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده (نتایج تست کوانتومتری)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sb	Ti
Percent	0.26	0.36	0.004	0.23	0.36	0.002	0.003	0.002	0.01	0.2

جدول ۲: درصد عناصر وزنی آلیاژ AL5010

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Eaach	Total Impurities
Min	0	0	0	0.1	0.2	0	0	0	0	0
Max	0.4	0.7	0.25	0.3	0.6	0.15	0.3	0.1	0.05	0.15

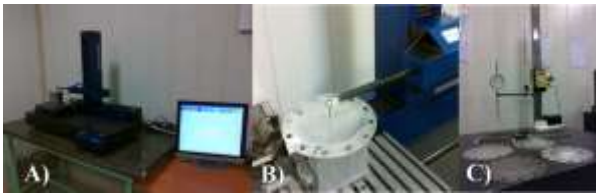
جدول ۳: خصوصیات مکانیکی آلیاژ AL5010 و فولاد St37

Material	σ_{proof} (Mpa)	σ_{UTS} (Mpa)	Elongation (%)	$\epsilon_{rupyure}$
Al 5010	Average	215	7.1	5.5
St37	Average	290	33	39

Pantasis ... متناسب با فرم شکل دهی انتخاب کرد، که در این مطالعه از نوع PETN استفاده شده است. این ماده منفجره، با وزن معادل ۱/۳۴ برابر وزن TNT نرم و

۲.۲. ماده منفجره

برای ایجاد بارگذاری انفجاری می‌توان از مواد منفجره مناسب اعم از C4، PETN، RDX، Tetryl،



شکل ۱: دستگاه‌های اندازه‌گیری (الف) Optacom، (ب) کلیس عمق سنج و (ج) کلیس دیجیتال اندازه‌گیری



شکل ۲: علامت گذاری ورق‌ها برای ایجاد سهولت در اندازه‌گیری مقادیر کرنش و تعیین پروفیل شکل نهایی ورق

۴.۲. قالب سیال واسط و شرایط آزمون

شکل‌دهی انفجاری می‌بایست در محیطی صورت گیرد که در آن محیط ماده‌ای به عنوان سیال واسط وظیفه انتقال موج انفجار از ماده منفجره به سطح ورق را به عهده دارد. در آزمون‌های انجام شده دو ماده به عنوان سیال واسط در نظر گرفته شده است، که شامل هوا و آب می‌باشد. از آنجایی که هوا نیاز به محلی به عنوان نگهدارنده ندارد لذا انفجار در سطح آزاد انجام شده است. ولی هنگامی که آب به عنوان سیال واسط در نظر گرفته شود می‌بایست آزمایش به شکلی صورت گیرد که سطح مورد نظر برای شکل‌دهی انفجاری در تماس با آب باشد و آب انتقال دهنده موج انفجار باشد، به همین منظور آب در داخل قالبی ریخته می‌شود. ابعاد قالب شامل لوله‌ای به قطر ۲۲۰ میلی‌متر و طول تقریبی ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۶۰ میلی‌متر می‌باشد، که از قسمت پایین لوله به ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و به قطر ۱۷۰ میلی‌متر داخل تراشی شده است. در نهایت آب‌بندی به وسیله اورینگ لاستیکی و چسب آکواریوم صورت می‌پذیرد.

جهت انجام تست با دقت بالا و جلوگیری از تخریب قالب، جنس قالب از فولاد نوع Cr Mo4 ۲۵ و با ضخامت ۶۰ سانتیمتر ساخته شده و سپس جهت ایجاد تمرکز موج

شکل پذیر است. برای انجام آزمون‌ها ابتدا ماده منفجره به کمک ترازوی الکتریکی و با دقت ۰/۱ گرم در مقادیر مورد نظر جدا گردید. سپس به کمک دست به صورت کروی درآورده شد و بر روی محور تقارن ورق‌های دایروی با فاصله‌های مختلف نصب گردید. برای تحریک ماده منفجره از چاشنی شماره ۸ و یک سوئیچ معمولی استفاده گردید. میزان موثر بودن یک انفجار به سطح زیر نمودار فشار-زمان، که به آن موج انفجار (موج انفجار) گفته می‌شود، بستگی دارد. میزان ضربه در واحد سطح بعد از گذشت زمان t از رسیدن جبهه موج شوک مطابق رابطه ۱ دست می‌آید:

$$I = \int_0^1 P(t) dt \quad (1)$$

۳.۲. ساخت نمونه‌ها

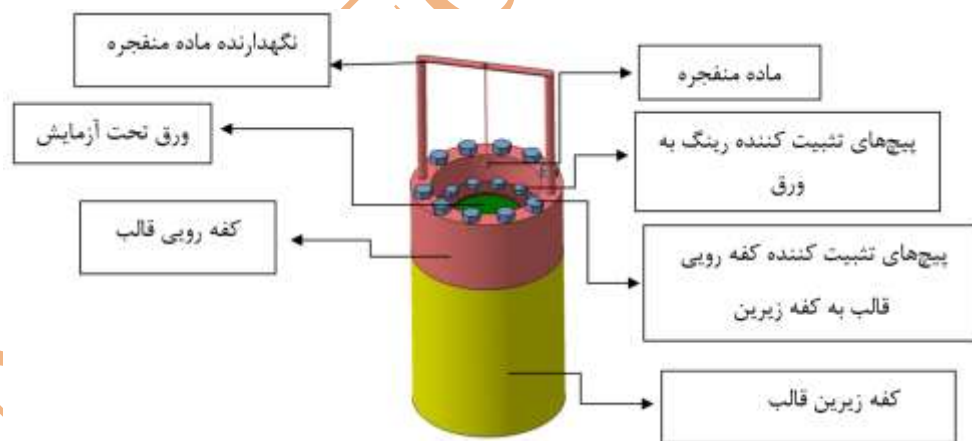
ورق‌های مورد آزمایش در ابعاد $\phi 160 \times 1mm$ ماشینکاری گردیدند. همچنین برای فراهم کردن شرایط کاملاً گیردار به عنوان شرط مرزی جای پیچ M10 نیز بر روی ورق‌ها تعبیه گردید. نمونه رینگ‌های نگهدارنده ورق‌های دایروی نیز ساخته شد. همچنین برای بدست آوردن میزان کرنش و مقدار خیز ورق در سطح خارجی ورق سه خط، هر یک با زاویه ۱۲۰ درجه رسم گردید و روی خطوط به فاصله ۱۵ میلی‌متر به وسیله سنبه حک نموده تا پس از انجام بارگذاری بوسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری Optacom، کلیس عمق سنج و کلیس دیجیتال که در شکل ۱ مشاهده می‌شود به راحتی اندازه‌گیری شوند. شکل ۲ نمونه ورق آماده آزمون را نشان می‌دهد. این فرایند اندازه‌گیری بر روی تمام نمونه‌ها انجام می‌شود.

