

ارزیابی خواص پلاستیک و الاستیک ورق منیزیم در جهات مختلف نورد با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال

علیرضا پورموید^۱، کرامت ملک زاده فرد^۲، محمدعلی رنجبر^{۳*}، علی شاه میرزالو^۴

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد، پژوهشکده صنایع هوایی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹)

چکیده

استفاده از مواد جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب در سازه‌های هوایی می‌تواند جایگزین مناسبی برای موادی که به صورت معمول (آلیاژهای آلومینیوم، کامپوزیت‌ها و...) استفاده می‌شوند، باشد. استفاده از آلیاژهای منیزیم برای کاربردهای مختلف و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نیازمند شناسایی کامل و دقیق خواص و پارامترهای مکانیکی ماده می‌باشد. یکی از این روش‌های شناسایی، روش همبستگی تصاویر دیجیتالی می‌باشد. در این تحقیق ابتدا ورق منیزیم در جهات مختلف نورد تهیه و سپس با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال دوبعدی، توزیع کامل میدان کرنش در طی آزمون کشش تک‌محوره در جهات مختلف نورد استخراج و در انتها کرنش در سه جهت طول، عرض، ضخامت و ضریب ناهمسانگردی بر حسب کرنش مؤثر محاسبه شد. علاوه بر این، برای اولین بار با استفاده از روش میدان مجازی، ثوابت الاستیک و پلاستیک نظیر مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، ضریب استحکام، توان کارسختی و تنش تسلیم برای ورق منیزیم در جهات مختلف نورد محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ منیزیم، روش همبستگی تصاویر دیجیتال، خواص الاستیک و پلاستیک

Evaluation of plastic and elastic properties of magnesium plate in different rolling directions using correlation of digital images (DIC)

Alireza Pourmoayed, Keramat Malekzadeh Fard, Mohammadali Ranjbar* and Ali Shahmirzalu

Abstract

The use of new materials with suitable mechanical and physical properties in aerial structures can be a good alternative to materials that are commonly used (aluminum alloys, composites, etc). The use of magnesium alloys for various applications and predicting their behavior in simulation software requires complete and accurate identification of the properties and mechanical parameters of the material. One of these identification procedures is digital image correlation method. In this research, the first magnesium plate is prepared in different directions of rolling and then using two-dimensional digital image correlation method, the complete distribution of strain field during uniaxial tensile test in different directions of rolling is extracted and finally strain in three directions of length, width, thickness and anisotropy coefficient in terms of effective strain were calculated. Furthermore, for the first time using the virtual field method, elastic and plastic constants such as modulus of elasticity, Poisson ratio, strength coefficient, strain hardening exponent and yield stress for magnesium sheet in different directions of rolling were calculated.

Key words: Magnesium alloy, DIC method, Elastic and Plastic properties

مقدمه

منیزیم سبک‌ترین فلز در بین تمامی فلزات سازه‌ای است. این عنصر به‌عنوان پایه‌ای برای آلیاژهای صنعتی، موفقیت زیادی را در سطح وسیعی از کاربردها از آن خود نموده است. چگالی این فلز در حدود $1/7$ گرم بر سانتیمتر مکعب است که $4/5$ برابر سبک‌تر از فولاد، $2/6$ برابر سبک‌تر از تیتانیوم و $1/6$ برابر سبک‌تر از آلومینیوم است [۱]. بر اساس گزارش‌های استخراج‌شده بازار جهانی منیزیم، تولید منیزیم در سال ۲۰۲۰ معادل ۱.۱ میلیون تن برآورد شده است و بیشترین مقدار تولید آن در چین بوده و تا سال ۲۰۲۷ به ۱.۶ میلیون تن می‌رسد [۲].

آلیاژهای منیزیم قابلیت ریخته‌گری عالی دارند و با استفاده از آن می‌توان اشکال پیچیده با روش‌های بهره‌وری بالا مانند ریخته‌گری تحت فشار بالا را ساخت. قطعات منیزیم را می‌توان تا ۵۰ درصد سریع‌تر از قطعات مشابه در آلومینیوم [۳،۴] ریخته‌گری کرد. همچنین، در مقایسه با پلیمرها، آلیاژهای منیزیم خواص مکانیکی برتر و هدایت حرارتی بالاتری را نشان می‌دهند. علاوه بر این، منیزیم ۱۰۰ درصد قابل بازیافت است که این امر معمولاً در مورد پلیمرها صادق نیست [۵]. با توجه به موارد ذکر شده فوق، منیزیم و آلیاژهای آن در محدوده وسیعی از کاربردهای سازه‌ای و غیر سازه‌ای قرار می‌گیرند و از آن‌ها می‌توان در ساخت تانکرهای نفت و سوخت، صنایع هوافضا (بال‌های هواپیما)، بدنه اتوبوس، تریلر، سقف کامیون‌ها و در گوشی‌های همراه، لبتاب‌ها و تجهیزات که دارای ارتعاش هستند، استفاده نمود [۶،۷].

درک درست از خواص مکانیکی مواد به خصوص مواد جدید در طراحی و مدل‌سازی اجزایی که از این مواد استفاده می‌شود بسیار مهم و حیاتی است. یکی از علل عدم بررسی در زمینه ثوابت مواد جدید، دقت پایین روش‌های قدیمی و هزینه‌ی بالای روش‌های نوین می‌باشد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و کرنش مانند روش کرنش‌سنج، روش تداخل و روش همبستگی تصاویر دیجیتال ارائه شده است. در روش کرنش‌سنج که قبلاً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گرفت میزان خطا در کرنش اندازه‌گیری شده در ناحیه گلوبی تا شکست بسیار زیاد بوده و گزارش شده است که فقط تا نقطه گلوبی دارای دقت مناسب است [۸]. در مقابل در روش همبستگی تصاویر دیجیتال این محدودیت وجود نداشته و یکی

از مزایای روش همبستگی تصاویر دیجیتال، اندازه‌گیری میدان کامل جابه‌جایی و کرنش در کل ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. بر این اساس این روش، یکی از روش‌های نوین است که در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. روش همبستگی تصاویر دیجیتال، اولین بار، به عنوان یک روش برای اندازه‌گیری جابه‌جایی توسط پیترس و رانسون در دانشگاه کارلینا معرفی شد [۹]. آن‌ها یک الگوریتم همبستگی را برای همبستگی یک مجموعه از پیکسل‌ها بین عکس مرجع و تصاویر تغییرشکل استفاده کردند. در سال‌های اخیر، روش همبستگی تصاویر دیجیتال در افزایش سرعت، بهبود دقت همبستگی و غیره شدیداً توسعه یافته است، به طوری که بیشتر تلاش‌ها روی بهبود الگوریتم‌های همبستگی متمرکز شده است. به‌عنوان مثال، روش درون‌یابی بیلینر^۳، روش راه‌حل عددی نیوتن-رافسون^۴، جستجوی دقیق درشت^۴ و غیره [۱۰].

استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال^۵ برای تعیین خواص مواد توسط تعدادی از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین خواص در ناحیه‌های مختلف جوش با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال اولین بار توسط رینالدز و همکاران [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با استفاده از روش کرنش‌نگاری دیجیتال به اندازه‌گیری کانتور کرنش در نواحی مختلف جوش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته و با استفاده از داده‌های کرنش، خواص مکانیکی را در مناطق مختلف جوش محاسبه نمودند. جنیوا و همکاران [۱۲] تأثیر ناهمگنی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۱ و ۲۰۲۴ بر روی خواص کششی کلی^۶ و موضعی جوش اصطکاکی و اغتشاشی را بررسی کردند. روش کرنش‌نگاری دیجیتال برای استخراج توزیع کرنش و تهیه نمودار تنش-کرنش موضعی توسط آن‌ها استفاده شده است. طبق نتایج گزارش‌شده توسط آن‌ها خواص کششی در جوش ۵۲۵۱ تقریباً همگن و با چقرمگی زیاد همراه بوده و شکست در فلز پایه اتفاق افتاده است؛ اما برای آلومینیوم ۲۰۲۴ خواص کششی در مناطق مختلف به‌شدت ناهمگن بوده و ناحیه تحت تأثیر حرارت مکانیکی، به‌عنوان ضعیف‌ترین منطقه جوش بوده و شکست در این ناحیه اتفاق افتاده است.

