

اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

پیمان قاسمی تمامی^۱، داود اکبری^{۲*}، فرید آزادی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

* daakbari@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله بررسی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و ارایه روش جدید برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات مکانیکی به صورت غیرمخرب انجام شده است. در این راستا با هدف اثبات علمی روش جدید معرفی شده به مرور کارهای مرتبط با ایده مطرح شده در این پژوهش و بیان جزئیات آن پرداخته شده است. در ابتدا اصول روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و روشهای مورد نیاز برای محاسبه ضرایب همبستگی بیان شده است. با هدف ارزیابی صحت خروجی‌های روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، با ساخت تجهیزات مورد نیاز و انجام تستهای تجربی برای انجام فرآیند، به مقایسه نتایج خروجی آزمون روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و نتایج شبیه‌سازی المان محدود پرداخته شده است. در ادامه به بیان روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات مکانیکی با اعمال بار در ناحیه الاستیک و به صورت غیرمخرب پرداخته شده است. رابطه معرفی شده که بر پایه قانون هوک استوار می‌باشد، قابلیت ارزیابی و محاسبه تنش پسماند به صورت غیرمخرب، تمام صفحه و با دقت بالا را دارا می‌باشد. برای اثبات علمی روش معرفی شده، نمونه‌های فولادی توسط فرآیند SMAW جوشکاری شده‌اند و میزان تنش پسماند موجود در قطعات محاسبه شده است.

واژگان کلیدی: روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، اندازه‌گیری تنش پسماند، آزمون غیرمخرب، جوشکاری SMAW

۱- مقدمه

پسماند کششی وجود داشته باشد و بارگذاری نیز تنش کششی باشد، سطح تنش در آن منطقه بالاتر از آنچه که تنها با لحاظ تنش کششی خارجی بدست می‌آید خواهد بود. لذا در صورتی که تنش کششی پسماند داخلی در نظر گرفته نشود و قطعه تنها بر اساس تنش اعمالی طراحی شود، ممکن است در اثر تنش‌های پسماند خارجی، تنش در قطعه از حد تسلیم آن بالاتر رفته و باعث شکست آن گردد. در طی سالیان اخیر روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات ارایه شده است. به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به غیرمخرب^۱، نیمه مخرب^۲ و مخرب^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مخرب و نیمه مخرب به علت تخریب ساختار قطعه اولیه در فرآیند ارزیابی تنش پسماند دارای محدودیتهایی می‌باشند. به همین علت استفاده از روش‌های با دقت بالا و غیرمخرب در

تنش پسماند از زمان‌های پیشین موضوعی مهم برای صنعتگران بوده است. در زمان گذشته ساختن قطعات پیچیده رسی با استفاده از آتش هنر محسوب می‌شد که تعادل بین گرادیان کاهش تنش پسماند و دستیابی به شکل مورد نظر از محصولات را در بر داشت. گاهی وجود تنش پسماند در قطعه تولید شده سبب ایجاد انقباض و اعوجاج در آن می‌شود که مطلوب نیست. در عین حال بسیاری از طراحی‌ها وابسته به تنش پسماند است. به ویژه مواد شکننده و ترد می‌توانند از طریق تنش‌های پسماند فشاری مقاوم‌تر شوند. علت اهمیت شناسایی تنش‌های پسماند به این دلیل است که وقتی جسم تحت تنش خارجی قرار می‌گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. پس اگر در منطقه‌ای تنش

¹ Non-destructive

² Semi destructive

³ Destructive

جابجایی و کرنش در حین انتقال محاسبه می‌شود تا با موقعیت زیرمجموعه‌ها در شرایط فعلی مطابقت داده شود. نتیجه نهایی یک شبکه شامل اطلاعات جابجایی و کرنش با توجه به اطلاعات پیکربندی مرجع می‌باشد. در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، شدت نور هر عکس با یک تابع چند جمله‌ای پیوسته تخمین زده می‌شود. ساتن و همکاران طی مقاله‌ای نشان دادند که منحنی درجه ۵ بهترین نتایج را نشان می‌دهد. الگوریتم برهمنگاری هر بار تابع شدت نور دو زیرناحیه از دو تصویر قبل و بعد از بارگذاری با ابعاد $N \times N$ پیکسل را با هم مقایسه کرده و آن زیرناحیه از عکس بعد از بارگذاری را که بیشترین تطابق با زیرناحیه عکس مرجع دارد، به عنوان زیرناحیه تغییر یافته در نظر گرفته و جابجایی و تغییرشکل‌های آن را به دست می‌آورد (مطابق شکل ۲). این روند برای تمامی زیرناحیه‌های تصویر مرجع انجام شده و در نهایت میدان جابجایی کل به دست می‌آید. برای بررسی میزان انطباق هر جفت زیرناحیه ضریب برهمنگاری C به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود که می‌تواند معیار مناسبی برای درک مقدار مطابقت دو زیرناحیه متناظر باشد [۳].

$$C(R) = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(x_p, y_p) - G_d(x'_p, y'_p))^2}{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(x_p, y_p))^2} \quad (1)$$

که در رابطه ۱:

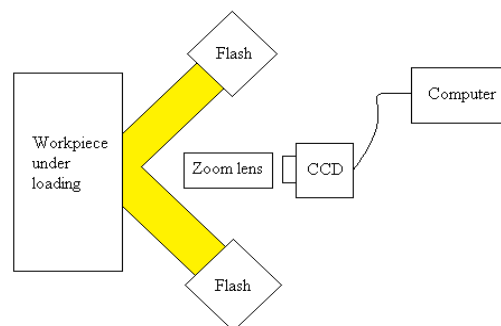
$$\begin{aligned} X_p &= x_p + i \\ Y_p &= y_p + j \\ X'_p &= x_p + i + U_s(i, j) \\ Y'_p &= y_p + j + V_s(i, j) \end{aligned}$$

و R بردار مجهولات به صورت زیر می‌باشد:

$$R = (X, Y, U, V, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y})$$

در معادلات بالا، U و V مولفه‌های جابجایی در مرکز زیرناحیه، G_r و G_d توابع پیوسته درونیایی شدت نور قبل و بعد از بارگذاری می‌باشند. (x, y) و (x', y') به ترتیب مختصات نقاط در زیرناحیه‌های تصویر مرجع و تصویر بعد

صنعت بسیار حایز اهمیت می‌باشد [۱]. امروزه در بین روش‌های غیرمخرب، استفاده از روش‌های نوری که قابلیت ارزیابی تنش پسماند به صورت تمام صفحه^۱ و در موقعیت^۲ را دارا می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها دارای مزایای سرعت بسیار بالا، دقت بالا، هزینه پایین و عدم وابستگی به ریزساختار و کیفیت سطوح می‌باشند. در بین انواع روش‌های نوری، روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی^۳ به علت هزینه پایین، سرعت بالا و عدم نیاز به مواردی نظیر تحلیل فازها، هاله‌ها و امواج نسبت به روش‌های نوری دیگر دارای برتری می‌باشد [۴-۵]. این روش برای اولین بار از سال ۱۹۸۲ در دانشگاه کارولینای جنوبی توسط پروفیسور ساتن برای به دست آوردن میدان جابجایی معرفی شد [۶]. در این روش، ابتدا روی سطح قطعه یک الگوی لکه‌ای سیاه و سفید تصادفی ایجاد می‌شود. بعد از آماده‌سازی نمونه، قبل و بعد از بارگذاری دو عکس از الگوی لکه‌ای سطح قطعه گرفته می‌شود و سپس با تحلیل این دو عکس در الگوریتم برهمنگاری می‌توان میدان جابجایی و کرنش را به دست آورد. شماتیکی از تجهیزات روش برهمنگاری در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- شماتیکی از تجهیزات DIC

ایده اصلی این روش به این صورت می‌باشد که چگونه بین نقاط قبل و بعد از تغییر شکل در ماده مورد بررسی ارتباط برقرار شود. روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی این کار را با به کارگیری بخش‌های فرعی از عکس مرجع^۴ انجام می‌دهد که به نام زیر مجموعه^۵ شناخته می‌شوند و موقعیت نسبی آنها را تعیین می‌کند. برای هر زیرمجموعه، اطلاعات

¹ Full-field

² In-Situ

³ Digital Image Correlation (DIC)

⁴ Reference image

⁵ Subset

کند، قابل دستیابی است. در الگوریتم روش برهمنگاری، روند جستجو برای محاسبه جابجایی‌ها و گرادیان‌های جابجایی مجهول با گام‌های بلند شروع می‌شود. در این روند، در ابتدا گرادیان جابجایی‌ها صفر در نظر گرفته می‌شوند و الگوریتم با گام‌های ۱ پیکسل در ناحیه مورد نظر جستجو کرده و پیکسلی که ضریب برهمنگاری را به حداقل برساند به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش نیوتن-رافسون جابجایی‌ها و گرادیان آن‌ها با دقت کسری از اندازه پیکسل به دست می‌آید. نتایج این مرحله به عنوان مقادیر اولیه در الگوریتم نیوتن-رافسون برای زیرناحیه بعدی استفاده می‌شود [۳]. در این روش با انجام محاسبات کلی در نهایت کرنش‌ها در راستاهای مختلف به صورت روابط ۷-۵ بیان می‌شوند:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right) + \left(\frac{du}{dx} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 \right) + \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \frac{dv}{dy} \right) \quad (7)$$

۲- تئوری مساله

قانون هوک در فیزیک، مکانیک و دانش مواد کشسانی یا الاستیسیته، تقریبی است نشان‌دهنده آن که تغییر طول یک ماده با بار وارد بر آن رابطه خطی دارد. بسیاری از مواد تا زمانی که نیرو از حد کشسانی آن‌ها کمتر باشد با تقریب خوبی از این قانون پیروی می‌کنند. بر اساس قانون هوک تنش با کرنش در ناحیه الاستیک دارای رابطه خطی می‌باشد و از طریق رابطه ۸ بدست خواهد آمد [۸-۱۰]:

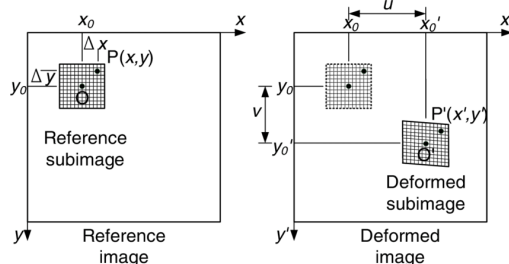
$$\sigma = E\varepsilon \quad (8)$$

که در رابطه ۸، σ تنش، ε کرنش و E مدول یانگ می‌باشد. همانگونه که از رابطه ۸ مشخص شده است، رابطه بین تنش و کرنش در محدوده الاستیک به صورت خطی می‌باشد. بر اساس رابطه هوک چنانچه قطعه‌ای تحت نیروی کششی قرار گیرد و نیروی اعمال شده در حدی باشد که ماده را تا حد الاستیک آن بکشد، میزان کرنش ایجاد شده در تمامی المان‌های آن از طریق رابطه‌ی هوک محاسبه خواهد شد. این موضوع در حالتی که تنش پسماند در قطعه وجود نداشته باشد صادق خواهد بود. ولی چنانچه در قطعه‌ای بر اثر عملیاتی که از قبل بر روی آن انجام شده است تنش پسماند ایجاد شده باشد و این قطعه تحت کشش

از بارگذاری هستند که طبق روابط ۲ و ۳ با همدیگر ارتباط دارند.

$$x' = x + U + \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial U}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

$$y' = y + V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial V}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$



شکل ۲- زیرناحیه‌های مرجع و تغییر شکل یافته

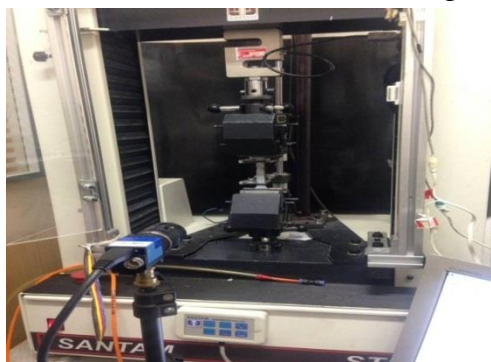
که در روابط ۲ و ۳، Δx و Δy فواصل افقی و عمودی نقطه (x, y) از مرکز زیرناحیه است. در رابطه برهمنگاری، مقدار شدت نور در هر نقطه، از زیرناحیه عکس مرجع با نقطه متناظر آن در زیرناحیه متناظر در عکس بعد از بارگذاری مقایسه شده و اختلاف آن‌ها به دست می‌آید. سپس مقدار مجذور اختلاف آن‌ها بر مقدار مجذور شدت نور آن نقطه در عکس مرجع تقسیم می‌شود. عدد به دست آمده، معیاری از خطای نسبی در آن نقطه است. برای محاسبه مقدار خطای کل در یک زیرناحیه، مقدار خطای نقاط با یکدیگر جمع می‌شوند، وقتی ضریب برهمنگاری صفر شود، در حقیقت تابع خطا در کل زیرناحیه صفر شده و این نشان دهنده تطابق کامل است. بهترین جواب زمانی به دست می‌آید که ضریب $C(R)$ در رابطه ۱ کمینه شود. به تعبیر دیگر، توابع درونیایی قبل و بعد از بارگذاری در هر نقطه اختلاف کمی داشته باشند. طبق رابطه ۴ برای کمینه کردن C باید گرادیان آن صفر شود.

$$\nabla C = \left(\frac{\partial C}{\partial R_k} \right)_{k=1,13} \quad (4)$$

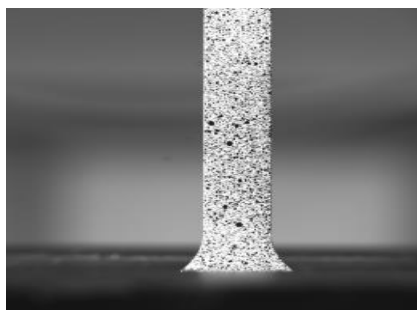
برای حل رابطه ۴ و به دست آوردن ریشه‌های آن، از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. این روش از یک مقدار اولیه تقریبی برای پیدا کردن ریشه معادلات استفاده می‌کند و تا زمانی که خطا از مقدار معینی کمتر شود تکرار انجام می‌دهد. از آنجاییکه ضریب برهمنگاری تابعی از مولفه‌های جابجایی و گرادیان آن‌ها است، این مجهولات با جستجوی دسته‌ای از این مولفه‌ها که ضریب برهمنگاری را کمینه

و ضخامت قطعه کار ۳ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴ یک مرحله عکس‌برداری از قطعه تحت آزمون کشش نمایش داده شده است. این تصویر با استفاده از دوربین سی سی دی^۲ و با فاصله زمانی معین گرفته شده است. الگوی تصادفی ایجاد شده بر روی نمونه با استفاده از اسپری رنگ سفید و مشکی ایجاد شده است.