انفجار و ریختن آب داخل آن استوانه‌ای فولادی همجنس با نگهدارنده بر روی آن تعبیه شده است. به منظور خروج هوا از داخل قالب از یک پایه فلزی استفاده شده است. قالب و نحوه قرارگیری ماده منفجره در شکل ۳ نشان داده شده است.

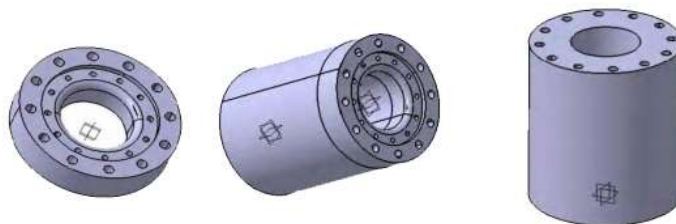
برای ایجاد شرایط مرزی مساله (کاملاً گیردار) و همچنین شبیه سازی سازه‌های دریایی می‌بایست شرایطی ایجاد می‌گشت که در هنگام بارگذاری پشت ورق هوا قرارداشته باشد. به همین منظور نمونه‌ها در دهانه محفظه‌ای بزرگ از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت دیواره ۶۰mm قرار گرفتند. برای ایجاد شرایط کاملاً گیردار از یک رینگ فولادی با ضخامت ۵mm و ۱۲ پیچ M۱۰ به همراه واشر فنری استفاده شد (شکل ۴). برای فرآیند شکل دهی انفجاری ورق بر روی قالب ابتدا ورق بر روی فیکسچر بوسیله پیچ تثبیت می‌شود. سپس ماده منفجره در ارتفاع معینی نسبت به قطعه کار قرار داده می‌شود. در پایان عملیات شکل دهی انجام می‌شود.

برای انجام بارگذاری‌های بر روی ورق‌های دایروی، دو پارامتر ماده منفجره شامل جرم ماده منفجره و میزان فاصله آن از ورق مورد بررسی قرار می‌گیرد. این فاصله بسیار حائز اهمیت است که به Stand Off معروف است و نقش مهمی در شکل دهی ورق دارد بطوریکه با افزایش و کاهش آن می‌توان به نتایج مناسب یا بالعکس آن دست یافت. در این مطالعه ۱۲ آزمایش انجام گردیده است. مرحله اول، ۱ عدد ورق آلومینیومی با ماده منفجره C4 در هوا و در مرحله دوم، ۴ عدد ورق آلومینیومی با ماده منفجره PETN در هوا و در مرحله سوم، ۴ عدد ورق فولادی با ماده منفجره PETN در هوا و در مرحله چهارم ۳ عدد ورق آلومینیومی با ماده منفجره PETN در آب انجام شده است. شرایط و پارامترهای تمامی آزمون‌های انجام شده بر روی ورق‌های آلومینیوم و فولاد در جدول ۴ آورده شده است. باید توجه داشت که روابط فشار بیشینه و مقدار ضربه برای ماده منفجره TNT می‌باشد و برای استفاده از این روابط در ابتدا باید مقدار ماده منفجره PETN را در ضریب تبدیل آن به TNT که برابر ۱/۳۴ می‌باشد ضرب کرد.

۵.۲. طراحی آزمایشات



شکل ۳: نحوه قرارگیری ماده منفجره



شکل ۴: قید طراحی شده برای دستگاه

جدول ۴: مشخصات تست‌های پیاده شده بر روی ورق‌های آلومینیوم و فولاد

شماره نمونه	جنس ورق	ضخامت ورق (mm)	نوع ماده منفجره	وزن ماده منفجره (kg)	شعاع ماده منفجره (m)	stand off (m)	سیال واسط
1	Al 5010	1	C4	0.01	0.01	0.03	هوا
2	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.03	هوا
3	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.06	هوا
4	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.1	هوا
5	St 37	1	PETN	0.001	0.004	0.08	هوا
6	St 37	1	PETN	0.001	0.004	0.07	هوا
7	St 37	1	PETN	0.001	0.004	0.05	هوا
8	St 37	1	PETN	0.001	0.004	0.03	هوا
9	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.08	هوا
10	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.08	آب
11	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.06	آب
12	Al 5010	1	PETN	0.001	0.004	0.03	آب

۳. بحث و نتیجه‌گیری

آزمون اول از ۱۰ گرم ماده منفجره C4 و در فاصله ۳ سانتیمتری و در سیال هوا انجام گرفت، قطعه نه تنها به فرم مورد نرسید، بلکه کاملاً تخریب گردید، علت این تخریب، وزن بالای ماده منفجره و فاصله کم مواد منفجره بود. نتایج آزمون نشان داد برای ورقی با ضخامت کم استفاده از ماده منفجره C4 مناسب نمی‌باشد. در مرحله دوم آزمون با ۱ گرم ماده منفجره PETN در فواصل ۳، ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتری با حضور سیال واسط هوا انجام گردید. نتایج نشان داد که ورق در فواصل ۳ و ۶ سانتیمتری دچار واماندگی (پارگی) شده و در فواصل ۸ و ۱۰ سانتیمتری نمونه مناسب تولید شد. در آزمون سوم ۱ گرم ماده منفجره PETN در فواصل ۳، ۵، ۷ و ۸ سانتیمتری در حضور سیال هوا انجام گرفت، نتایج نشان داد که هر ۴ قطعه بدون نقص تولید شدند اما نسبت به آلومینیوم تغییر شکل کمتری از خود نشان دادند. در نهایت آزمون چهارم با ۱ گرم ماده منفجره PETN در فواصل ۳، ۶ و ۸ سانتیمتری در حضور سیال آب انجام گرفت که نتیجه این شد که هر ۳ قطعه کاملاً سالم با کیفیت سطح بالاتر و یکنواخت‌تر، اما نسبت به آزمون‌های مشابه با حضور سیال هوا تغییر شکل‌شان کمتر بود، این نشان می‌دهند که آب باعث می‌شود موج انفجار (موج انفجار) بطور یکنواخت به سطح ورق رسیده و در نتیجه تغییر شکل براحتی انجام شود ولی در هوا موج انفجار

(موج انفجار) بطور آبی به سطح ورق رسیده و تغییر شکل ایجاد شده بیشتر و کیفیت سطح کمتری نسبت به آب ایجاد می‌نماید. نکته مهمی که از این آزمایش‌ها به دست آمد این بود که با توجه به نمودارهای (فشار - Stand Off و موج انفجار - Stand Off) فشار ایجاد شده در آب خیلی بیشتر از هوا بوده و علتش هم تراکم پذیر بودن موج در آب نسبت به هوا می‌باشد.