گاهی با توجه به دلایلی مثل تعمیر جوش نیاز است تا روی جوش اصطکاکی اغتشاشی چند پاس مجدد استفاده شود. در این خصوص برای آگاهی از رفتار جوش در این حالت بران و همکاران [۱۳] به بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار جوش در

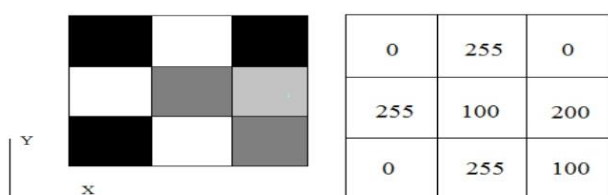
۵ پاس و روی آلومینیوم ۷۰۵۰ پرداختند. آن‌ها در این تحقیق برای تهیه کرنش موضعی در منطقه جوش و اطراف آن از روش کرنش‌نگاری دیجیتال استفاده نمودند و نشان دادند که تمرکز کرنش و شکست در ناحیه‌ی HAZ اتفاق افتاده است. فیستاور و همکاران [۱۴] به بررسی خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی و اغتشاشی غیرمشابه آلومینیوم و منیزیم پرداختند. آن‌ها از روش کرنش‌نگاری دیجیتال برای به دست آوردن کرنش موضعی در اتصال غیرمشابه و نمودار تنش-کرنش در نقاط مختلف جوش با ساختار متالورژیکی متفاوت استفاده کردند. در تحقیقی دیگر لیتائو و همکاران [۱۵] با توجه به قابلیت روش کرنش‌نگاری دیجیتال مانند به دست آوردن کرنش موضعی، از این روش برای دستیابی به خواص مکانیکی موضعی در نقاط مختلف جوش استفاده نمودند. آن‌ها همچنین در این تحقیق نشان دادند که نمودار تنش-کرنش موضعی به دست آمده با استفاده از کرنش‌نگاری دیجیتال تطابق خوبی را با نمونه‌های میکرو کشش داشته است. برای بهترین استفاده از داده‌های کرنش به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای تعیین خواص الاستیک و پلاستیک در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۵۴۵۶ لودس و همکاران [۱۶] از روش میدان مجازی استفاده کردند. سارانا و همکاران [۱۷] مشخصات مناطق مختلف جوش مانند FZ، HAZ و فلز پایه را با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال ارزیابی نموده‌اند. آن‌ها در این تحقیق استفاده از مشاهدات میکروگرافیکی و پردازش تصویر برای شناسایی دقیق مناطق مختلف جوش را پیشنهاد داده‌اند. سارانا و همکاران در تحقیقی دیگر [۱۸] با استفاده از داده‌های روش همبستگی تصاویر دیجیتال به استخراج خواص الاستیک و پلاستیک به صورت موضعی در یک جوش پرتو الکترونی آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از هر دو روش تنش یکنواخت ۷ و میدان مجازی^۸ پرداختند. جونگ و همکاران [۱۹] به بررسی خواص ناهمسانگردی چوب با استفاده از روش کرنش‌نگاری دیجیتال پرداختند. آن‌ها این کار را با تست کشش خارج از محور و نظارت کرنش‌نگاری دیجیتال روی چهار نوع چوب متفاوت انجام دادند. آن‌ها با این روش خواص مکانیکی مانند مدول الاستیک، مدول برشی و نسبت پواسون را برای چهار نوع چوب متفاوت اندازه‌گیری نمودند. در سال‌های اخیر، استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای محاسبه خواص مکانیکی مواد

مختلف مانند ورق‌های فلزی، آلیاژها و کامپوزیت‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است. رحمت‌آبادی و همکاران، ورق دولایه آلومینیوم آلیاژی ۱۰۵۰ را با استفاده از روش پیوند نوردی با اعمال کاهش ضخامت ۵۰ درصد در دمای محیط تولید و سپس از روش همبستگی تصویر دیجیتال دوبعدی برای به دست آوردن توزیع کامل میدان کرنش طی آزمون کشش تک‌محوره در جهت نورد استفاده کردند [۲۰]. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات پارامترهای الاستیک بسیار اندک بوده و مدول الاستیسیته برای آلومینیوم اولیه و دولایه، به ترتیب ۷۰ و ۶۹/۳ گیگاپاسکال می‌باشد. سانچز و پلوس [۲۱] از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای شناسایی خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژهای حافظه‌دار استفاده کردند و این روش را یک روش مناسب، با دقت کافی و ارزان قیمت برای شناسایی خواص ماده معرفی کردند. تانگ و همکاران [۲۲]، به بررسی خواص مکانیکی ورق‌های فلزی آلومینیوم و فولاد استحکام بالا با روش همبستگی تصاویر دیجیتال پرداختند. ارل و همکاران [۲۳]، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، ثابت الاستیک و ضریب ناهمسانگردی در جهت‌های مختلف را برای کامپوزیت‌ها محاسبه کردند. با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون تحقیقی در زمینه شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک برای استفاده در نرم‌افزارهای عددی جهت پیش‌بینی رفتار آلیاژ منیزیم در جهت‌های مختلف نورد انجام نشده است. بر این اساس در این تحقیق برای اولین بار، ورق‌های منیزیم AZ31، مطابق با استاندارد ASTM-E8 توسط دستگاه وایرکات تهیه شده‌اند. سپس پارامترهای الاستیک و پلاستیک، ضریب ناهمسانگردی و منحنی تنش و کرنش در جهت‌های مختلف (طول و عرض با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، ضخامت با استفاده از روابط حجم ثابت در حین تغییر شکل) برای این ورق‌ها با استفاده از روش نوین همبستگی تصاویر دیجیتال اندازه‌گیری شد.

روش همبستگی تصاویر دیجیتال

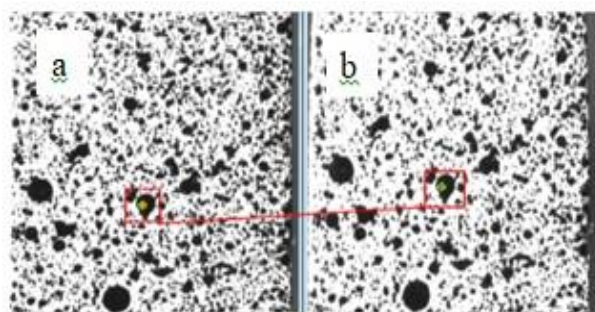
روش همبستگی تصویر دیجیتال یک ابزار قدرتمند و سودمند است که به صورت اپتیکی و غیرتماسی با توجه به قیمت پایین، در دسترس بودن تجهیزات تصویربرداری و نرم-افزار همبستگی، در برخی از بخش‌های صنعتی برای اهداف

بر اساس شدت نور پیکسل‌هاست در نظر گرفت. به‌عنوان مثال، برای تصویر خاکستری ۸ بیتی، هر پیکسل دارای مقادیر عدد صحیح از ۰ تا ۲۵۵ است. مقدار پیکسل صفر برای سیاه خالص و ۲۵۵ برای سفید خالص در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ تصویر دیجیتالی شامل ۹ پیکسل مربع و مقادیر پیکسل مربوطه نشان داده شده است. برای یک تصویر دیجیتالی، تعداد ستون‌ها و سطرها ثابت هستند، بنابراین اندازه ماتریس فرمینگ می‌تواند تعیین شود. به‌عنوان مثال، تصویر دیجیتالی نشان داده در شکل ۱ شامل ۹ پیکسل، سه پیکسل در هر ردیف و سه پیکسل در هر ستون که می‌تواند به‌عنوان ماتریس زیر ارائه شود:



شکل ۱- نمونه تصویر دیجیتالی شامل پیکسل‌ها و مقادیر مربوط به پیکسل‌ها [۲۴]

در همبستگی تصاویر دیجیتالی دنبال کردن یک پیکسل منفرد غیرممکن است، زیرا احتمال وجود تعداد زیادی از پیکسل‌ها با مقادیر شدت نور مشابه در تصاویر تغییرشکل‌یافته زیاد است. برای حل این مشکل، یک مجموعه از پیکسل‌ها به نام زیرمجموعه در پروسه همبستگی معرفی شده است. هر زیرمجموعه دارای توزیع شدت نور منحصر به فرد است (البته باید به این توجه شود که اندازه‌ها خال‌ها نباید از یک زیرمجموعه بزرگ‌تر باشد). مقدار جابجایی بر اساس جستجو در زیرمجموعه‌های عکس تغییر شکل یافته که شدت نور یکسانی با عکس مرجع را دارند صورت می‌گیرد (شکل ۲).



شکل ۲- اختصاص دادن یک زیرمجموعه ۴۱*۴۱ پیکسل به عکس مرجع (a) عکس تغییر شکل یافته (b)

تجاری و علمی به کار گرفته می‌شود. از این روش به شکل گسترده در آزمون‌های مکانیکی برای درک رفتار مواد استفاده می‌شود [۲۰]. این روش برای به دست آوردن تجربی میدان‌های کرنش و جابه‌جایی از قابلیت اطمینان خوبی برخوردار است. در روش همبستگی تصویر دیجیتالی با عکس گرفتن از نمونه قبل و بعد بارگذاری و با ذخیره نمودن این تصاویر، از نمونه‌هایی که با الگوی تصادفی پوشانده شده‌اند، مقایسه صورت می‌گیرد. برای سنجش بهتر، ابتدا نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده شده و سپس بعد از خشک شدن، نقاط سیاه‌رنگ به صورت تصادفی روی نمونه‌ها ایجاد می‌شوند. بعد از انجام این مراحل جابه‌جایی‌ها و مشتقات آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و ارتباط بین عکس‌ها، محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است با استفاده از موقعیت الگوهای تعیین شده عکس اول در عکس‌های بعدی و استخراج مختصات طول و عرض آن‌ها، تابع همبستگی تصاویر دیجیتالی به صورت دنبال کردن به دست می‌آید. ترتیب کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتالی جهت دنبال کردن موقعیت الگوی عکس اول در عکس‌های بعدی نیز بر اساس تطابق میزان شدت نور خاکستری می‌باشد. برای فرآیند انطباق بهتر به جای استفاده از یک پیکسل منفرد، از یک ناحیه با چندین پیکسل استفاده می‌گردد. این ناحیه دارای یک توزیع منحصر به فرد از شدت نور بوده که بعد از فرآیند تغییرشکل، با یافتن ناحیه‌ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییرشکل، جابجایی زیرمجموعه مذکور پیدا می‌شود. همچنین لازم به ذکر است در روش همبستگی تصویر دیجیتالی برای شناسایی توان جابه‌جایی در گستره صدم پیکسل مقادیر شدت نور برای هر پیکسل توسط توابع درون‌یابی می‌شود. مقدار دقیق بودن این روش بستگی به پارامترهایی همانند تعداد پیکسل‌های داخل عکس و اندازه سلول‌های مورد بررسی، تابع درون‌یابی و ... دارد. از مزایای روش همبستگی تصاویر دیجیتالی می‌توان به چیدمان ساده سیستم، اندازه‌گیری پیوسته، دقت بالای روش، حساسیت کمتر به شرایط آزمایش سخت، مانند دمای بالا، فشار بالا و مواد تهاجمی، غیرمخرب بودن و عدم نیاز به تماس به سطح قطعه اشاره نمود.