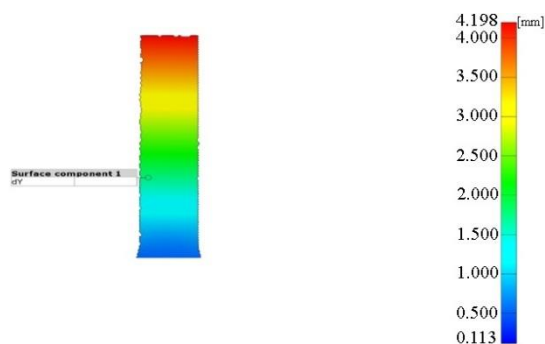
پس از عکس‌برداری از قطعه تحت کشش توسط دوربین CCD، عکس‌های گرفته شده وارد نرم‌افزار پردازش تصویر شده است و میدان جایجایی تجربی محاسبه شده است. کانتور خروجی مرحله اول کشش نرم‌افزار GOM در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۳- تجهیزات برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مورد استفاده



شکل ۴- نمونه با الگوی تصادفی



شکل ۵- نتایج حاصل از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

محوری قرار گیرد، میدان کرنشی ایجاد شده در قطعه کار از حالت یکنواخت متفاوت خواهد بود. در این حالت با استفاده از نمونه‌ی استاندارد قطعه فولادی و انجام تست کشش، مقدار مربوط به مدول یانگ قطعه فولادی محاسبه خواهد شد. طبق قانون هوک رابطه بین تنش فلز پایه σ_b و کرنش فلز پایه ϵ_b از طریق رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_b = E_b \epsilon_b \quad (9)$$

با توجه به رابطه ۹ تنش فلز پایه σ_b برای نمونه با تنش پسماند محاسبه خواهد شد و تنش پسماند در نمونه از رابطه ۱۰ محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_R + \sigma_b = E_R \epsilon_R \quad (10)$$

به طوریکه E_R مدول یانگ نمونه با تنش پسماند، ϵ_R کرنش در قطعه با تنش پسماند و σ_R میزان تنش پسماند موجود در قطعه می‌باشد. با توجه به روابط ۹ و ۱۰ میزان تنش پسماند در قطعه از طریق رابطه ۱۱ محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_R = E_R \epsilon_R - E_b \epsilon_b \quad (11)$$

۳- مراحل انجام آزمایش

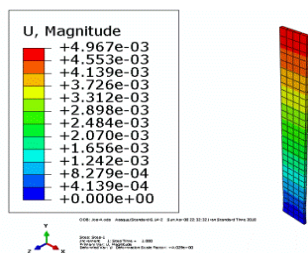
برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات جوشکاری شده لب به لب، دستگاه تست کشش سروو الکترومکانیکال سنتام^۱ با ظرفیت ۲ تن به همراه فک دستی WG-20F و اکستنسیومتر کورس بلند ELP500 برای انجام آزمون کشش مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری میزان جایجایی ایجاد شده در قطعه در حین آزمون کشش از دوربین سی سی دی ۳/۲ مگاپیکسل لایوژن^۲ استفاده شده است. برای کنترل دوربین از نرم‌افزار IC Capture 2.4 استفاده شده است و نتایج تصویر برداری در نرم‌افزار GOM Correlate مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مجموعه مورد استفاده برای روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و کشش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در ابتدا به منظور بررسی میزان دقت تجهیزات مورد استفاده برای آزمون برهمنگاری تصاویر، به انجام تست کشش و شبیه‌سازی فرآیند و مقایسه نتایج به دست آمده با یکدیگر پرداخته شده است. نمونه مورد استفاده برای آزمون کشش دارای طول ۲۰ و عرض ۳ سانتی‌متر می‌باشد

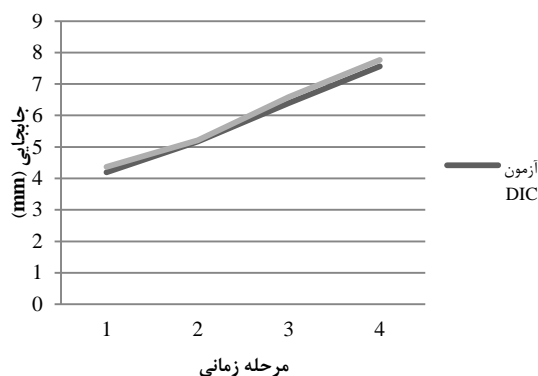
¹ SANTAM STM 20

² Lavision

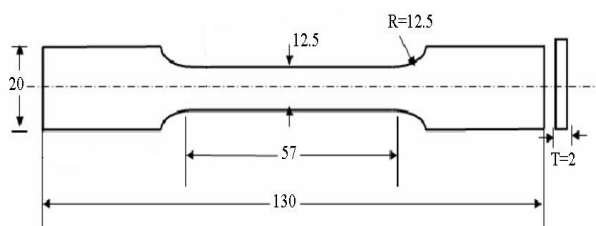
³ Charged Coupled Device (CCD)



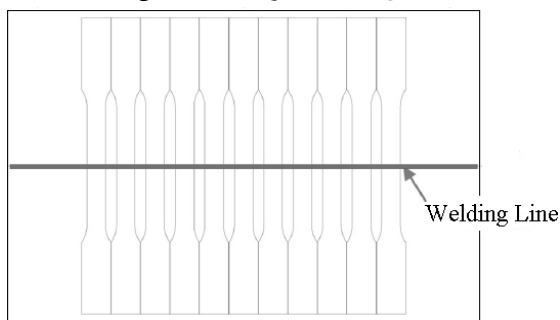
شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی المان محدود تست کشش ورق



شکل ۷- مقایسه نتایج خروجی تست تجربی و شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه در زمان‌های مختلف تست کشش



شکل ۸- ابعاد نمونه تست کشش



شکل ۹- شماتیک نمونه‌های جوشکاری شده آزمون کشش

پس از انجام تست‌های تجربی، شرایط یکسان آزمایش‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ ورژن ۶.۱۴.۲ شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده در دوره‌ی زمانی مشخص تعیین شده است و نمونه آن در شکل ۶ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۷ و محاسبه درصد خطای بین خروجی‌های نرم‌افزار پردازش تصویر GOM و آباکوس مشخص شده است که میانگین خطا کمتر از ۵ درصد می‌باشد و به دقت کار نرم‌افزار GOM پی برده شده است و صحت این نرم‌افزار نیز مورد تایید قرار گرفته است. با توجه به این امر از این نرم‌افزار برای آزمایش‌های مورد نیاز برای این پژوهش استفاده خواهد شد.