پس از بارگذاری نمونه‌ها مشخص گردید که سه نمونه، تحت شکست و پارگی قرار گرفته‌اند که اولی با ماده منفجره C4 به دلیل کم بودن فاصله ماده منفجره تا ورق (Stand-Off) و نیز زیاد بودن وزن ماده منفجره باعث تخریب ورق شده، که شکل ۵ مویید این مطلب است. از طرفی همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، نمونه دوم و سوم آزمایش با ماده منفجره PETN به دلیل کم بودن فاصله ماده منفجره باعث تخریب و شکستگی ورق شده‌اند. شکل ۷ ورق‌های فولادی آزمایش شده با ماده منفجره PETN در هوا را نشان می‌دهد که هر ۴ نمونه سالم و بدون شکستگی یا ترک تولید شده‌اند. نکته‌ای که در این آزمایش حائز اهمیت است این است که نسبت به آلومینیوم شکل پذیری کمتری دارد و این به ساختار متالوژی و کریستالی فولاد مربوط می‌شود.

شکل ۸ ورق‌های آلومینیومی آزمایش شده با ماده منفجره PETN در هوا را نشان می‌دهد که از ۴ نمونه، ۲ نمونه سالم و بدون شکستگی یا ترک ایجاد شده‌اند و ۲ نمونه دیگر دچار ترک و شکستگی شدند، که علت آن



شکل ۷: شکل دهی انفجاری ورقهای فولادی با ماده منفجره PETN در هوا



شکل ۸: شکل دهی انفجاری ورقهای آلومینیومی با ماده منفجره PETN در هوا



شکل ۹: شکل دهی انفجاری ورقهای آلومینیومی با ماده منفجره PETN در آب

۱.۳. اندازه گیری ابعاد نمونه‌ها

میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از تست انفجار، توسط دستگاه Optacom اندازه‌گیری گردید. از هر نمونه حدود دوازده نقطه در شعاع‌های مختلف خوانده شد. تعیین دقیق پروفیل تغییر شکل ورق با توجه به وجود اندکی اعوجاج در قطعات پس از آزمایش انفجار یکی از مسائل پیشرو در فرآیند اندازه‌گیری بود. برای اندازه‌گیری میزان خیز در شعاع‌های مختلف نیاز به تعیین یک سطح مرجع وجود داشت. برای تعریف سطح مرجع از بالاترین سطح ورق (قسمتی که به کمک فشار پیچ‌های تکیه‌گاه درون قید بدون تغییر شکل باقیمانده بود) هفت نقطه خوانده شد. نقاط خوانده شده توسط حسگر دستگاه Optacom در یک فایل یا پسوند IGES ذخیره شده و به نرم افزار Solid work منتقل گردید. در محیط این نرم افزار از هفت نقطه خوانده شده، بهترین صفحه ممکن عبور داده شده تا مختصات صفحه مرجع بدست آید، با تعیین مختصات تمامی نقاط خوانده شده توسط حسگر در محیط نرم افزار، فاصله عمودی تک تک این نقاط از صفحه مرجع محاسبه گردید.

ساختار فیزیکی ماده و کم بودن فاصله ماده منفجره نسبت به سطح ورق می‌باشد اما در دو نمونه از آزمایش‌های انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم AA5010 پس از بارگذاری، در مرکز ورق پارگی مشاهده گردید (شکل ۸). دلیل اصلی این امر را می‌توان تردی آلیاژ آلومینیوم به دلیل وجود منیزیم در محلول فاز جامد دانست. وجود ترک‌های ریز ایجاد شده در فرایند تولید، سبب می‌شود که قبل از رسیدن به تنش حد نهایی و میزان تغییر شکل بیشینه، نمونه دچار شکست شود، دلیل اصلی دیگر را می‌توان به فاصله Stand Off عنوان کرد بطوریکه با افزایش آن احتمال پارگی ورق کمتر و با کاهش آن احتمال پارگی یا شکست ورق بیشتر می‌شود. در نهایت مطابق شکل ۹ دیده می‌شود نمونه‌های آلومینیومی در حضور سیال آب با کیفیت سطح بالا و بدون هیچگونه تخریب و پارگی تولید شدند.



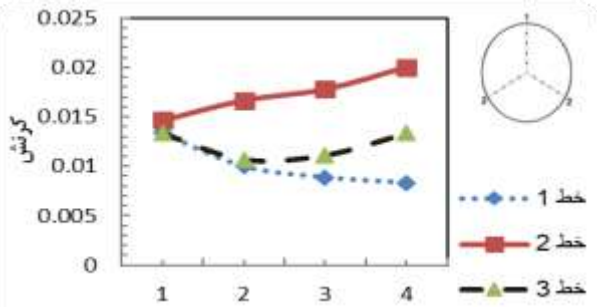
شکل ۵: شکل دهی انفجاری ورق آلومینیومی با ماده منفجره C4



شکل ۶: شکل دهی انفجاری ورقهای آلومینیومی با ماده منفجره PETN در هوا در حالت پارگی (شکست)

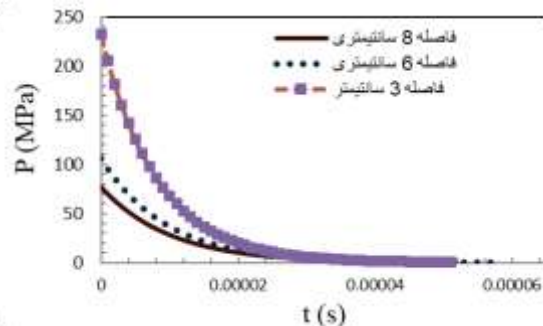
۲.۳. تغییرات فشار - زمان

با توجه به شکل ۱۰ آزمایش‌های انجام شده بر روی ورق‌های آلومینیومی در آب نشان‌دهنده این است که با افزایش فاصله مواد منفجره تا سطح ورق (Stand-Off) مقدار فشار کاهش و بالعکس آن باعث افزایش فشار شده است. بدلیل اینکه موج شوک حاصل از انفجار در فاصله کمتر نسبت به ورق، دارای قدرت و فشار بیشتری و بالعکس آن دارای قدرت و فشار کمتری را ایجاد می‌نماید.



شکل ۱۱: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده فولادی در هوا با فاصله ۳ سانتیمتری ماده منفجره PETN

با توجه به شکل ۱۲ در نمونه شماره ۷ دیده می‌شود، در خطوط شماره یک و دو تغییرات کرنش، از مرکز به سمت لبه بیرونی با کاهش همراه بوده و در خط سه تغییرات از مرکز به سمت لبه بیرونی با مقدار کرنش ثابت، همراه است. با توجه به شکل ۱۳ برای نمونه شماره ۶ دیده می‌شود، نرخ کرنش در خط شماره یک، در نقاط ابتدایی ۱ تا ۲ با افزایش و در ادامه برای نقاط ۲ تا ۳ کاهش و مجدداً برای نقاط ۳ تا ۴ با افزایش همراه است. همچنین در خط شماره دو نرخ کرنش در نقاط ۱ تا ۲ با کاهش و ۲ تا ۳ با افزایش و ۳ تا ۴ مجدداً با کاهش همراه است. خط شماره سه کرنش از ۱ تا ۴ با افزایش همراه بوده است. با توجه به شکل ۱۴ برای نمونه فولادی در سیال هوا با فاصله ۱۰ سانتیمتری ماده منفجره PETN، خطوط شماره یک و سه نقاط ۱ تا ۴ با کاهش نرخ کرنش و در خط ۲ نرخ تغییرات کرنش تقریباً ثابت بوده است.