هر تصویر دیجیتالی شامل یک تعداد ثابت از پیکسل‌هایی است که شامل کوچک‌ترین اجزایی هستند که به صورت کمی نشانگر روشنایی در یک مکان خاص می‌باشند؛ بنابراین، تصاویر دیجیتالی را می‌توان به‌عنوان یک ماتریسی که در آن ورودی‌ها

در حالی که u_Q و v_Q فواصل نقطه $Q' = (x'_Q, y'_Q)$ در جهات x و y از نقطه $Q = (x_Q, y_Q)$ هستند. برای جابجایی صلب، u_Q و v_Q معادل u_0 و v_0 هستند. اگرچه، زیرمجموعه مربوط به عکس تغییر شکل یافته لزوماً با مربع زیرمجموعه عکس مرجع یکسان نیست. عواملی مانند تغییر شکل‌های برشی، چرخشی، فشاری و ... می‌توانند باعث جابجایی زیرمجموعه به صورتی غیر از جسم صلب شوند. در این نمونه، u_Q و v_Q معادل با u_0 و v_0 نیستند؛ بنابراین برای توصیف تغییر شکل زیرمجموعه، توسعه سری تیلور در ترم‌های Δx و Δy می‌تواند بکار گرفته شود. در اینجا فرض می‌شود که Δx و Δy کوچک‌تر از u_Q و v_Q هستند.

$$\begin{cases} u_Q = u_0 + \frac{\partial u_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_0}{\partial y} \Delta y \\ v_Q = v_0 + \frac{\partial v_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v_0}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (۴)$$

بنابراین $Q' = (x'_Q, y'_Q)$ می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{cases} x'_Q = x_Q + u_0 + \frac{\partial u_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_0}{\partial y} \Delta y \\ y'_Q = y_Q + v_0 + \frac{\partial v_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v_0}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (۵)$$

مرکز زیرمجموعه بعد از تغییر شکل، P' ، می‌تواند در ترم-

های u ، v ، $\frac{\partial u}{\partial x}$ ، $\frac{\partial v}{\partial x}$ ، $\frac{\partial u}{\partial y}$ و $\frac{\partial v}{\partial y}$ به صورت زیر بیان شود [۲۴]:

$$\begin{cases} x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (۶)$$

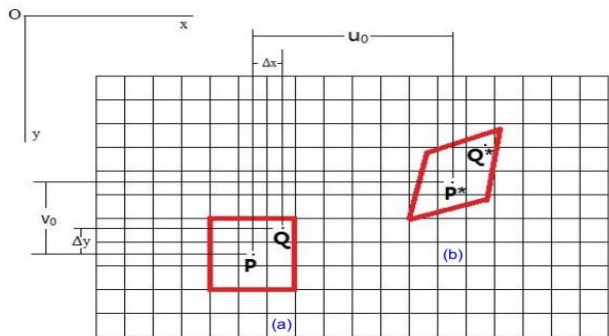
تغییر شکل زیرمجموعه می‌تواند با استفاده از معادله (۶)

توصیف شود که u و v جابجایی پیکسل‌ها در مقدار عدد

صحیح $\frac{\partial u}{\partial x}$ ، $\frac{\partial v}{\partial x}$ ، $\frac{\partial u}{\partial y}$ و $\frac{\partial v}{\partial y}$ شیب جابجایی مربوط به

تغییر شکل پیکسل‌ها هستند. شش پارامتر از طریق الگوریتم

این پروسه نیاز به یک تابع پیچیده دارد، زیرا شکل زیرمجموعه در عکس تغییر شکل یافته ممکن است تحت تغییر شکل شدیدی به خاطر چرخش، برش، کشش، فشار و ... قرار گرفته باشد. در این پژوهش، به منظور دنبال کردن جابجایی و تغییر شکل در هر زیرمجموعه، یک مدل ریاضیات توسعه یافته است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، $P(x_0, y_0)$ و $P'(x'_0, y'_0)$ در مرکز زیرمجموعه قبل (a) و بعد از تغییر شکل (b) هستند.



شکل ۳ - زیرمجموعه قبل (a) و بعد (b) از تغییر شکل [۲۴]

جابجایی P به عنوان u در جهت x و v در جهت y ارائه شده است؛ بنابراین معادله‌های زیر می‌تواند بکار برده شوند [۲۴]:

$$\begin{cases} x'_0 = x_0 + u_0 \\ y'_0 = y_0 + v_0 \end{cases} \quad (۱)$$

اکنون نقطه $Q(x, y)$ که یک نقطه رندوم در زیرمجموعه می‌باشد و مختصات آن بر اساس نقطه P می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۴]:

$$\begin{cases} x_Q = x_0 + \Delta x \\ y_Q = y_0 + \Delta y \end{cases} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، Δx و Δy فواصل نقطه Q در جهات x و y از نقطه P هستند. بعد از تغییر شکل نقطه $Q = (x_0, y_0)$ به نقطه $Q' = (x'_0, y'_0)$ حرکت می‌کند [۲۴].

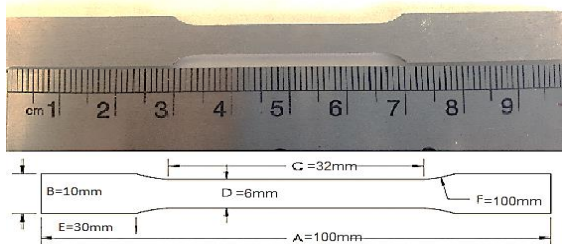
$$\begin{cases} x'_Q = x_Q + u_Q \\ y'_Q = y_Q + v_Q \end{cases} \quad (۳)$$

در معادلات بالا، \bar{f} متوسط مقدار شدت زیرمجموعه مرجع، \bar{g} متوسط مقدار شدت از زیرمجموعه‌های تغییر شکل، m پهنای زیرمجموعه در پیکسل، u_0 و v_0 تغییر شکل از مرکز زیرمجموعه در جهات x و y است.

روش تحقیق

آزمایش کشش تک‌محوره

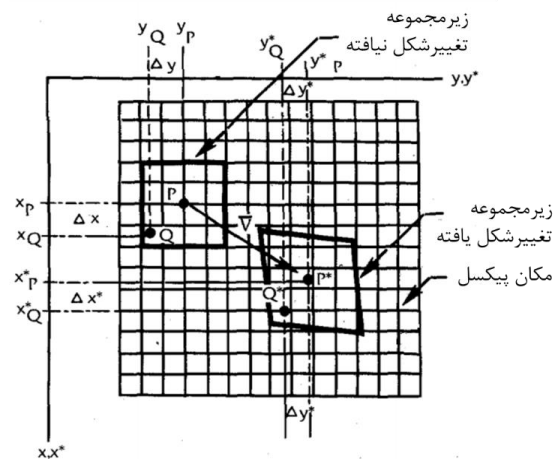
به منظور بررسی خواص الاستیک و پلاستیک، ورق میزیم با ابعادی مطابق شکل ۵ و با استفاده از وایرکات به صورت دمبلی شکل بریده شد. سپس برای آماده‌سازی نمونه-ها، ابتدا سطح آن‌ها توسط سمباده‌هایی با زبری متفاوت به شرایط مطلوب (سطح صاف بدون پستی و بلندی) تبدیل گردید. بعد اسپره سفید با فاصله مناسب و با ضخامت کم روی سطح آماده‌سازی شده پوشش داده شد. بعد از خشک شدن این ناحیه خال‌های سیاه با استفاده از مسواک به روی سطح موردنظر و به صورت تصادفی و بر اساس ابعاد نمونه ایجاد شد. لازم به ذکر است که این مرحله در دقت کار و تعیین پارامترهای اندازه زیرمجموعه تأثیر مهمی دارد. سپس از هر نمونه با زاویه نوردهای ۰، ۴۵ و ۹۰ هر کدام ۴ نمونه ساخته شده که مراحل آماده‌سازی آن‌ها مطابق شکل ۶ می‌باشد.



شکل ۵ - نمونه تست کشش با ابعاد (همه ابعاد به میلی‌متر هستند)

بعد از آماده‌سازی سطح، آزمون کشش در دمای اتاق با استفاده از دستگاه کشش گوتمک با ظرفیت ۱۵۰ کیلو نیوتن و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. سپس اندازه‌گیری کرنش در جهات عرضی و طولی، با استفاده از سیستم DIC دوبعدی مطابق با شکل ۷ استفاده گردید. برای ثبت تصاویر از دوربین DMK 33UX264 با رزولوشن ۲۴۸۸*۲۰۴۸ پیکسل با تنظیم لنز کامپیوتر با فاصله کانونی ۷۵ میلی‌متر استفاده شد.

