



اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند در قطعات فولادی جوشکاری شده با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

پیمان قاسمی تمامی¹، داود اکبری^{2*}

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی 111-14115، daakbari@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق به بررسی و اندازه‌گیری تنش پسماند در اتصال قطعات فولادی جوشکاری شده با روش غیرمخرب برهمنگاری تصاویر دیجیتالی پرداخته شده است. به این منظور نمونه‌هایی از جنس ورق A36 تهیه و عملیات جوشکاری قوسی با گاز محافظ بر روی آن‌ها انجام شد. برای اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی استفاده شده است و نمونه‌های پایه، جوشکاری شده بدون عملیات حرارتی و جوشکاری شده با عملیات حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. عملیات حرارتی نمونه‌ها از نوع آنیلینگ می‌باشد که این عملیات به منظور کاهش تنش پسماند نمونه‌های جوش داده شده انجام شده است. به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب رابطه جدیدی معرفی شده است که بر پایه قانون هوک است. مقادیر تنش پسماند با اندازه‌گیری میزان کرنش نمونه‌ها و قرار دادن مقادیر آن در این رابطه محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که عملیات حرارتی صورت گرفته بر روی نمونه‌ها سبب کاهش مقادیر تنش پسماند به میزان تقریبی 33% شده است و روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی دقت کافی و مناسب برای اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب را در نمونه‌های ذکر شده دارا می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 خرداد 1401
داوری اولیه: 28 خرداد 1401
پذیرش: 24 تیر 1401

کلیدواژگان:

جوشکاری قوسی با محافظت گاز
فولاد A36
تنش پسماند
برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

Nondestructive measurement of residual stress in welded steel parts using digital image correlation method

Peyman Ghasemi Tamami, Davood Akbari*

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

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, Daakbari@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 3 June 2022
First Decision: 18 June 2022
Accepted: 15 July 2022

Keywords:

Gas metal arc welding
A36 sheet
Residual stress
Digital image correlation

Abstract

In this paper, nondestructive measurement of residual stress in welded steel parts joint using digital image correlation method has been investigated. For this purpose, samples of A36 sheet were prepared and arc welding with shielding gas (GMAW) was performed on them. In order to measure nondestructive residual stress in all parts, digital image correlation method has been used. Base and welded samples with and without heat treatment have been evaluated with this method. The heat treatment of the samples is of the tempering type, which is performed in order to reduce the residual stress of the welded samples. In order to measure non-destructive residual stress, a new relationship has been introduced which is based on Hooke's law. Residual stress values are calculated by measuring the displacement and strain of the samples and placing their values in the given new relation. Examining the results, it has been found that the heat treatment performed on the samples has reduced the residual stress values by approximately 33% and the digital image correlation method has sufficient and appropriate accuracy for measuring nondestructive residual stresses.

1- مقدمه

طول دوره‌ی کاری، در قطعه به وجود آیند. این گونه تنش‌ها در بسیاری از موارد، به ویژه زمانی که سازه تحت بارهای متناوب یا محیط‌های خورنده باشد، نقش عمده‌ای در تخریب سازه دارند. تنش‌های پسماند در همه موارد نقش مخرب ندارند و این امر بستگی به مقدار، علامت و توزیع تنش‌های پسماند در مقایسه با

تنش پسماند نوعی از تنش‌های داخلی است که بدون تأثیر بارهای خارجی درون جسم وجود دارد. همواره تنش پسماند موجود در قطعات بخشی از استحکام ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنش‌های پسماند ممکن است طی فرآیند ساخت یا در

Please cite this article using:

P. Ghasemi Tamami, D. Akbari, Nondestructive measurement of residual stress in welded steel parts using digital image correlation method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 18- 28, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اهمیت ارزیابی تنش پسماند در قطعات، استفاده از روش‌های نوری برای ارزیابی تنش پسماند به سرعت مورد مطالعه قرار گرفت. پژوهشگران زیادی در حوزه ارزیابی تنش پسماند با استفاده از روش‌های نوری فعالیت کرده‌اند. شاجر در سال 2009 پیشرفت‌های اخیر در اندازه‌گیری تنش پسماند را مرور کرد [18]. کورسونسکای و همکاران به بررسی تنش‌های پسماند در مقیاس میکرون پرداختند [19]. آن‌ها در این پژوهش به بررسی ورق‌های پوشش‌دهی شده نازک با استفاده از روش‌های ماشینکاری پرتوهای متمرکز⁷ و برهمنگاری تصاویر دیجیتالی پرداختند. کروتسالر و همکاران به معرفی روش جدیدی برای بررسی تنش پسماند در ورق‌های نازک از طریق ترکیب روش‌های ماشینکاری پرتوهای متمرکز و برهمنگاری تصاویر پرداختند [20]. یاوو و همکاران به بررسی تنش پسماند در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصالات لب به لب با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و روش مقطع‌زنی⁸ پرداختند [21]. مارکو و همکاران در سال 2011 به بررسی تنش پسماند ورق‌های نازک پوشش داده شده از طریق روش یون متمرکز- برهمنگاری تصاویر پرداختند [22]. سباستیانی و همکاران در سال 2014 به بررسی و محاسبه ضریب پواسون و تنش پسماند در مقیاس میکرون با استفاده از روش‌های ماشینکاری پرتوهای متمرکز، شیازنی و برهمنگاری تصاویر دیجیتالی پرداختند [23]. داینس و همکاران در سال 2009 به بررسی اندازه‌گیری تنش پسماند در مقیاس میکرو برای فولادها با استفاده از روش‌های یون متمرکز- برهمنگاری تصاویر پرداختند [24]. وینارسکی و همکاران به اندازه‌گیری تنش پسماند در مقیاس میکرون با استفاده از روش سوراخکاری و برهمنگاری تصاویر دیجیتالی پرداختند که در این پژوهش روش جدید سوراخکاری تحت عنوان سوراخکاری تدریجی میکرونی⁹ معرفی شده است [25]. نلسون و همکاران به تخمین تنش پسماند با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی سه- بعدی پرداختند [26]. در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش‌های نوری، این روش‌ها در کنار یکی از روش‌های مخرب یا نیمه مخرب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در راستای استفاده از روش‌های نوری برای ارزیابی تنش پسماند به صورت غیرمخرب، پژوهش‌های محدودی صورت گرفته است. کیم و همکاران به بررسی غیرمخرب تنش پسماند در نمونه‌های جوشکاری شده لب به لب

تنش‌های ناشی از بار خارجی دارد. اندازه‌گیری تنش پسماند به سه صورت مخرب¹، نیمه مخرب² و غیر مخرب³ انجام می‌شود. روش‌های 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 صنعت بسیار حایز اهمیت می‌باشد [1]. امروزه در بین روش‌های غیرمخرب، استفاده از روش‌های نوری که قابلیت ارزیابی به صورت تمام صفحه⁴ و در موقعیت⁵ را دارا می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [2]. این روش‌ها دارای سرعت و دقت بالا، هزینه پایین و عدم وابستگی به ریزساختار و کیفیت سطوح می‌باشند [3]. در بین روش‌های نوری ارزیابی تنش پسماند، روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی⁶ به علت هزینه پایین، سرعت بالا و عدم نیاز به مواردی نظیر تحلیل فازها، هاله‌ها و امواج نسبت به سایر روش‌های نوری دارای برتری می‌باشد [4]. این روش برای اولین بار در سال 1982 توسط پروفیسور ساتن به منظور به دست آوردن میدان جابجایی معرفی شد [5]. پیتر و همکاران در سال 1983 از این روش برای به دست آوردن میدان کرنش استفاده کردند [6]. ساتن و همکاران این روش را بهبود دادند و به اثبات دقت آن در محاسبه میدان کرنش پرداختند [7]. آن‌ها از روش نیوتن-رافسون برای بهینه‌سازی الگوریتم برهمنگاری استفاده کردند [8]. وندرکس الگوریتم اولیه این روش را بهینه کرد و دقت میدان جابجایی را افزایش داد [9].

وندرکس و ناوس از این روش برای اندازه‌گیری میدان کرنش در ابعاد کسر میکرونی استفاده کردند [10]. سپس محققان مختلفی بر روی الگوریتم و بهبود آن تحقیق کردند [11، 12]. چین و بروک یک الگوریتم جدید برای آنالیز میدان‌های غیرپیوسته و دارای ترک ارائه کردند [13]. رتور و همکاران الگوریتم دیگری را برای تحلیل ترک و ترک‌یابی توسعه دادند [14، 15]. ساتن و همکاران با استفاده از برهمنگاری سه‌بعدی، اثر جابجایی خارج از صفحه در برهمنگاری دوبعدی را بررسی کردند [16]. آن‌ها با استفاده از برهمنگاری سه‌بعدی، اثر فاصله قرارگیری دوربین در میدان‌های جابجایی حاصل از برهم‌نگاری دوبعدی و خطای روش را بررسی کردند. در سال 2012 برنگر و همکاران تأثیر روش‌های متفاوت در ایجاد الگوی تصادفی بر میدان‌های جابجایی دوبعدی را مطالعه کردند [17]. با توجه به