برای انجام تست‌های تجربی، فرآیند جوشکاری قوسی بر روی نمونه‌ها انجام شده است و پارامترهایی نظیر سرعت و جریان جوشکاری برای تمامی نمونه‌ها به طور یکسان در نظر گرفته شده است. به منظور ایجاد تنش پسماند در درون قطعات جوشکاری شده، نمونه‌های تحت فرآیند به طور کامل توسط قیدهایی مهار شده‌اند. نمونه‌های انتخاب شده برای جوشکاری از جنس فولادهای کربنی^۲ انتخاب شده‌اند. خواص مکانیکی این نوع فولاد در جدول ۱ نمایش داده شده است. پس از انجام عملیات جوشکاری قطعات فولادی، تمامی نمونه‌ها بر اساس ابعاد تعیین شده در شکل ۸ بریده شده‌اند و به هندسه مورد نظر برای آزمون کشش رسیده‌اند. در شکل ۹ شماتیکی از قطعات جوشکاری شده پس از عمل برشکاری نمایش داده شده است.

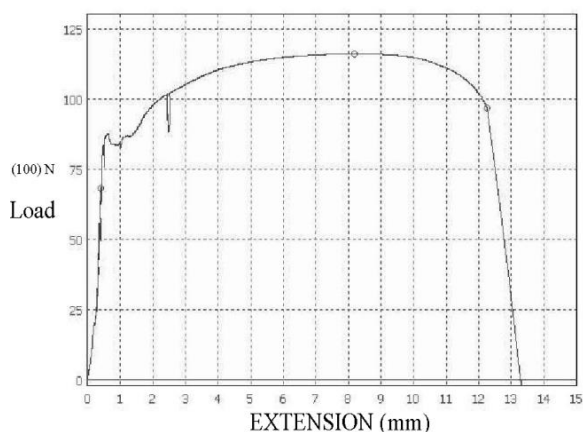
مقایسه نتایج خروجی تست تجربی و شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه در زمان‌های مختلف تست کشش مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین صورت شرایط شبیه‌سازی برای زمان‌های مختلف آماده‌سازی شده است. در شکل ۷ مقایسه خروجی جابجایی در تست تجربی و نرم‌افزاری در مراحل زمانی مختلف ارایه شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی فولاد ASTM A36

مشخصات	پارامتر
ASTM A36	نوع ماده
210 GPa	مدول یانگ
0.26	ضریب پواسون
7850 Kg/m ³	چگالی

¹ Abaqus 6.14.2

² ASTM A36



شکل ۱۲- نمودار نیرو- جابجایی فولاد مورد استفاده

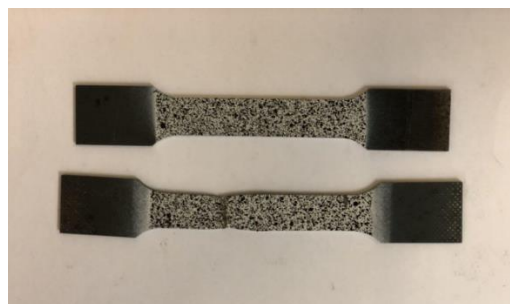
در حین انجام آزمون کشش، تغییر شکل ایجاد شده در نمونه جوش داده شده و فلز پایه توسط سیستم برهمنگاری تصاویر دیجیتالی نمایش داده شده در شکل ۳ ثبت شده است. سیستم برهمنگاری تصاویر دیجیتالی بر روی پایه روبروی دستگاه کشش تعبیه شده است. در حین تصویر برداری، سیستم نورپردازی نیز باید به دقت اعمال شود تا کیفیت عکسبرداری افزایش یابد و نتایج با دقت بالاتری بدست آید. میزان تغییر شکل ایجاد شده در نقاط مختلف قطعه بر اساس جابجایی الگوی تصادفی و مقایسه با مقدار مرجع محاسبه خواهد شد. با هدف دستیابی به دقت بالاتر بخش مورد نظر از قطعه برای بررسی در نرم افزار به عنوان زیرمجموعه انتخاب شده است. این بخش با اندازه المان ۱۱ پیکسل و فاصله بین نقاط ۷ پیکسل که مطابق با سایز قطعه پیشنهاد شده است، مطابق شکل ۱۳ به صورت رنگی نمایش داده خواهد شد. به منظور بررسی میزان تغییر شکل در راستای مشخص، مسیری مشخص بر روی قطعه تعریف شده است. تعریف مسیر اصولاً در نمای دید قطعه کار و در جهت های مورد نظر اعمال خواهد شد و نرم افزار دارای این قابلیت می باشد که در تمامی راستاها نتایج را محاسبه کند. یکی از مسیرهای تعریف شده برای نرم افزار در جهت محور x و به صورت خط مشکی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