تنظیم شده‌اند تا منطقه‌ای را که در تصویر تغییر شکل یافته بهترین تطابق با زیرمجموعه عکس مرجع دارد، پیدا کند [۲۴]. هر پیکسل نشان‌دهنده یک نقطه است که توسط چهار گره احاطه شده است. به دلیل کوچک بودن ابعاد پیکسل می‌توان از روابط مکانیک محیط پیوسته و معادلات حاکم بر آن برای یک پیکسل استفاده کرد. جابجایی و کرنش برای پیکسلی که در مرکز هر زیرناحیه قرار دارد به دست می‌آید. شکل ۴ برای این هدف نشان داده شده است. اگر P و Q دو نقطه از عکس قبل از بارگذاری باشند، P^* و Q^* نقاط متناظر آن‌ها در عکس بعد از بارگذاری هستند



شکل ۴ - زیرناحیه قبل و بعد از بارگذاری [۲۵]

از معادله (۷) به عنوان تابع همبستگی برای تطبیق استفاده می‌شود. جابجایی مرکز زیرمجموعه پیکسل‌ها هنگامی که بهترین تطابق را شناسایی می‌کند، ثبت می‌شود. میدان‌های کرنش از گرادیان میدان‌های جابجایی با استفاده از یک روش تمایز عددی از معادلات (۸) و (۹) به دست می‌آید [۱۷].

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j - \bar{f})][g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j - \bar{f})]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \quad (7)$$

$$x' = x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial x} dy \quad (8)$$

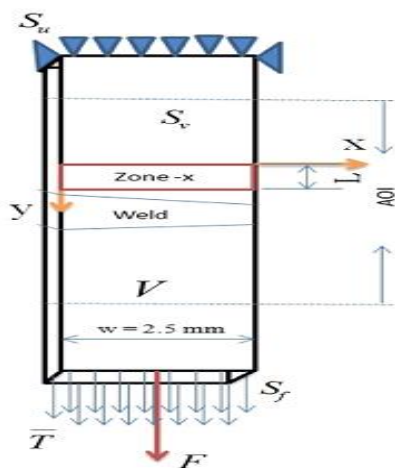
$$y' = y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial x} dy \quad (9)$$

معادلات تعادلی موضعی و میدان‌های جابه‌جایی مجازی و قابل‌قبول جنبشی است، استفاده می‌گردد. شکل ۸، نمودار شرایط بارگذاری و مرزی نمونه تست کشش را نشان می‌دهد. منطقه موردنظر (AOI) در شکل ناحیه‌ای است که مقادیر کرنش توسط روش همبستگی تصاویر دیجیتال اندازه‌گیری شده است. پارامترهای شناخته شده، نیروی عکس‌العمل F و توزیع کرنش روی منطقه موردنظر می‌باشد.

معادله شکل ضعیف شده از مشتق معادله تعادلی با استفاده از اصل کار مجازی، در معادله (۱۰) نشان داده شده است [۲۰].

$$\int_V \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dv + \int_{S_f} \bar{T}_i u_i^* ds + \int_V b_i u_i^* dv = \int_V \rho a_i u_i^* dv \quad (10)$$

به علت این که حجم و نیروهای اینرسی سهم ناچیزی نسبت به کل کار انجام شده دارند، بنابراین می‌توان معادله (۱۰) را به صورت معادله (۱۱) ساده نمود.



شکل ۸ - نمودار شرایط بارگذاری و مرزی نمونه تست کشش [۲۰]

$$\int_V \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dv = \int_{S_f} \bar{T}_i u_i^* ds \quad (11)$$

با فرض اینکه هیچ نوع تغییر تنشی در امتداد ضخامت نداریم (در شرایط تنش صفحه‌ای که حالت تنش دوبعدی است)، معادله (۱۱) به معادله (۱۲) تغییر می‌یابد [۲۰].

$$b \int_{S_v} \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dS_v = b \int_w \bar{T}_i u_i^* dw \quad (12)$$



شکل ۶ - مراحل آماده‌سازی نمونه الف - نمونه پس از سنباده‌زنی ب - اسپره سفید ج - ایجاد الگوی تصادفی

در این تحقیق برای انجام کالیبراسیون پس از تنظیمات و تراز نمودن دوربین به روی عکس مرجع و با قرار دادن یک شاخص در ناحیه موردنظر انجام گردید. همچنین پس از انجام آزمایش کالیبراسیون از طریق فاصله مشخص شده (مثلاً L) در تصویر مرجع و از طریق رابطه:

$$\text{طول ناحیه مشخص شده} = \frac{\text{تعداد پیکسل‌ها}}{\text{مقدار هر پیکسل (میلی متر)}}$$

قابل محاسبه برای نرم‌افزار بود.



شکل ۷ - راه‌اندازی آزمون کشش همراه با تجهیزات همبستگی تصاویر دیجیتال



محاسبات تئوری

روش میدان مجازی

در این تحقیق برای استخراج پارامترها، از روش میدان مجازی که بر اساس اصل کار مجازی است و شکل ضعیف شده از

در معادله (۱۲) پارامتر b نشان‌دهنده ضخامت نمونه می‌باشد. همچنین نیروی عکس‌العمل F مربوط به زمان t_i می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$b \int_w \bar{T}_i dw = F(t_i) \quad (13)$$

نهایتاً، با قرار دادن معادله (۱۳) در معادله (۱۲)، معادله (۱۴) حاصل می‌گردد [۲۰].

$$\frac{1}{b} F(t_i) u_i^* = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\int_{S_v} \varepsilon_{xx} \varepsilon_{xx}^* dS_v + \int_{S_v} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{yy}^* dS_v \right) + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \left(\int_{S_v} \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy}^* dS_v + \int_{S_v} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{xx}^* dS_v \right) + \frac{E}{1+\nu} \left(\int_{S_v} \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xy}^* dS_v \right) \quad (16)$$

$$\int_{S_v} \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) u_i^* \quad (14)$$

زمانی که توزیع کرنش از روش همبستگی تصاویر یک تابع پیوسته بر روی سطح نیست، اما در نقاط گسسته به نام مرکز زیرمجموعه پیکسل دارای مقدار می‌باشند، معادله (۱۶) تبدیل به معادله (۱۷) می‌شود. در معادله (۱۷)، N تعداد نقاط داده‌ها در منطقه موردبررسی است [۲۶].

محاسبه پارامترهای الاستیک

در الاستیسیته، با فرض اینکه ماده ایزوتروپ است، مدول یانگ و نسبت پواسون را می‌توان با استفاده از دو میدان مجازی مختلف شناسایی کرد [۱۶]. در این تحقیق، برای استخراج دو ثابت الاستیک یعنی مدول یانگ و نسبت پواسون، از معادله (۱۴) استفاده شد. این مقادیر شناخته شده از تست کشش کرنش‌سنج بر روی سطح S_v و نیروی عکس‌العمل $F(t_i)$ محاسبه می‌گردد. به منظور معرفی پارامترهای ناشناخته و کرنش واقعی، از تکنیک روش همبستگی تصاویر و با استفاده از معادله (۱۴) اندازه‌گیری می‌شود. برای نائل شدن به این هدف تانسور تنش با پارامترهای داده شده در معادله (۱۵) جایگذاری می‌شود. باید توجه شود که فرض تنش صفحه‌ای در این حالت بکار برده شده است و کرنش ε_{ij} ، کرنش واقعی اندازه‌گیری شده روی سطح S_v با استفاده از تکنیک روش همبستگی تصاویر اندازه‌گیری می‌شود [۲۶].

$$\frac{1}{b} F(t_i) u_i^* = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{xx} \varepsilon_{xx}^* \Delta S_v + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{yy} \varepsilon_{yy}^* \Delta S_v \right) + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy}^* \Delta S_v + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{yy} \varepsilon_{xx}^* \Delta S_v \right) + \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xy}^* \Delta S_v \right) \quad (17)$$

انتخاب دو میدان جابجایی مجازی مستقل منجر به دو معادله مستقل خطی می‌شود. سرانجام پارامترهای ناشناخته E و ν با حل این سیستم معادلات استخراج می‌شود.

محاسبه پارامترهای پلاستیک

زمانی که در اثر بارگذاری اعمالی رفتار کرنش به صورت غیرخطی است، ناحیه موردنظر در منطقه پلاستیک واقع شده و در این حالت امکان استخراج پارامترهای موردنیاز برای روش میدان مجازی، با استفاده از روش کرنش و داده‌های نیرو همانند حالت الاستیک وجود ندارد. در سطوح بار مختلف غیرخطی، سیستم مستقل معادلات حتی در برابر یک واحد انتخاب میدان جابجایی مجازی افزایش خواهد یافت. از این ویژگی گریاک و همکاران [۲۷] برای استخراج پارامترهای تشکیل‌دهنده موردنیاز در حالت پلاستیک استفاده نمودند. در

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{1+\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (15)$$

اکنون معادله (۱۴) را می‌توان به شکل معادله (۱۶) تبدیل نمود. معادله (۱۶) شامل متغیرهای ناشناخته کرنش‌های واقعی اندازه‌گیری شده بر روی سطح S_v ، نیروی عکس‌العمل

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K \left(\varepsilon_{yy} - \left(\frac{\sigma_{ys}}{E} \right) \right)^n \Delta S_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \quad (20)$$

در معادله (۲۰) پارامترهای معلوم مدول یانگ، N ، ε_{yy} ، ΔS_v ، $F(t_i)$ ، L و b می‌باشند. همچنین برای محاسبه پارامترهای ناشناخته (k, n, σ_{ys}) یک تابع مقدار همان‌طور که در رابطه (۲۱) نشان داده شده، توسعه داده شده است [۲۶].

$$f = \sum_{t_1}^{t_n} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K \left(\varepsilon_{yy} - \left(\frac{\sigma_{ys}}{E} \right) \right)^n \Delta S_v - \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \right]^2 \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) تا t_1 تا t_n گام‌های بارگذاری در منطقه تغییرشکل پلاستیک می‌باشند.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به منظور صحت‌سنجی، اندازه‌گیری ارزیابی خواص مواد به روش همبستگی تصاویر دیجیتال، مطابق شکل ۹ نمودار تنش- کرنش حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با نمودار تنش- کرنش حاصل از تست کشش ترسیم و مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از این دو نمودار وجود دارد.