¹ Destructive² Semi Destructive³ Non-Destructive⁴ Full-field⁵ In-Situ⁶ Digital Image Correlation (DIC)⁷ Focused ion beam (FIB)⁸ Digital image correlation (DIC)-aided slitting technique⁹ Incremental micro-hole-drilling

سفید ایجاد می‌شود. پس از آماده‌سازی نمونه، دو عکس از سطح قطعه قبل و بعد از بارگذاری ثبت می‌شود و سپس با انجام تحلیل این دو تصویر در الگوریتم برهمنگاری، میدان جابجایی و در ادامه آن کرنش‌ها محاسبه می‌شوند. تئوری اصلی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال ارتباط بین نقاط قبل و بعد از تغییر شکل در ماده مورد بررسی می‌باشد. روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال با به کارگیری بخش‌های فرعی از عکس مرجع² که با نام زیر مجموعه³ شناخته می‌شوند و با انجام مقایسه این بخش‌ها میدان میدان جابجایی را محاسبه می‌کند. برای هر کدام از این زیرمجموعه‌ها، اطلاعات مربوط به جابجایی و کرنش در حین انتقال و شرایط کنونی محاسبه و مطابقت داده می‌شوند. با توجه به شکل 1 برای بررسی مقدار انطباق هر جفت زیرناحیه ضریب برهمنگاری C با استفاده از رابطه (1) تعریف می‌شود که می‌تواند معیار مناسبی برای درک میزان مطابقت دو زیرناحیه متناظر باشد.

$$C(R) = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(X_p, Y_p) - G_d(X'_p, Y'_p))^2}{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(X_p, Y_p))^2} \quad (1)$$

که در آن:

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

اندیس p نشان‌دهنده نقطه مورد نظر می‌باشد 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 مؤلفه‌های مربوط به جابجایی در مرکز زیرناحیه، G_r و G_d توابع پیوسته درون‌یابی شدت نور قبل و بعد از بارگذاری می‌باشند. (x, y) و (x', y') به ترتیب مختصات نقاط در زیرناحیه‌های تصویر مرجع و تصویر بعد از بارگذاری می‌باشند که طبق روابط (2) و (3) با یکدیگر ارتباط دارند.

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

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

در روابط (2) و (3)، Δx و Δy فواصل افقی و عمودی نقطه (X, Y) از مرکز زیرناحیه می‌باشد. در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال بهترین جواب زمانی به دست می‌آید که ضریب C کمینه شود. به عبارت دیگر، توابع درون‌یابی قبل و بعد از بارگذاری در هر نقطه اختلاف کمی داشته باشند. طبق رابطه

با استفاده از روش تداخل‌سنجی الگوهای لکه‌ای¹ پرداختند. آن‌ها دو نوع نمونه آماده‌سازی کردند که نمونه نوع اول فلز پایه و نمونه نوع دوم فلز جوش داده می‌باشد. آن‌ها روش جدیدی معرفی کردند و پس از انجام آزمون کشش بر روی تمامی نمونه‌ها، میزان تنش پسماند محاسبه شده است. پس از اندازه‌گیری تنش پسماند تمامی مراحل در نرم‌افزار اجزای محدود محاسبه شده و نتایج آن با میزان تنش پسماند بدست آمده، مقایسه شده است [27]. کیم و همکاران به اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند با استفاده از روش تداخل‌سنجی الگوهای لکه‌ای برای قطعات فولادی جوشکاری شده پرداختند. آن‌ها به معرفی روش جدید بر پایه قانون هوک پرداختند که قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب را دارد. به این منظور قطعات فولادی با استفاده از فرآیند جوشکاری قوسی با محافظت گاز جوشکاری شدند و میزان تنش پسماند ایجاد شده در قطعات با استفاده از روش تداخل‌سنجی الگوهای لکه‌ای و روش معرفی شده اندازه‌گیری شده است. به این منظور چهار نمونه فلز پایه، فشاری، کششی و بازپخت شده کششی مطابق استاندارد برش خورده و مورد ارزیابی قرار گرفت. تمامی نمونه‌ها تحت آزمون کشش قرار گرفتند و در حین آزمون کشش از نمونه‌ها تصویربرداری شده است. پس از انجام آزمون کشش و تحلیل تصاویر ثبت شده توسط روش تداخل‌سنجی الگوهای لکه‌ای، مشخص شده است که الگوهای ایجاد شده جابجایی برای نمونه فلز پایه و جوش داده شده متفاوت می‌باشد و دلیل این امر وجود تنش پسماند در نمونه‌های جوشکاری شده می‌باشد [28]. در این مقاله با توجه به برخی برتری‌های روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال نسبت به سایر روش‌های نوری، به بررسی و اندازه‌گیری تنش پسماند بر روی قطعات فولادی جوش داده شده با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال پرداخته شده است. در این راستا پس از بررسی تئوری مورد استفاده، نمونه‌های تجربی آماده‌سازی شده و تنش پسماند با روش معرفی شده در آن‌ها اندازه‌گیری شده است.