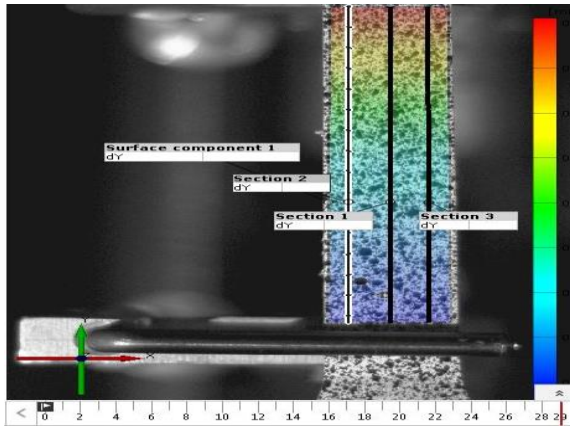
شکل ۱۰- دستگاه وایرکات تخلیه الکتریکی

در این پژوهش دو نوع نمونه آماده سازی شده است. نمونه اول از جنس فلز پایه می باشد و نمونه دوم از جنس همان فلز پایه می باشد که عملیات جوشکاری بر روی آن انجام شده است. تمامی نمونه ها توسط دستگاه برش وایرکات تخلیه الکتریکی نمایش داده شده در شکل ۱۰ به ابعاد مورد نظر بریده شده اند.

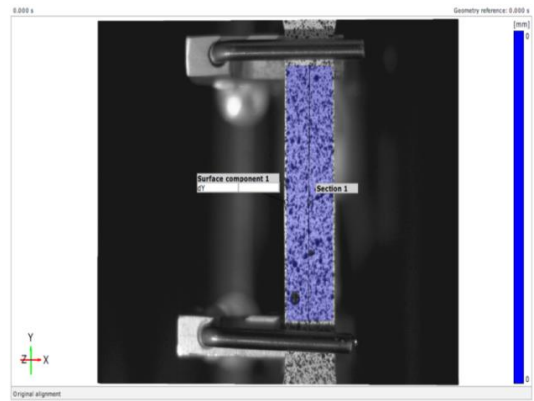
همانگونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است، طول کلی نمونه ۱۳۰، طول گیج ۵۷، عرض گیج ۱۲/۵، ضخامت ۲ میلی متر و شعاع فیلت نیز ۱۲/۵ می باشد. نمونه فلز پایه به منظور تعیین دقیق مشخصات مکانیکی فولاد و تعیین شرایط بارگذاری مورد استفاده قرار گرفته است و تا مرز پارگی تحت آزمون کشش قرار گرفته است. بر اساس منحنی نیرو- جابجایی، حدود الاستیک و پلاستیک قطعه فولادی مشخص شده است. نمونه قبل و بعد کشش و نمودار نیرو- جابجایی قطعه فولادی مورد استفاده در شکل های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمونه فلز پایه قبل و پس از آزمون کشش