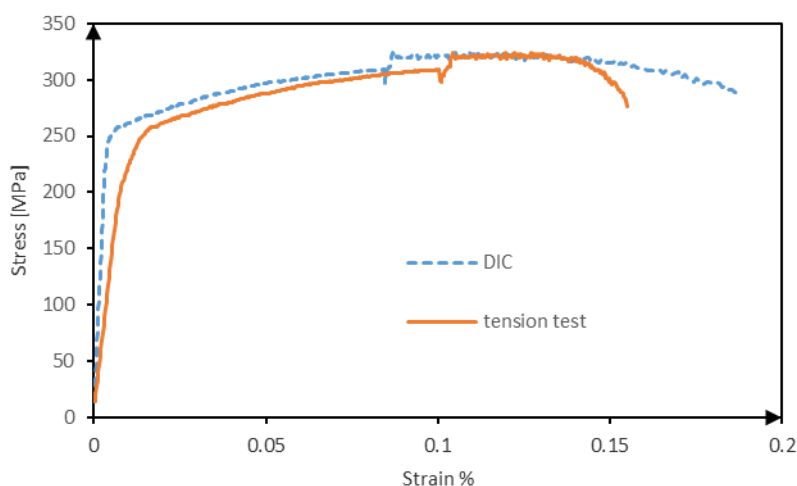
این تحقیق برای محاسبه پارامترهای ناشناخته، از روابط استفاده شده توسط رحمت‌آبادی و همکاران [۲۰] استفاده گردیده است. آن‌ها پس از قرار دادن میدان جابه‌جایی مجازی و کرنش مجازی مربوط به آن در معادله (۱۴)، معادله (۱۸) را به صورت زیر محاسبه نمودند.

$$\int_{S_v} \sigma_{ij} dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \quad (18)$$

اکنون با قرار دادن σ_{ij} در مدل ماده $\sigma_{yy} = K \left(\varepsilon_{yy} - \left(\frac{\sigma_{ys}}{E} \right) \right)^n$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\int_{S_v} K \left(\varepsilon_{yy} - \left(\frac{\sigma_{ys}}{E} \right) \right)^n dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \quad (19)$$

با توجه به این که در روش همبستگی تصویر دیجیتال داده‌های کرنش به صورت پیوسته استخراج نمی‌شود و با توجه به اندازه گام انتخاب شده این داده‌ها به دست می‌آید، بنابراین انتگرال در معادله (۱۹) به صورت یک مجموعه سری و معادله (۲۰) تبدیل می‌شود که N تعداد داده‌های کرنش در منطقه موردنظر بررسی می‌باشد [۲۶].



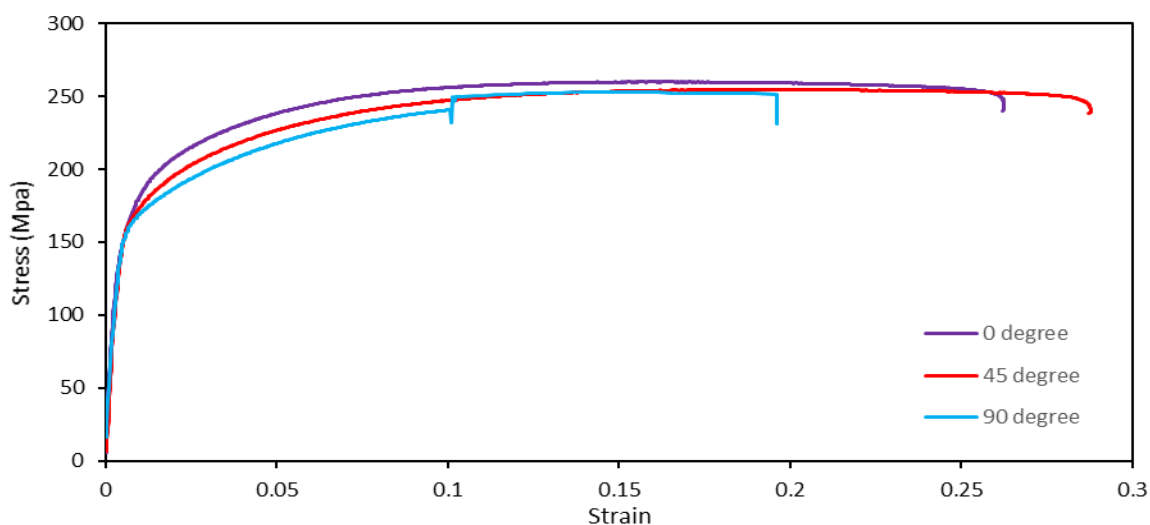
شکل ۹- نمودار تنش- کرنش مهندسی به دست آمده با استفاده از دو روش

استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ گویاست برای نمونه‌های مختلف با جهات نورد متفاوت مقادیر تنش تسلیم، درصد تغییر

سپس تست کشش به روی آلیاژ منیزیم در جهات نورد مختلف انجام شد و نتایج این آزمایش در سه جهت نورد مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقادیر کرنش با

از دو روش تنش یکنواخت و میدان مجازی برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شده است و در جداول ۱ و ۲ این نتایج ارائه شده است.

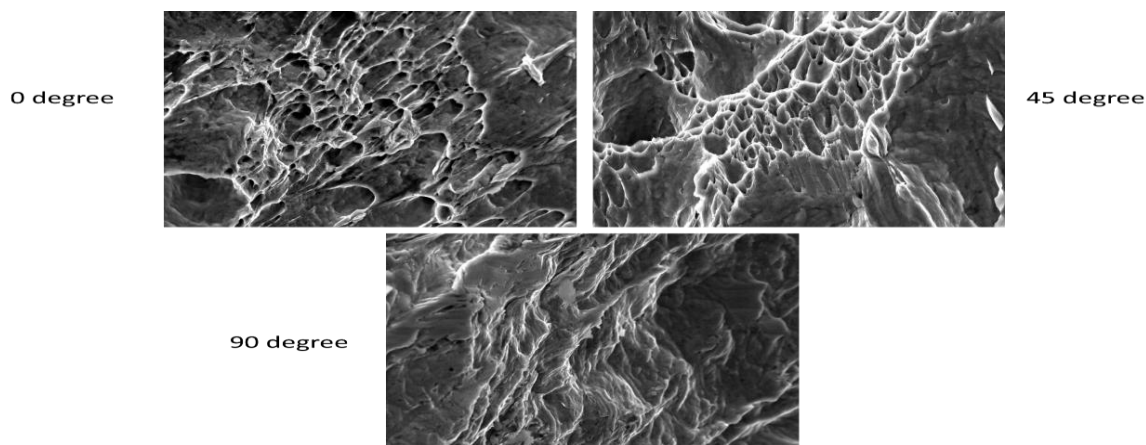
شکل و مدول یانگ متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۱۰ گویاست نمونه‌ی با جهت نورد ۴۵ بیشترین درصد تغییر شکل را قبل از شکست دارد. خواص الاستیک و پلاستیک با استفاده



شکل ۱۰ - نمودار تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌های مختلف

برابر قوانین دایره مور و انتقال تنش به صفحه برشی مسئله قابل بررسی می‌شود. فلزات در این حالت بیشتر تغییر شکل- های برشی و لغزش کریستال‌ها را در زاویه ۴۵ درجه بیشتر تجربه می‌کنند و کرنش محوری مشاهده شده به صورت پلاستیک بیشتر خواهد شد.