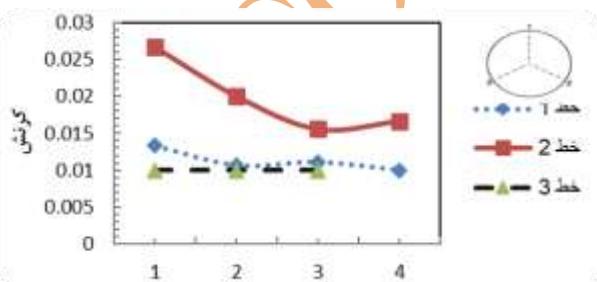


شکل ۱۰: نمودار فشار - زمان برای Stand-Off های مختلف (فاصله ماده منفجره تا ورق) در آب

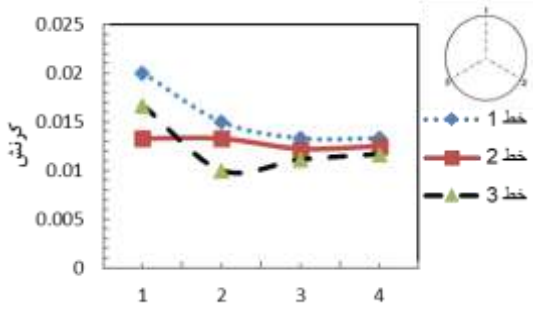
۳.۳. تغییرات کرنش

۱.۳.۳. تغییرات کرنش نقاط سنبه خورده ورق‌های فولادی بر روی خطوط سه گانه در سیال هوا

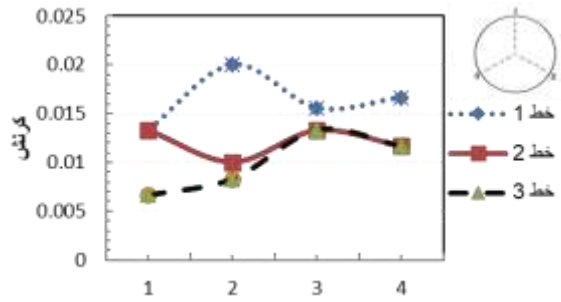
با توجه به شکل ۱۱ بر روی ورق‌های مورد آزمایش سه خط تحت زاویه ۱۲۰ درجه و بر روی هر خط چهار نقطه بوسیله سنبه حک شده است که نسبت به نقطه مرکز ورق اندازه گیری شده‌اند. در نمونه شماره ۸، این تغییرات از مرکز ورق به سمت لبه بیرونی ورق صورت گرفته است که نشان‌دهنده این است که در خط شماره یک تغییرات از مرکز به سمت لبه بیرونی با کاهش کرنش همراه بوده و در خط شماره دو، تغییرات از مرکز به سمت لبه بیرونی با افزایش کرنش همراه بوده و در نهایت برای خط سه تغییرات از مرکز به سمت لبه بیرونی در نقطه اول کاهش و در ادامه با افزایش همراه بوده است.



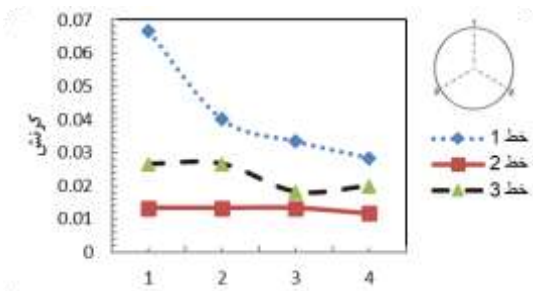
شکل ۱۲: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده فولادی در هوا با فاصله ۵ سانتیمتر و ماده منفجره PETN



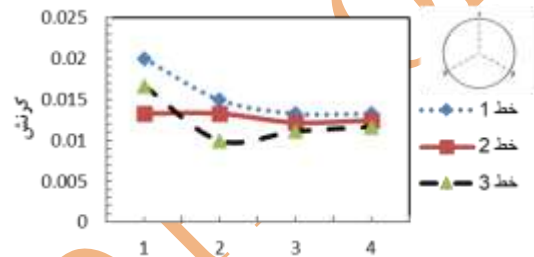
شکل ۱۵: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده آلومینیومی در هوا با فاصله ۶ سانتیمتر و ماده منفجره PETN



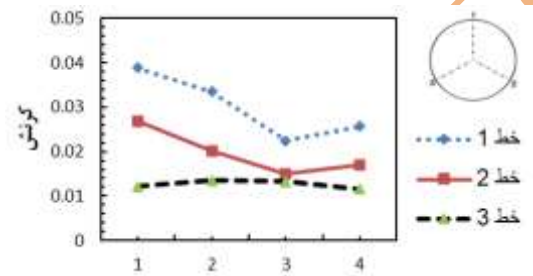
شکل ۱۳: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده فولادی در هوا با فاصله ۷ سانتیمتر و ماده منفجره PETN



شکل ۱۶: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده آلومینیومی در هوا با فاصله ۸ سانتیمتر و ماده منفجره PETN



شکل ۱۴: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده فولادی در سیال هوا با فاصله ۱۰ سانتیمتری ماده منفجره PETN



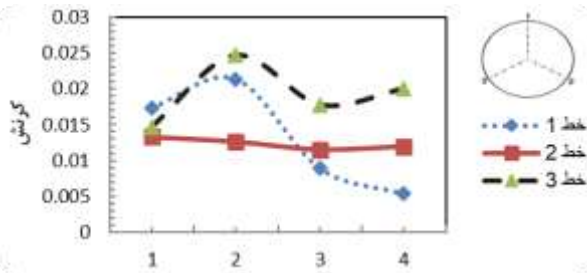
شکل ۱۷: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده در هوا آلومینیومی در هوا با فاصله ۱۰ سانتیمتر و ماده منفجره PETN

۲.۳.۳. نمودارهای تغییرات کرنش نقاط سنبه خورده ورق آلومینیومی بر روی خطوط سه گانه در سیال هوا

با توجه به شکل ۱۵ برای نمونه آلومینیومی در سیال هوا با فاصله ۶ سانتیمتری ماده منفجره PETN، دیده می-شود خطوط شماره یک و سه، در نقاط ۱ تا ۴ همواره با کاهش نرخ کرنش روبه‌رو بوده است و خط شماره ۲، نرخ تغییرات کرنش تقریباً ثابت بوده است. با توجه به شکل ۱۶ برای نمونه آلومینیومی در سیال هوا با فاصله ۸ سانتیمتری ماده منفجره PETN از نمونه، در خطوط شماره یک و سه، نقاط ۱ تا ۴ حدوداً با کاهش نرخ کرنش همراه است و خط شماره دو، نرخ تغییرات کرنش ثابت بوده است. در نهایت برای نمونه شماره ۴، با توجه به شکل ۱۷، برای خطوط شماره یک و دو، از نقاط ۱ تا ۴ با کاهش نرخ کرنش همراه است ولی در خط سه نرخ تغییرات کرنش تقریباً ثابت است.