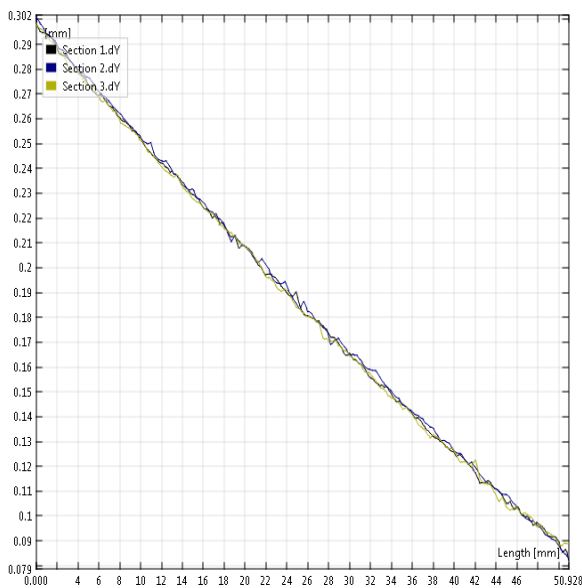
شکل ۱۴- تعریف مسیر قطعه تحت آزمون کشش



شکل ۱۳- زیرمجموعه و مسیر تعریف شده برای نرم افزار

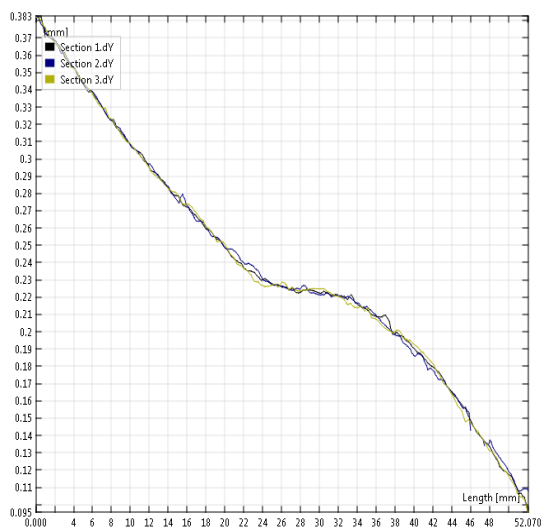
۴- بحث و تحلیل نتایج

در شکل ۱۲ منحنی نیرو-جابجایی آزمون کشش فلز پایه نمایش داده شده است. با استفاده از این منحنی محدوده الاستیک قطعه مشخص شده است. همچنین به علت مشخص بودن مقادیر نیرو، سطح مقطع و طول اولیه گیج، مدول یانگ قطعه فولادی نیز بدست خواهد آمد. با توجه به محاسبات مقدار مدول یانگ قطعه فولادی 210 GPa محاسبه شده است. در نرم افزار GOM، مطابق شکل ۱۴ سه مسیر برای قطعه تعریف شده است. در شکل های ۱۵ و ۱۶ نتایج بدست آمده برای قطعه فولادی پایه و بعد از جوشکاری نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است در نمودار تغییر مربوط به قطعه پایه میزان تغییر شکل در طول مسیرهای تعیین شده ۱، ۲ و ۳ دارای شیب ثابتی می باشد و در طول کل مسیر این شیب تغییر نخواهد داشت. مطابق شکل ۱۶ نمودار تغییر شکل ایجاد شده در طول مسیرهای تعریف شده برای قطعه جوش داده شده دارای شیب یکسان در تمامی طولش نمی باشد. این شیب در نواحی که تحت تاثیر تنش پسماند نمی باشد دارای مقداری ثابت و برابر با فلز پایه می باشد. در نواحی که تحت تاثیر تنش پسماند ناشی از حرارت جوشکاری می باشد، مقادیر جابجایی دارای شیب بسیار کمی در حدود صفر می باشد که این امر ناشی از وجود تنش پسماند موجود در قطعات می باشد. وجود تنش پسماند کششی درون قطعه باعث ایجاد جابجایی های بزرگتر از حد معمول در قطعه تحت کشش می شود. به همین ترتیب چنانچه درون قطعه تنش پسماند فشاری وجود داشته باشد، این تنش باعث مخالفت با ایجاد جابجایی در المان های مختلف خواهد شد.



شکل ۱۵- دیاگرام جابجایی نقاط مختلف نمونه در راستای

مسیر تعریف شده برای فلز پایه



شکل ۱۶- دیاگرام جابجایی نقاط مختلف نمونه در راستای

مسیر تعریف شده برای نمونه جوش داده شده

پس از محاسبه مقادیر جابجایی و کرنش در نمونه‌های جوشکاری شده به محاسبه تنش پسماند در نمونه‌ها پرداخته شده است. مقدار تنش پسماند با توجه به مدول یانگ و میزان کرنش ایجاد شده در نمونه‌های تحت کشش با استفاده از روابط محاسبه خواهد شد. در جدول ۲ مقدار تنش پسماند ایجاد شده در نمونه جوش داده شده با شرایط جوشکاری بیان شده محاسبه شده است.

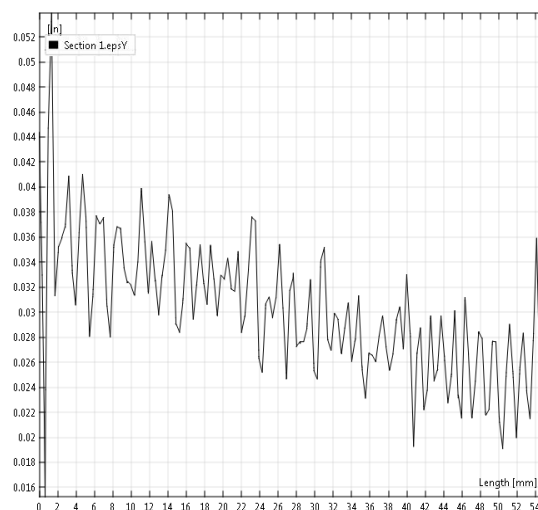
جدول ۲. میزان تنش پسماند ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده

پارامتر	نمونه تجربی	نمونه شبیه‌سازی شده
سرعت کشش	2 mm/min	2 mm/min
سطح مقطع عرضی (m ²)	2.5×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵
تنش (MPa)	1638	1654
تغییر شکل (mm)	0.390	0.394
کرنش	0.00780	0.00787
مدول الاستیک (GPa)	210	210
سطح مقطع عرضی (m ²)	2.5×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵
تنش (MPa)	987	996
تغییر شکل (mm)	0.235	0.239
کرنش	0.00470	0.00474
مدول الاستیک (GPa)	210	210