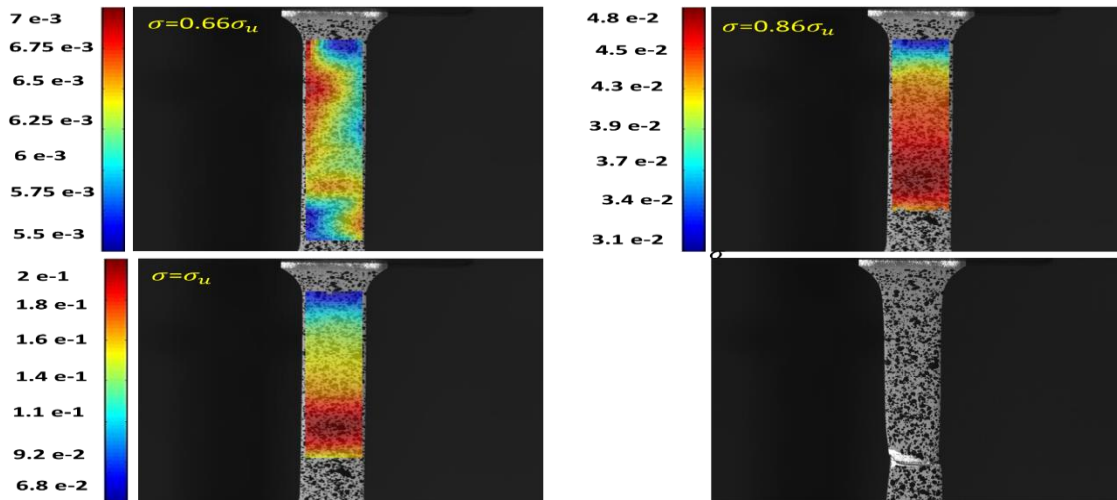
مقدار کرنش طولی برای نمونه با جهت ۴۵ درجه بیشترین مقدار را قبل شکست نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است که تصاویر میکروسکوپ^۹ از سطح شکست نیز برای این نمونه بیشترین حفره^{۱۰} را مطابق شکل ۱۱ نشان می‌دهد. علت این موضوع را می‌توان به این صورت تفسیر نمود وقتی زاویه نورد با جهت کشش، زاویه ۴۵ درجه داشته باشد در این صورت



شکل ۱۱ - تصاویر شکست از نمونه‌های با زوایای نورد مختلف

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تمرکز کرنش در محل شکست قبل از وقوع شکست به خوبی شناسایی شده است.

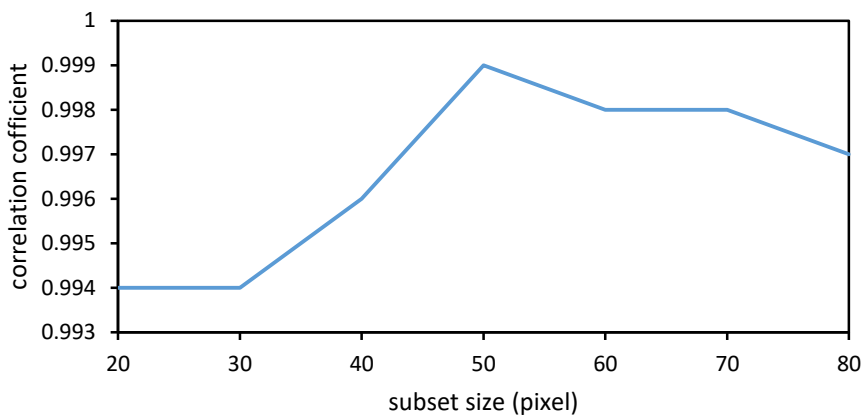
توزیع کرنش طولی در شرایط بارگذاری مختلف برای نمونه با جهت نورد ۴۵ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که



شکل ۱۲ - کرنش طولی در شرایط بارگذاری مختلف

شد انتخاب مناسب مجموعه پیکسل‌ها، تابع رزولوشن تصویر، میدان دید و اندازه خال‌های ایجاد شده روی نمونه مهم است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، اندازه زیرمجموعه ۵۱ با بیشترین ضریب همبستگی برای این نمونه‌ها و شرایط آزمایش همراه بوده است.

در این تحقیق همچنین تأثیر اندازه زیرمجموعه بر روی ضریب همبستگی نیز بررسی شده است. از آنجایی که این روش بر اساس ردیابی شدت نور یک مجموعه از پیکسل‌ها عمل می‌کند، بنابراین انتخاب مناسب این مجموعه پیکسل‌ها در دقت آزمایش اهمیت پیدا می‌کند. همان‌طور که پیش از این نیز ذکر



شکل ۱۳ - آنالیز تأثیر اندازه زیرمجموعه بر روی ضریب همبستگی

همچنین برای استخراج پارامترهای پلاستیک با استفاده از روش میدان مجازی از معادله (۲۲) و بر اساس الگوریتم ژنتیک و حدس مقادیر اولیه انجام شده است که برای این کار یک برنامه در نرم‌افزار متلب بر اساس بهینه‌سازی نوشته شده است که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است [۲۶].

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (21)$$

$$f = \sum_{t_1}^{t_n} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K(\varepsilon_{yy} - \frac{\sigma_{ys}}{E})^n \Delta S_v - \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \right]^2 \quad (22)$$

مقدار کرنش در راستای عرض و طول نمونه در حین آزمون کشش و با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شده است. برای به دست آوردن کرنش در راستای ضخامت از رابطه ثابت بودن حجم (معادله (۱۲)) در تغییر شکل پلاستیک استفاده می‌شود. در شکل ۱۴، نمودار تنش کرنش برای ورق‌های منیزیم در جهات نورد مختلف همچنین برای کرنش در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کرنش اعمالی در ناحیه الاستیک و شیب آن تقریباً یکسان بوده و با افزایش بار اعمالی و ورود به ناحیه پلاستیک اختلاف کرنش در جهات مختلف افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن، وجود ناهمسانگردی تقریباً زیاد در نمونه به دلیل عملیات نورد است.

جدول ۳- پارامترهای پلاستیک به دست آمده با استفاده از کرنش

سطحی روش همبستگی تصاویر دیجیتال و تئوری VFM		
ماده	توان کارسختی	ضریب استحکام (MPa)
جهت نورد صفر درجه	۰/۱۳۱	۳۵۶
جهت نورد ۴۵ درجه	۰/۱۳۸	۳۶۲
جهت نورد ۹۰ درجه	۰/۱۴۳	۳۷۱

مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون برای نمونه‌های مختلف در جدول ۱ داده شده است. با توجه به این که این روش از رزولوشن و دقت اندازه‌گیری بسیار بالایی برخوردار است می‌تواند تغییر شکل‌های بسیار کوچک در ناحیه الاستیک را شناسایی نموده و مقادیر مدول یانگ قابل قبولی را عرضه کند. همچنین با توجه به ویژگی منحصربه‌فرد این روش که قادر به اندازه‌گیری کرنش عرضی نیز در حین تست می‌باشد مقادیر ضریب پواسون که از تقسیم کرنش عرضی بر کرنش طولی به دست می‌آید نیز در جدول ۱ برای نمونه‌های مختلف گزارش شده است. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۱، مقدار مدول الاستیسیته به دست آمده برای جهات مختلف نورد به هم نزدیک بوده است. به همین ترتیب مقادیر ضرایب پواسون نیز برای هر سه نمونه تقریباً یکسان است.

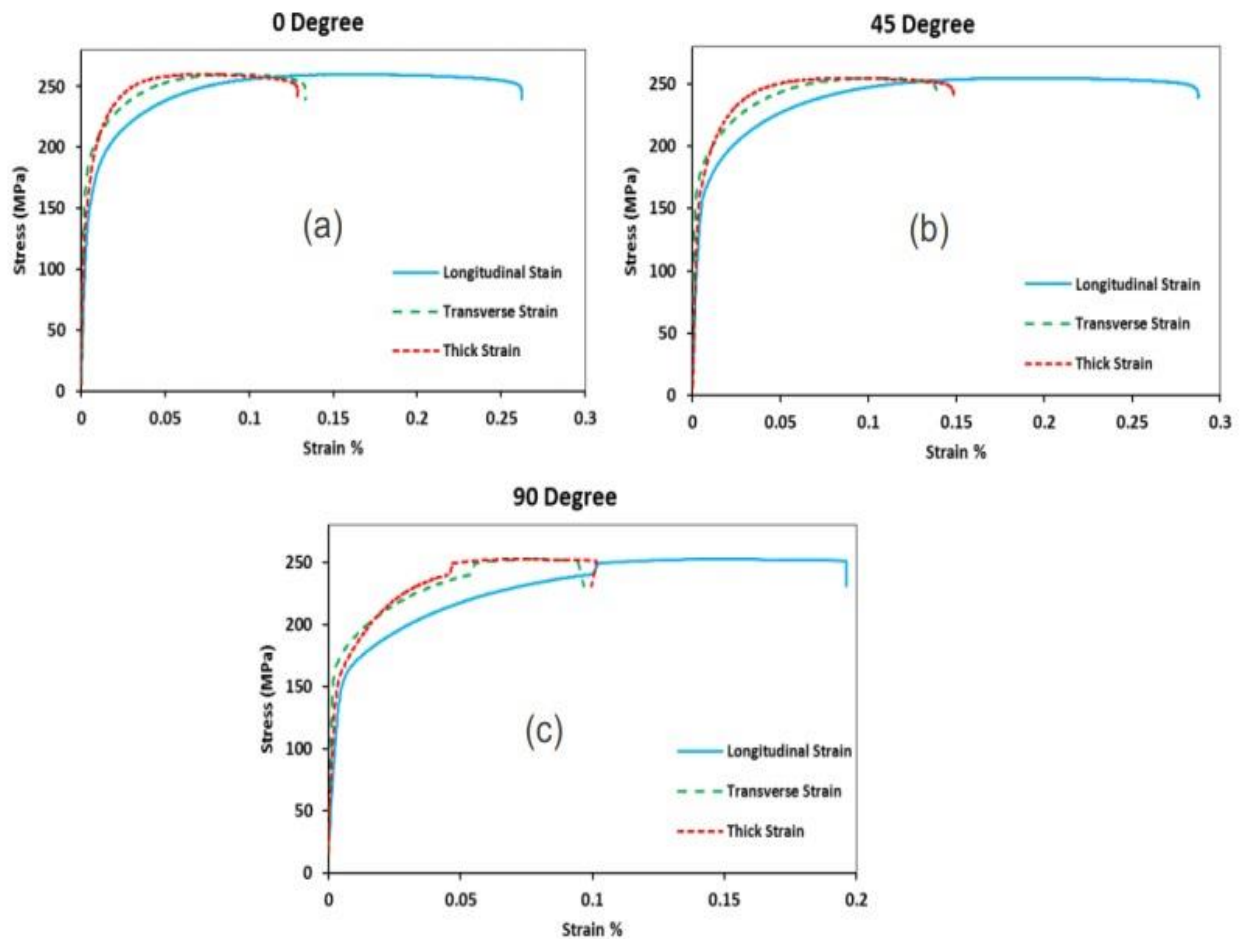
جدول ۱ - پارامترهای الاستیک محاسبه شده با همبستگی تصاویر

دیجیتال		
ماده	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
جهت نورد صفر درجه	۴۱/۷۹	۰/۳۵۳
جهت نورد ۴۵ درجه	۳۷/۵۲	۰/۳۴۵
جهت نورد ۹۰ درجه	۳۳/۴۳	۰/۳۲۸

برای استخراج پارامترهای پلاستیک با استفاده از روش تنش یکنواخت، با برازش نمودار حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال مطابق جدول ۲ رفتار مواد در حالت پلاستیک، (معادله (۲۱)) مقادیر استخراج شده است. این کار با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است.