۳.۳.۳. بررسی تغییرات کرنش نقاط سنبه خورده ورق آلومینیومی بر روی خطوط سه گانه در سیال آب

با توجه به شکل ۱۸ برای نمونه آلومینیومی در سیال آب با فاصله ۳ سانتیمتری ماده منفجره PETN از سطح نمونه (نمونه شماره ۱۲)، خطوط یک و دو و سه و نقاط



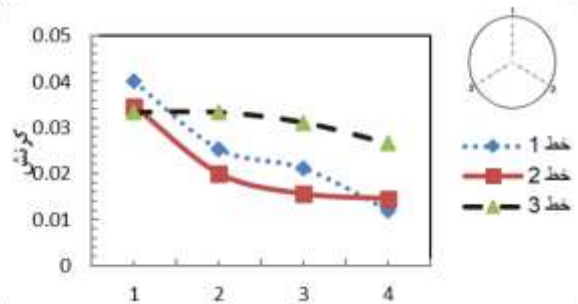
شکل ۲۰: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده آلومینیومی در آب با فاصله ۸ سانتیمتر و ماده منفجره PETN

۴.۳. بررسی تغییرات خیز با تغییر در فاصله

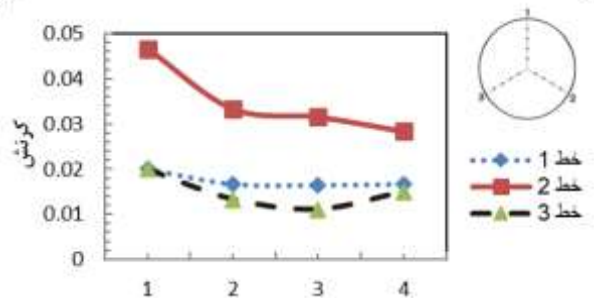
ماده منفجره تا سطح ورق

همانطور که در شکل ۲۱ دیده می‌شود، مقدار خیز با توجه به مقادیر Stand Off در فواصل مختلف از ۳ تا ۱۰ سانتیمتری مورد سنجش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار Stand Off خیز نمونه‌ها کمتر می‌شود. در حضور سیال هوا، مقدار خیز ورق با جنس آلومینیوم بیشتر از مقدار خیز در سیال آب می‌باشد، که دلیل این امر تراکم‌پذیری هوا و در نتیجه افزایش موج انفجار ناشی از موج شوک انفجار توضیح داده می‌شود. همچنین دیده می‌شود که مقدار خیز ورق از جنس فولاد کمتر از ورق آلومینیومی در حضور سیال هوا می‌باشد، که این امر بدلیل خصوصیات متالوژیکی آهن با آلومینیوم توضیح داده می‌شود. کیفیت سطح قطعات شکل داده شده در آب بهتر از قطعات شکل داده شده در هوا می‌باشد، توجیه این امر را می‌توان ناشی از یکنواختی موج شوک حاصل در برخورد به ورق در آب نسبت به هوا دانست. با توجه به نمودارهای فشار-نسبت به Stand-Off در صفحات آلومینیومی در آب با افزایش مقدار فاصله صفحه (Stand-Off) مقدار فشار کاهش یافته است.

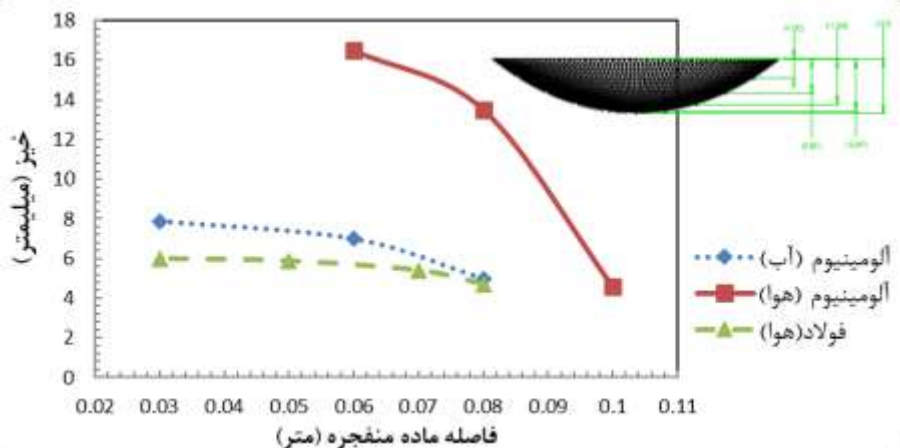
۲ و ۳ و ۴، نرخ تغییرات کرنش‌شان پیوسته کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل ۱۹ در نمونه شماره ۱۱، خطوط یک و سه در نقاط ۱ تا ۴ با کاهش نرخ کرنش در خط شماره دو نرخ تغییرات کرنش تقریباً ثابت بوده است. در نهایت با توجه به شکل ۲۰ در نمونه شماره ۱۰، خطوط شماره یک و سه در نقاط ۱ تا ۲ ابتدا افزایش و سپس در نقاط ۳ تا ۴ با کاهش نرخ کرنش همراه است، و در خط دو، نرخ تغییرات کرنش تقریباً ثابت بوده است.



شکل ۱۸: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده آلومینیومی در آب با فاصله ۳ سانتیمتر و ماده منفجره PETN



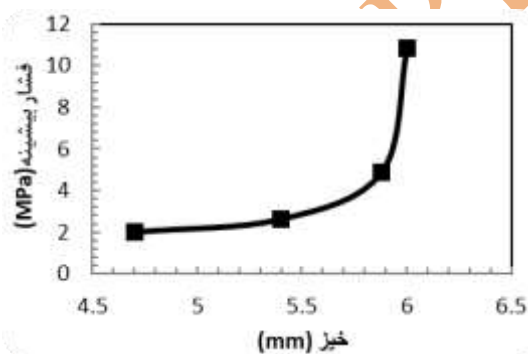
شکل ۱۹: نمودار کرنش نقاط سنبه خورده بر روی خطوط سه گانه ورق شکل داده شده آلومینیومی در آب با فاصله ۶ سانتیمتر و ماده منفجره PETN



شکل ۲۱: نمودار تغییرات خیز نسبت به تغییر فاصله در ورقهای فولادی و آلومینیومی در هوا و آب

۶.۳. بررسی تغییرات فشار نسبت به خیز

از شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ می‌توان دریافت که با افزایش فشار بیشینه حاصل از موج انفجار مقدار خیز بیشینه ورق نیز افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار در ورق تحت بار را می‌توان به خصوصیات فیزیکی و نمودار تنش-کرنش ورق‌های مورد آزمایش نسبت داد. همچنین خیز در ورق آلومینیومی نسبت به ورق فولادی مشابه با مقدار و فاصله یکسان ماده منفجره بیشتر می‌باشد، که بدلیل خصوصیات متالورژیکی آلومینیوم قابل توجیح است.