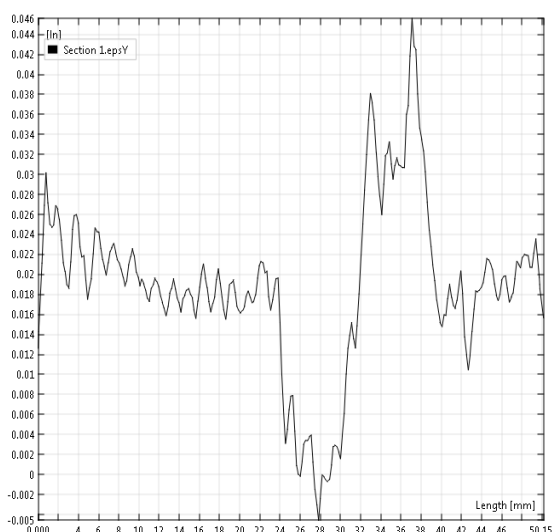
۵- نتیجه‌گیری

با انجام آزمایشات تجربی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری مشاهده شده است که این روش دارای دقت کافی برای ارزیابی میدان جابجایی، کرنش و تنش را در سطح قطعه کار دارا می‌باشد. برای اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب رابطه ۱۱ بر پایه قانون هوک ارائه شده است که این رابطه با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را در کل سطح قطعه کار و به صورت غیرمخرب دارا می‌باشد. به منظور صحت‌سنجی رابطه ارائه شده به شبیه‌سازی قطعه در نرم‌افزار المان محدود پرداخته شده است. مطابق با جدول ۲ و با مشاهده خروجی‌های نرم‌افزار المان محدود و مقایسه آن با نتایج رابطه ارائه شده، نتیجه‌گیری

پس از محاسبه مقادیر جابجایی توسط نرم‌افزار GOM، به بررسی میزان کرنش ایجاد شده بر روی نمونه تحت آزمون کشش پرداخته شده است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نتایج کرنش ایجاد شده بر روی نمونه‌ها نمایش داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشخص شده است که کرنش ایجاد شده بر روی نمونه‌ی پایه دارای روند نسبتاً یکسانی می‌باشد و دارای تغییر شکل ناگهانی نمی‌باشد. دلیل این امر یکنواخت بودن ساختار قطعه در تمامی طول مسیر تعریف شده می‌باشد. با توجه به شکل ۱۸ مشخص شده است که میزان کرنش برای نمونه‌ی جوش داده شده در برخی نواحی دارای تغییر شکل ناگهانی می‌باشد. این نواحی مربوط به نواحی دارای تنش پسماند می‌باشد که باعث تغییرات در کرنش ایجاد شده می‌شود.



شکل ۱۷- دیاگرام کرنش نقاط مختلف نمونه در راستای مسیر تعریف شده برای نمونه فلز پایه



شکل ۱۸- دیاگرام کرنش نقاط مختلف نمونه در راستای مسیر تعریف شده برای نمونه جوش داده شده

[5] Huang, X., Liu, Z., & Xie, H. (2013). Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 26(6), pp. 570-583.

[6] Sutton, M. A., et al. "Determination of displacements using an improved digital correlation method." *Image and vision computing* 1.3 (1983): 133-139.

[7] Hild, F., & Roux, S. 2012. *Digital image correlation*. Wiley-VCH, Weinheim, pp. 183-228.

[8] Bartlett, J. L., Croom, B. P., Burdick, J., Henkel, D., Li, X. (2018). Revealing mechanisms of residual stress development in additive manufacturing via digital image correlation. *Additive Manufacturing*, 22, 1-12.

[9] Kim, K., Jung, H. (2016). Nondestructive testing of residual stress on the welded part of butt-welded A36 plates using electronic speckle pattern interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 48(1), 259-267.

[10] Kim, K., Choi, T., gyun Na, M., Jung, H. (2015). Residual stress measurement on the butt-welded area by electronic speckle pattern interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(1), 115-125.

شده است که متد معرفی شده دارای دقت بالایی می باشد و می توان با استفاده از آن به همراه روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی به اندازه گیری تنش پسماند در قطعات به صورت غیرمخرب پرداخته شود.

۶- منابع

[1] Shokrieh, M. (2014). *Residual stresses in composite materials*. Woodhead publishing.

[2] Ghasemi Tamami, P., Akbari, D. (2017). Study on defect detection of industrial parts with Digital Image Correlation method, *25th Annual Conference of Mechanical Engineering*.

[۳] قاسمی تمامی، پ.؛ اکبری، د. (۱۳۹۷). توسعه روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی با هدف اندازه گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب، پانزدهمین همایش ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس.

[۴] شاه میرزالی، ع.؛ محمدرضا فراهانی، م.؛ اکبری، د. (۱۳۹۵). بررسی اثرات اندازه زیرمجموعه و گام بر دقت اندازه گیری مدول الاستیک به روش تصویربرداری دیجیتال، شانزدهمین کنفرانس بین المللی انجمن های هوافضای ایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

Nondestructive Residual Stress Measurement Using Digital Image Correlation Method

Peyman Ghasemi Tamami¹, Davood Akbari^{*1}, Farid Azadi¹

¹Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, Digital Image Correlation method (DIC) and the introduction of a new Nondestructive method for measuring residual stresses in mechanical parts has been investigated. In this regard, with the purpose of scientific proof of the proposed new method, a review of the related work to the presented idea and its details has been discussed. Initially, the principles of digital image correlation method and the methods used to calculate correlation coefficients are presented. In order to evaluate the accuracy of digital image correlation method outputs, by construction the required equipment and doing experimental tests, comparing the output results of the digital image correlation method and the simulation results of finite element are discussed. In the following, the proposed method for measuring the residual stresses in mechanical parts by applying loads in the elastic and Nondestructive area has been discussed. The proposed relationship, which is based on Hooke's law, is capable of evaluating and calculating residual stresses in a Nondestructive, full-screen, and high-precision manner. For scientific proof, the steel samples are welded by the SMAW process and the amount of residual stresses found in the parts has been calculated.

Keywords: Digital image correlation method, Residual stress measurement, Nondestructive testing, SMAW welding