جدول ۲- پارامترهای پلاستیک به دست آمده با استفاده از کرنش

سطحی روش همبستگی تصاویر دیجیتال و تئوری USM		
ماده	توان کارسختی	ضریب استحکام (MPa)
جهت نورد صفر درجه	۰/۱۲۴	۳۴۰
جهت نورد ۴۵ درجه	۰/۱۳۴	۳۳۵
جهت نورد ۹۰ درجه	۰/۱۴۹	۳۵۴



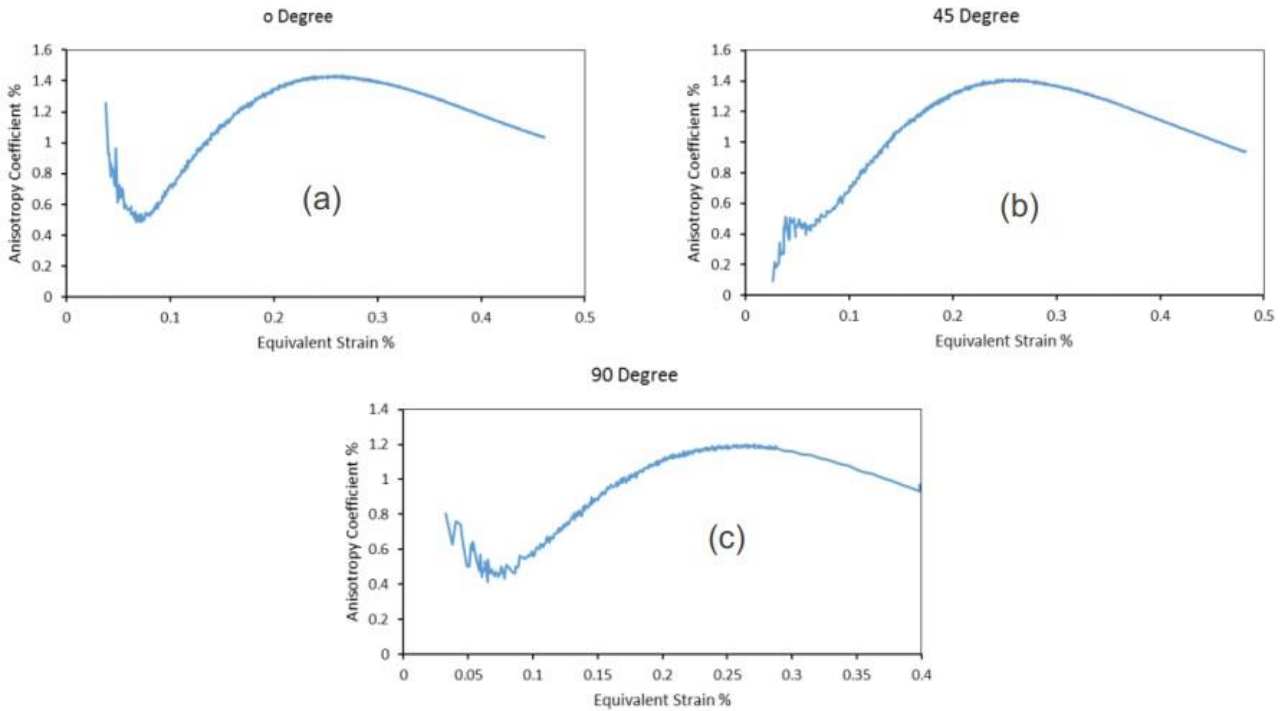
شکل ۱۴ - نمودارهای تنش کرنش مهندسی در کرنش‌های مختلف طولی، عرضی و ضخامتی برای ورق‌های منیزیم در جهات مختلف نورد در (a) زاویه 0 درجه، (b) زاویه 45 درجه، (c) زاویه 90 درجه

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_l + \varepsilon_w)} \quad (24)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_w^2 + \varepsilon_l^2 + \varepsilon_t^2)} \quad (25)$$

ضریب ناهمسانگردی در ورق‌ها مطابق با معادله (۲۴) به صورت نسبت کرنش پلاستیک در راستای عرض به کرنش پلاستیک در ضخامت تعریف می‌شود. در شکل ۱۵، مقدار ناهمسانگردی پلاستیک بر حسب کرنش مؤثر برای منیزیم ۴۵ درجه ارائه شده است. برای محاسبه کرنش مؤثر از معادله (۲۵) استفاده شده است. [۲۸]

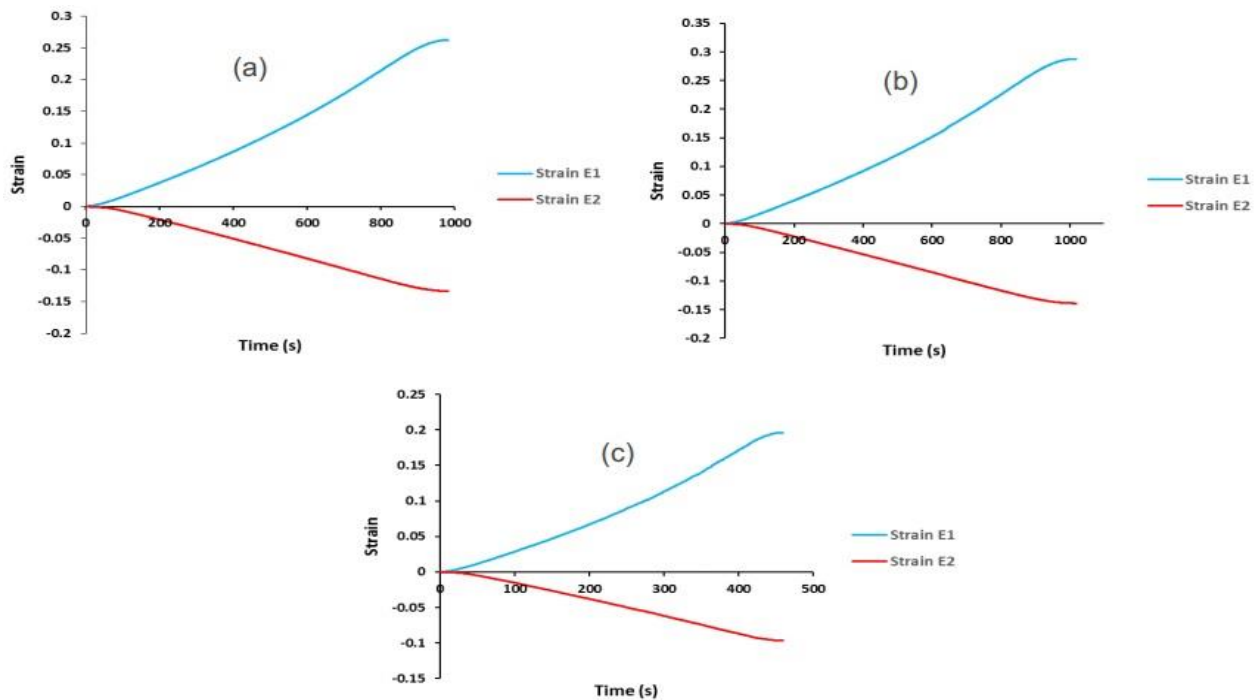
$$\varepsilon_l + \varepsilon_t + \varepsilon_w = 0 \quad , \quad \varepsilon_t = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w) \quad (23)$$



شکل ۱۵ - تغییرات ناهمسانگردی بر حسب کرنش مؤثر در حین آزمون کشش تک‌محوره برای ورق‌های منیزیم در جهات مختلف نورد در (a) زاویه 0 درجه، (b) زاویه 45 درجه، (c) زاویه 90 درجه

مقادیر کرنش عرضی تقریباً نصف مقادیر کرنش طولی برای نمونه‌ای مختلف است که تأییدی بر رابطه فون میسر نیز می‌باشد.