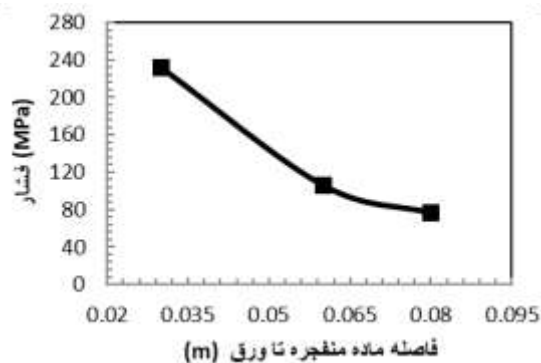


شکل ۲۳: نمودار فشار بیشینه نسبت به خیز مرکز ورق فولادی در هوا

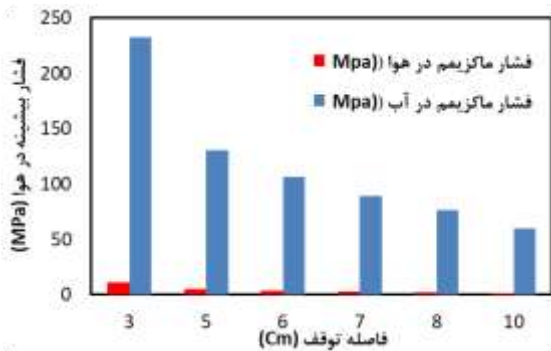
۵.۳. بررسی تغییرات فشار با تغییرات فاصله

ماده منفجره تا ورق

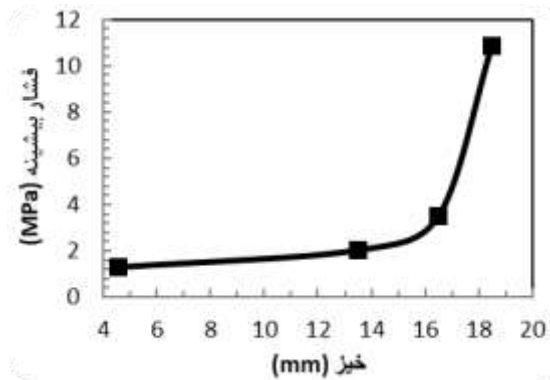
با توجه به شکل ۲۲ با افزایش مقدار فاصله ماده منفجره تا سطح ورق (Stand Off) مقدار فشار کاهش یافته است. به دلیل کاهش فاصله، موج حاصل از انفجار، فشار و نفوذ بیشتری ایجاد نموده و در نهایت باعث تغییر شکل بیشتر ورق می‌گردد و در فواصل بیشتر، فشار و نفوذ کمتری حاصل و تغییر شکل کمتری در ورق ایجاد می‌شود. نکته حائز اهمیت، تراکم ناپذیری موج حاصل از انفجار در آب می‌باشد که با توجه به نمودار فشار-زمان در اثر شکل پذیری به فاز منفی نمی‌رسد لیکن در شکل دهی انفجاری در هوا موج شوک ایجاد شده تراکم پذیر بوده و پس از برخورد به ورق باعث حداکثر تغییر شکل و به فاز منفی هم می‌رسد.



شکل ۲۲: نمودار بیشترین فشار نسبت به Stand-Off های مختلف صفحات آلومینیومی در آب



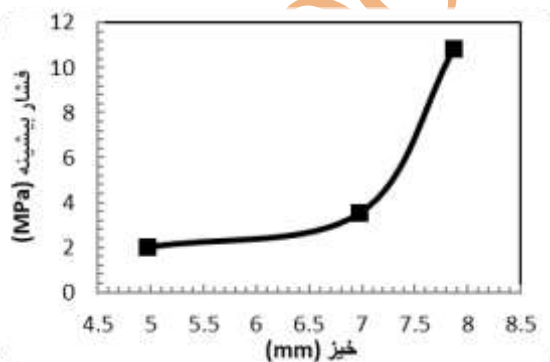
شکل ۲۶: نمودار مقایسه فشار بیشینه نسبت به فاصله ماده منفجره



شکل ۲۴: نمودار فشار بیشینه نسبت به خیز مرکز ورق آلومینیومی در هوا

۸.۳. بررسی تغییرات موج انفجار به فاصله ماده منفجره

با توجه به نمودارهای موج انفجار نسبت به فاصله ماده منفجره مطابق شکل ۲۷ در صفحات آلومینیومی و در سیال آب دیده می‌شود با افزایش فاصله مقدار موج انفجار کاهش یافته است. بدلیل سرعت بالای صوت در آب و زمان کم واکنش انفجار، لیکن موج انفجار با مقدار فاصله ماده منفجره تا ورق نسبت عکس دارد. همچنین در شکل ۲۸ میزان موج انفجار حاصله در دو مسیال آب و هوا با یکدیگر مقایسه شده است. افزایش ناگهانی موج انفجار در فاصله کمتر از ۵ میلیمتر دلیل تخریب و پارگی نمونه‌ها گزارش می‌گردد. می‌توان دریافت که موج ناشی از انفجار با مقدار و فاصله یکسان ماده منفجره در هوا نسبت به آب به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. همانگونه که اشاره شد موج انفجار به فشار و زمان بستگی دارد، بنابراین پدیده صورت گرفته را می‌توان به این صورت توضیح داد که آب سیالی تراکم ناپذیر و چگالتر از هوا است، در نتیجه سرعت صوت در آب به مراتب از هوا بیشتر می‌باشد، این افزایش سرعت منجر به کاهش زمان رسیدن موج انفجار می‌گردد، این مقدار کاهش یافته حتی از افزایش فشار آب نسبت به هوا بیشتر است در نتیجه موج ناشی از انفجار با مقدار و فاصله یکسان ماده منفجره در آب نسبت به هوا به مراتب کمتر است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش فاصله ماده منفجره از ۶ به ۵ میلیمتر موج انفجار ۵۸.۲ درصد افزایش می‌یابد در حالیکه با کاهش فاصله تا ۳ میلیمتری، قدرت موج انفجار تا ۸۶۳ درصد



شکل ۲۵: نمودار فشار بیشینه نسبت به خیز مرکز ورق آلومینیومی در آب

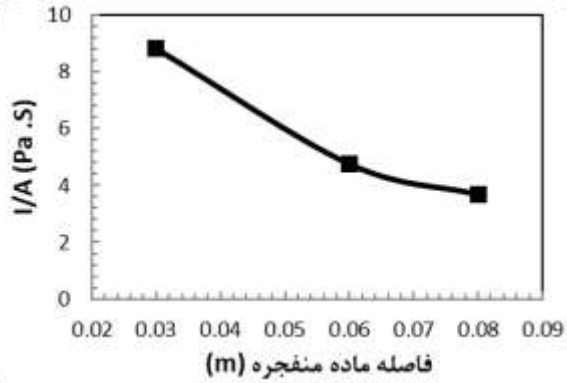
۷.۳. مقایسه فشار بیشینه نسبت به فاصله ماده منفجره

از شکل ۲۶ می‌توان دریافت که با افزایش فاصله ماده منفجره تا ورق فشار حاصله از انفجار کاهش می‌یابد. همچنین فشار بیشینه ناشی از انفجار، با مقدار و فاصله یکسان ماده منفجره در هوا نسبت به آب، به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. این پدیده بدلیل این است که آب سیالی تراکم ناپذیر می‌باشد، در صورتی که هوا تراکم پذیر است و مقدار قابل توجهی از فشار حاصل از انفجار صرف تراکم هوا می‌شود.

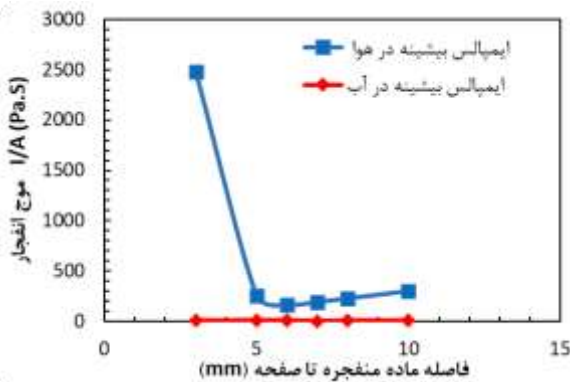
افزایش می‌یابد؛ این به این معنی است که با کاهش فاصله تا ۹ برابر قدرت موج می‌تواند افزایش یابد.

۹.۳. بررسی خیز نمونه‌ها

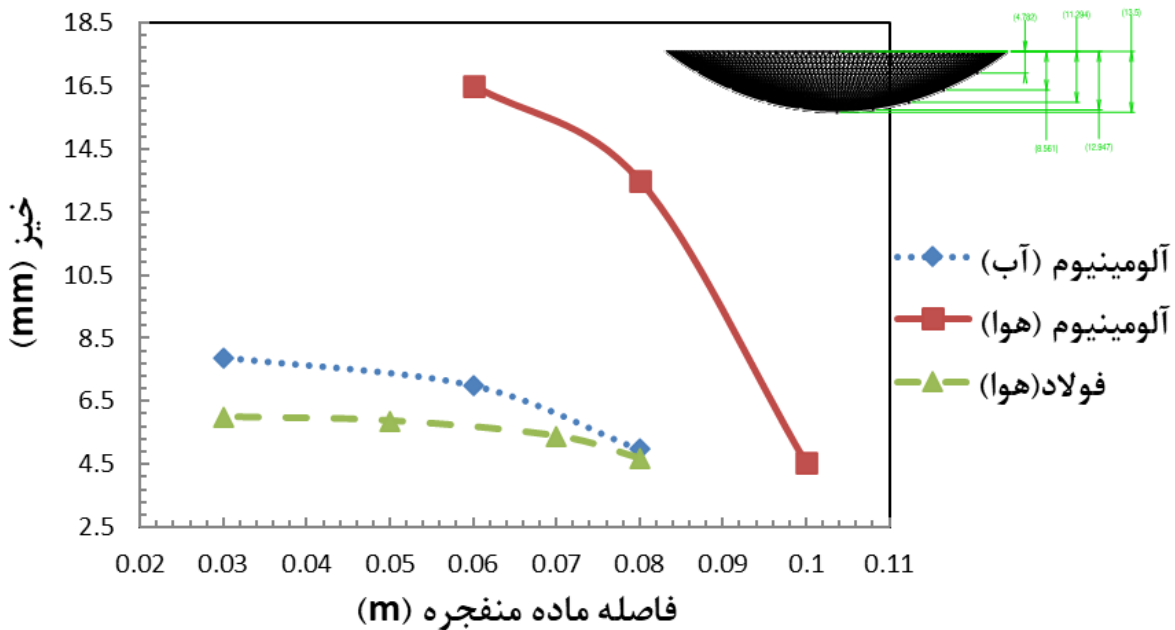
همانگونه که ذکر شد از آزمایشهای صورت گرفته نتیجه می‌شود که مقدار خیز در ورقهای آلومینیومی در هوا بیشتر از ورقهای مورد آزمایش در آب، و کمترین مقدار خیز در ورقهای فولادی در هوا می‌باشد. که علت آن را می‌توان در تراکم ناپذیری آب و چگالی بیشتر آب نسبت به هوا و نیز به نوع رفتار مواد با توجه به خواص فیزیکی و ساختار متالورژیکی آنها دانست. شکل ۲۹ مویید این مطلب می‌باشد.



شکل ۲۷: نمودار موج انفجار نسبت به Stand-Off های مختلف صفحات آلومینیومی در آب



شکل ۲۸: نمودار مقایسه موج انفجار بیشینه نسبت به فاصله ماده منفجره



شکل ۲۹: نمودار تغییرات خیز نسبت به تغییر فاصله در ورقهای فولادی و آلومینیومی در هوا و آب

۴. نتیجه گیری

یافت؛ این به این معنی است که با کاهش فاصله تا ۹ برابر قدرت موج می‌تواند افزایش یابد.

۶- با افزایش فاصله ماده منفجره تا سطح ورق (Stand off)، مقدار خیز کاهش و با کاهش آن افزایش یافته است.

۷- با توجه به این که ۱۰ گرم ماده منفجره C4 با چاشنی الکتریکی ورقی به ضخامت ۱ میلی‌متر و در فاصله (Stand Off) ۳۰ میلی‌متر از جنس آلومینیوم ۵۰۱۰ را بطور کامل تخریب کرد، در صورتیکه در آزمایش دیگری یک گرم ماده منفجره از جنس PETN توانست ورق مشابهی را در همان فاصله (Stand Off) ۳۰ میلی‌متر شکسته و یا ایجاد پاره گی نماید. پس می‌توان نتیجه گیری کرد که قدرت انفجار PETN بیشتر از C4 می‌باشد. به عبارتی موج انفجار یا موج شوک حاصل از ماده منفجره PETN به مراتب بیشتر از C4 می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌ها نتیجه این شد که مقدار کرنش از مرکز ورق تا لبه بیرونی به تدریج کاهش پیدا کرده است.

۸- مقدار فشار حاصله از انجام آزمایش شکل دهی در زیر آب حدوداً هشت برابر فشار در هوا به دست آمده است.

۹- جهت ایجاد شکل دهی مناسب و جلوگیری از تخریب و چروکیدگی و یا شکست ورق کل قالب را بر روی پایه‌ای فلزی قرار داده تا فضای خالی در زیر محفظه قالب فراهم شده تا موج شوک یا موج انفجار حاصل از انفجار با برخورد به سطح ورق از فضای داخل قالب به بیرون هدایت شود اگر این موج به دلایلی خارج نشود و یا انتهای قالب بسته باشد این موج به سطح ورق بازگشته و باعث دفرمگی ناخواسته می‌گردد.