در شکل ۱۶ مقادیر کرنش عرضی و طولی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و برای همه نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ نمایان است



شکل ۱۶ - مقادیر کرنش طولی و عرضی برای نمونه‌های مختلف بر حسب زمان. (a) زاویه 0 درجه، (b) زاویه 45 درجه، (c) زاویه 90 درجه

به نتایج محاسبه شده، نتایج این تحقیق کلیه موارد لازم برای طراح در مراحل شبیه‌سازی، طراحی و ساخت این ورق‌ها در قسمت‌های مختلف یک سازه هوایی را فراهم می‌کند. برخی از نتایج مهم در زیر خلاصه شده است.

- مقدار ازدیاد طول مهندسی و واقعی در هر سه جهت طول، عرض، ضخامت و کرنش مؤثر با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه گردید و نتایج نشان داد که به دلیل ناهمسانگردی پلاستیک ناشی از فرآیند نورد، مقادیر کرنش در جهات مختلف اختلاف دارد. نهایتاً نمودار ضریب ناهمسانگردی بر حسب کرنش مؤثر ترسیم و نتایج آن نشان داد که مقدار ناهمسانگردی در حین آزمون کشش تک‌محوره تا نقطه گلویی افزایش می‌یابد و کمی پس از آن، با افزایش کرنش تا نقطه‌ی شکست روند کاهشی دارد.
- مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون برای نمونه‌های با جهت نورد صفر تا ۹۰ درجه با کاهش روبرو بوده است.
- نمونه با جهت نورد ۴۵ درجه بیشترین الانگیشن را قبل شکست از خود نشان داده همچنین تصاویر میکروسکوپ SEM نیز برای این نمونه بیشترین *dimple* را نشان می‌دهد که در توافق با تست تجربی می‌باشد.
- ضریب کرنش سختی برای نمونه‌های از صفر تا ۹۰ درجه با افزایش همراه بوده است

پی‌نوشت‌ها

- 1 Die casting
- 2 bilinear
- 3 Newton-Raphson
- 4 coarse-fine search
- 5 Digital image correlation (DIC)
- 6 global
- 7 Using uniform stress (USM)
- 8 Virtual field methods (VFM)
- 9 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 10 dimple

منابع و مراجع

- [1]. Esmaily, M., Svensson, J.E., Fajardo, S., Birbilis, N., Frankel, G.S., Virtanen, S., Arrabal, R., Thomas, S., Johansson, L.G., "Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion", Progress in Materials Science, Vol. 89, pp.92-193, 2017
- [2]. Tan, J., Ramakrishna, S., "Applications of Magnesium and Its Alloys: A Review",

فهرست علائم

b	ضخامت نمونه (mm)
E	مدول یانگ (GPa)
F	نیرو (N)
r	ضریب ناهمسانگردی
S_f	ناحیه اعمال شرایط مرزی (mm^2)
S_v	ناحیه اندازه‌گیری کرنش سطحی (mm^2)
u_0	جابجایی در جهت x (mm)
u_i^*	میدان جابجایی مجازی (mm)
v_0	جابجایی در جهت y (mm)
w	عرض نمونه (mm)

علائم یونانی	
ϵ_{ij}	کرنش
ϵ_{ij}^*	تانسور کرنش مجازی
$\bar{\epsilon}$	کرنش مؤثر
ϵ_l	کرنش طولی
ϵ_t	کرنش ضخامتی
ϵ_w	کرنش عرضی
σ_{ij}	تانسور تنش (MPa)
σ_y	تنش تسلیم (MPa)
σ_{UTS}	تنش کششی نهایی (MPa)
ν	ضریب پواسون

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا ورق‌های منیزیم AZ31 مطابق با استاندارد ASTM-E8 توسط دستگاه وایرکات تهیه گردید. سپس برای اولین بار، پارامترهای الاستیک و پلاستیک، ضریب ناهمسانگردی و منحنی تنش و کرنش در جهت‌های مختلف (طول و عرض با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، ضخامت با استفاده از روابط حجم ثابت در حین تغییر شکل) برای این ورق‌ها با استفاده از روش نوین همبستگی تصاویر دیجیتال اندازه‌گیری شد. سپس خواص الاستیک و پلاستیک با استفاده از داده‌های روش همبستگی تصاویر دیجیتال و دستگاه کشش و با توجه به تئوری مکانیک تجربی مانند روش میدان مجازی و تنش یکنواخت برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری گردید که بین این دو تئوری توافق خوبی مشاهده شد. با توجه

- Marine applications*", Materials & Design, Vol. 59, pp. 323-32, 2014
- [15]. Leitão, C., Galvão, I., Leal, R.M., Rodrigues, D.M., "Determination of local constitutive properties of aluminium friction stir welds using digital image correlation", Materials & Design, Vol. 33, pp. 69-74, 2012
- [16]. Le Louëdec, G., Pierron, F., Sutton, M.A., Reynolds, A.P., "Identification of the local elasto-plastic behavior of FSW welds using the virtual fields method", Experimental Mechanics, Vol. 53, No. 5, pp. 849-859, 2013
- [17]. Saranath, K., Sharma, A., Ramji, M., "Zone wise local characterization of welds using digital image correlation technique", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 63, pp. 30-42, 2014
- [18]. Saranath. KM., "Zone Wise Local Characterization of Welds Using Digital Image Correlation: Uniform Stress and Virtual Fields Method", PhD diss., Indian Institute of Technology, Hyderabad, 2014.
- [19]. Jeong, G.Y., Park, M.J., "Evaluate orthotropic properties of wood using digital image correlation", Construction and Building Materials, Vol. 113, pp. 864-869, 2016
- [۲۰]. رحمت‌آبادی، داود، شاه‌میرزالی، علی، فراهانی، محمدرضا، هاشمی، رامین "ارزیابی خواص الاستیک و پلاستیک ورق آلومینیوم تولیدشده با فرآیند پیوند سرد نوردی به روش همبستگی تصاویر دیجیتال"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، سال نوزدهم، شماره دوم، صفحات ۵۱۳-۵۰۵، ۱۳۹۷.
- [21]. Sánchez-Arévalo, F.M., Pulos, G., "Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials", Materials Characterization, Vol. 59, pp. 1572-1579, 2008
- [22]. Tang, Z., Liang, J., Xiao, Z., Guo, C., "Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method", Optics and lasers in engineering, Vol. 50, pp. 122-130, 2012
- [23]. Orell, O., Vuorinen, J., Jokinen, J., Kettunen, H., Hytönen, P., Turunen, J., Kanerva, M. "Characterization of elastic constants of anisotropic composites in compression using digital image correlation", Composite Structures, Vol. 185, pp. 176-185, 2018
- [24]. Zhang, K., "Digital image correlation analysis of alkali silica reaction in concrete Applied Sciences, Vol. 11, No. 15, pp. 6861, 2021
- [3]. Avedesian, M.M., Baker, H., "ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys", ASM Int Mater Park OH, 1999
- [4]. Kainer, K.U., "Magnesium alloys and their applications", 2006
- [5]. Mordike, B.L., Ebert, T., "Magnesium properties - applications - potential", Mater Sci Eng A, Vol. 302, pp. 37-45, 2001
- [6]. Wang, R.M., Eliezer, A., Gutman, E., "Microstructures and dislocations in the stressed AZ91D magnesium alloys", Materials Science and Engineering: A, Vol. 344, No. 1-2, pp.279-287, 2003
- [7]. Mordike, B.L., Ebert, T., "Magnesium: Properties-applications-potential", Materials Science and Engineering: A, Vol. 302, No. 1, pp. 37-45, 2001
- [8]. Nguyen, V.T., Kwon, S.J., Kwon, O.H., Kim, Y.S., "Mechanical properties identification of sheet metals by 2D-digital image correlation method", Procedia engineering, Vol. 184, pp. 381-389, 2017
- [9]. Peters, W., Ranson, W., "Digital imaging techniques in experimental stress analysis", Optical engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 213-427, 1982
- [10]. Tong. W., "Formulation of Lucas-Kanade digital image correlation algorithms for non-contact deformation measurements: a review", Strain, Vol. 49, No. 4, pp. 313-334, 2013
- [11]. Reynolds, A.P., Duvall, F., "Digital image correlation for determination of weld and base metal constitutive behavior", Welding Journal-New york, Vol. 78, pp. 355-s, 1999
- [12]. Genevois, C., Deschamps, A., Vacher, P., "Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds", Materials Science and Engineering: A, Vol. 415, No. 1-2, pp. 162-170, 2006
- [13]. Brown, R., Tang, W., Reynolds, A.P., "Multi-pass friction stir welding in alloy 7050-T7451: Effects on weld response variables and on weld properties", Materials Science and Engineering: A, Vol. 513, pp. 115-121, 2009
- [14]. Feistauer, E.E., Bergmann L.A., Barreto, L.S., Dos Santos, J.F., "Mechanical behaviour of dissimilar friction stir welded tailor welded blanks in Al-Mg alloys for

- [27]. Grédiac, M., Toussaint, E., Pierron, F., “*Special Virtual Fields for the Direct Determination of Material Parameters with the Virtual Fields Method. 1-Principle and Definition*”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, No. 10, pp. 2691-2705, 2002
- [28]. Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M., Tayyebi, M., Hashemi, R., “*Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC*”, Materials Science and Engineering: A, Vol. 753, pp. 70-78, 2019
- with recycled glass aggregate”, Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014
- [25]. Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, M.A., “*Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics*”, Experimental mechanics, Vol. 25, No. 3, pp.232-244. 1985
- [26]. Saranath, K.M., Ramji, M., “*Local zone wise elastic and plastic properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy using digital image correlation technique: A comparative study between uniform stress and virtual fields method*”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 68, pp.222-234, 2015