در این مطالعه تولید قطعات عدسی شکل با فرایند شکل‌دهی ناگهانی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به صورت تجربی تاثیر پارامترهای موثر در فرایند شکل‌گیری، شامل جنس ورق، نوع سیال واسط و فاصله مواد منفجره تا سطح ورق در فرایند شکل‌دهی انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. از ورقهای AL5010 و فولاد St37 با قطر ورق ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر همراه با ماده منفجره PETN استفاده شد. در پایان نتایج به صورت زیر گزارش می‌گردد:

۱- استفاده از آب به عنوان سیال مورد نظر در شکل دهی ورق باعث ایجاد کیفیت سطح مناسب‌تری نسبت به شکل دهی مشابه در هوا می‌باشد و علت آن این می‌باشد که موج شوک یا موج انفجار بطور یکنواخت به ورق می‌رسد بعبارتی آب تا حد زیادی موج حاصل از انفجار را دمپ می‌نماید.

۲- ساخت قالب دوتکه باعث می‌شود که حمل و نقل قالب راحت‌تر بوده و نیز در صورت استفاده از آب به عنوان سیال واسط، آن را در داخل کفه رویی ریخته و نیازی به قرار دهی کل قالب را داخل استخر یا حوضچه نیست.

۳- نمونه‌های تولید شده به روش شکل دهی انفجاری در حضور سیال آب، کیفیت سطح بالاتری نسبت به شکل دهی در سیال هوا دارد.

۴- با افزایش فاصله ماده منفجره تا سطح ورق (Stand off)، مقدار فشار کاهش و با کاهش آن افزایش یافته است.

۵- نتایج نشان داد با کاهش فاصله ماده منفجره تا سطح ورق از ۶ به ۵ میلی‌متر موج انفجار ۵۸.۲ درصد افزایش می‌یابد در حالیکه با کاهش فاصله تا ۳ میلی‌متری، قدرت موج انفجار تا ۸۶۳ درصد افزایش

- [1] S. J. Hashemi, A. Sadeh, "Experimental investigation of explosive forming of aluminum tubes using gas mixture", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No.5, PP. 18-24, 2019 (in Persian).
- [2] Y-X. Peng, A-M. Zhang, F-R. Ming. "Numerical simulation of structural damage subjected to the near-field underwater explosion based on SPH and RKPM", *Ocean Engineering*, Volume 222, PP. 108-576, 15 February 2021, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108576>
- [3] G.N.Nurick and J.B.Martin, "deformation of thin plates subjected to impulsive loading and review – Part I: theoretical considerations", *Int.J.Impact Engng.*, Vol.8,No.2, PP.159-170, 1989.
- [4] Ohmori, I. Masanobu, F. Misao, Masahiro, "Deformation of steel Ring Expanded Explosively in Water", *Transactions of the Japan institute of Metals*, V.26, No.11, PP.840-848, Nov 1985.
- [5] Behera, T., "Formability of steel in Explosive Hot Forming", *J Inst. Eng. India Part*, Vol. 65, PP. 46-51, Sep. 1984.
- [6] Peikrishvili, A. B., Tavadze, F. N., Chagelishvili, E., Gotsiridze, G. G., "Explosive Working of WC-Co Alloys at High Temperatures", *International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*, Beijing, China, Science Press, Beijing, China, 1986.
- [7] Gazeaud, G., Lichtenberger, A., "Influence of Grain Size on the Dynamics Behavior of Copper", *Journal De Physique IV 1*, No. 8, PP. 3-10, 1991.
- [۸] مهدی ظهور، مسعود کریمی، "شبه سازی شکل دهی انفجاری ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم"، فصلنامه فرآیندهای نوین ساخت و تولید- سال اول- شماره دو- تابستان (۱۳۸۹).
- [۹] ظهور مهدی، رضوانی محمد، "بررسی تجربی شکل دهی صفحات فولادی مدور به روش تغییر شکل انفجاری"، مکانیک هوا فضا، دوره ۷، شماره ۲ (پیاپی ۲۴) (ساخت و تولید)؛ از صفحه ۲۵ تا صفحه ۳۲، ۱۳۹۰.
- [10] V.N. Wijayathunga, D.C Webb, "Experimental evaluation and finite element simulation of explosive forming of a square cup from a brass plate assisted by a lead plug". *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 172, Issue 1, PP. 139-145, 2006.
- [11] G. Hobson and E. Amini, "FUNDAMENTALS OF AN EXPLOSIVE FORMING MACHINE", *Int.J.Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 4, PP. 73-90, 1964.
- [12] Cristescu, "Dynamic Plasticity", *1st Edition* - January 1, 1967.
- [13] F.W.Travis and W.Johnson, "The Explosive Forming of Cones", *Proc. 3rd International Machine Tool Design Research Conference*, Birmingham, pp. 341-364, 1962.
- [14] H.P. Tardif, "Explosive Forming Conces by Metal Gathering", *Metal Progress*, 76, No.3, p. 84, September 1959.
- [15] Kasem Kormi, "Studies in The Deep Drawing of Cups Using an Underwater Explosive Technique", Ph.D Thesis , May 1964.
- [16] Javabvar D., Habibpour B., "Analysis of Explosive Forming by an Energy Method", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 2, No. 1; PP. 11-19, 2006 (in Persian).
- [17] Sunjic, D & Buljan, S. "Determining the Amount of Explosives in Metal Forming", *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, pp.0592-0598, Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, 2019. Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.080

Sudden forming of aluminum and steel sheets in air and water fluid bed

Hossein Taghipoor¹

1. Department of Mechanical Engineering, Velayat University, P.O. Box 99111-31311, Iranshahr, Iran.

*Corresponding Author: h.taghipoor@velayat.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:

Sudden forming;
Wave propagation;
Interstitial fluid;
Aluminum sheet;
Experimental

ABSTRACT

Explosive sheet forming is a novel and rapid metal forming technique that has garnered significant attention from researchers and industries due to its ability to reduce production time and cost. This study provides a comprehensive investigation into the production of lenticular-shaped parts using this process. Experimental tests were conducted using aluminum alloy (AL5010) and steel (St37) sheets with a thickness of 1 mm and a diameter of 100 mm, employing PETN as the explosive material. The experiments focused on three key parameters: sheet material, the type of interstitial fluid (water and air), and the stand-off distance (distance between the explosive material and the sheet surface). The results showed that reducing the stand-off distance from 6 mm to 5 mm increased the blast wave strength by 58.2%. Further reducing the distance to 3 mm led to an impressive 863% increase, demonstrating the potential to amplify the blast wave's strength by up to nine times. Qualitative analysis revealed that using water as the interstitial fluid significantly improved the surface quality of the formed parts compared to air. This improvement can be attributed to water's incompressibility, which ensures a more uniform transfer of the blast wave to the sheet surface. Additionally, aluminum sheets exhibited greater deformation and deflection compared to steel sheets, a behavior linked to their distinct mechanical and metallurgical properties. These findings contribute to advancing scientific and practical knowledge in the field of explosive forming and highlight the potential of this method for producing high-quality components with superior efficiency in various industrial applications.