2- تئوری روش

2-1- برهمنگاری تصاویر دیجیتال

روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال، روشی بر پایه ثبت و پردازش تصاویر است که هدف اصلی آن، به‌دست آوردن میدان جابجایی در محدوده مورد نظر از قطعات تحت تغییر شکل می‌باشد. در این روش ابتدا روی سطح قطعه الگوی لکه‌ای سیاه و

² Reference Image

³ Subset

¹ Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)

قانون هوک در فیزیک، مکانیک و دانش مواد، تقریبی برای نمایش رابطه خطی بین تغییر طول و بار وارد بر آن در محدوده کشسانی می‌باشد. 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 (8) بدست می‌آید:

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

که در آن، σ تنش، ε کرنش و E مدول یانگ می‌باشد. بر اساس این رابطه، چنانچه قطعه‌ای تحت نیروی کششی و یا فشاری قرار گیرد و نیروی اعمال شده در حدی باشد که ماده را تا حد الاستیک آن بارگذاری کند، میزان کرنش ایجاد شده در تمامی المان‌های آن از طریق رابطه‌ی هوک محاسبه خواهد شد. 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 محوری قرار گیرد، تنش کلی موجود در قطعه متأثر از نیروی اعمالی و همچنین تنش پسماند قبلی موجود در قطعه خواهد بود. در این حالت با استفاده از نمونه استاندارد و انجام تست کشش، مقدار مربوط به مدول یانگ قطعه محاسبه خواهد شد. طبق قانون هوک رابطه بین تنش فلز پایه σ_b و کرنش فلز پایه ε_b از طریق رابطه (9) محاسبه می‌شود:

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

که در آن E_b مدول یانگ فلز پایه بدون حضور تنش‌های پسماند است. با توجه به رابطه (9) تنش کلی در قطعه σ_{total} برای نمونه با حضور تنش پسماند و تنش کششی محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_{total} = \sigma_R + \sigma_b = E_R \varepsilon_R \quad (10)$$

به طوری که E_R مدول یانگ نمونه‌ی دارای تنش پسماند، ε_R کرنش در قطعه دارای تنش پسماند و σ_R میزان تنش پسماند موجود در قطعه می‌باشد. با توجه به روابط (9) و (10) میزان تنش پسماند در قطعه از طریق رابطه (11) محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_R = E_R \varepsilon_R - E_b \varepsilon_b \quad (11)$$

3- فعالیت‌های تجربی

به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند با روش ذکر شده، نمونه‌های دارای تنش پسماند از طریق فرآیند جوشکاری تهیه شدند. براساس تئوری روش ذکر شده، نمونه‌ها بایستی با استفاده از یک روش مکانیکی در محدوده الاستیک تحت تنش قرار گیرند. در

(4) برای کمینه کردن کمیت C باید گرادیان آن صفر شود.

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

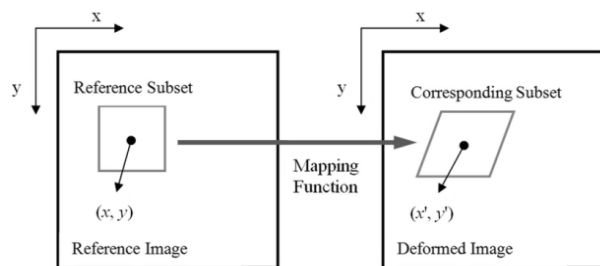


Fig. 1 Reference and deformed subsets

شکل 1 زیرناحیه‌های مرجع و تغییرشکل یافته

از روش نیوتن-رافسون برای محاسبه رابطه (4) و به دست آوردن ریشه‌های آن استفاده می‌شود. با استفاده از روش نیوتن-رافسون جایجایی‌ها و گرادیان‌های مربوط به آن با دقت کسری از پیکسل به دست می‌آید. نتایج این مرحله به عنوان مقادیر اولیه در الگوریتم نیوتن-رافسون برای زیرناحیه بعدی استفاده می‌شود. در این روش با انجام محاسبات کلی در نهایت کرنش‌ها در راستاهای مختلف به صورت روابط (5-7) می‌باشند:

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

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

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

که در آن‌ها، ε_{xx} ، ε_{yy} و ε_{zz} مؤلفه‌های کرنش اصلی در راستای X ، Y و Z می‌باشند. با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال می‌توان میدان کرنش ایجاد شده در اثر یک بارگذاری مشخص را در سطح قطعه به طور تجربی و بدون استفاده از کرنش‌سنج اندازه‌گیری نمود. شماتیکی از تجهیزات مورد نیاز برای آزمون برهمنگاری تصاویر دیجیتال در شکل 2 نمایش داده شده است.

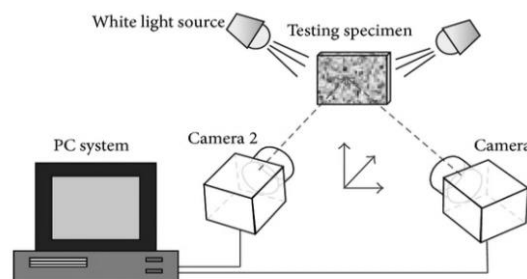


Fig. 2 Schematic of DIC equipment

شکل 2 شماتیکی از تجهیزات روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال

2-2- اندازه‌گیری تنش پسماند

در این تحقیق برای بررسی تنش پسماند، اطمینان از صحت نتایج و ایجاد قابلیت مقایسه نتایج از سه نوع نمونه استفاده شده است. نمونه اول از جنس فلز بدون هیچ نوع عملیات جوشکاری به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. نمونه دوم از جنس فلز پایه با انجام عملیات جوشکاری با پارامترهای ذکر شده که هیچ‌گونه عملیات حرارتی تنش زدایی بر روی آن انجام نشده است. نمونه سوم که پس از جوشکاری، عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر روی آن انجام شده است. به منظور به ابعاد رساندن نمونه‌ها از دستگاه تخلیه الکتریکی برش وایرکات استفاده شده است. مطابق شکل 4 طول کلی نمونه 130، طول گیج 57، عرض 12/5، ضخامت 2 میلی‌متر و شعاع فیلت نیز 12/5 میلی‌متر می‌باشد. نحوه برش خوردن قطعات در شکل 5 نشان داده شده است.

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. نمودار نیرو-جابجایی قطعه فولادی مورد استفاده در شکل 6 نمایش داده شده است.

به منظور کالیبراسیون سیستم و بررسی دقت اولیه روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، میزان جابجایی نمونه با دو روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و استفاده از اکستنسومتر مورد ارزیابی قرار گرفت.

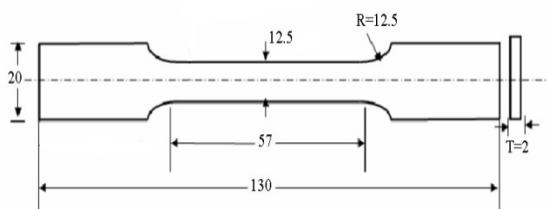


Fig.4 Dimensions of the tensile test sample (dimensions in millimeters)
شکل 4 ابعاد نمونه تست کشش (ابعاد به میلی‌متر)

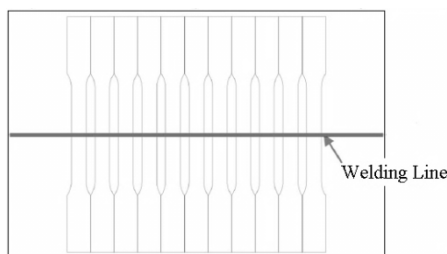


Fig. 5 Schematic of welded specimens of tensile test
شکل 5 شماتیک نمونه‌های جوشکاری شده آزمون کشش

فعالیت‌های تجربی این تحقیق، کشش نمونه‌ها با دستگاه تست کشش سروو الکترومکانیکال سنتام¹ با ظرفیت 2 تن به همراه فک دستی WG-20F و اکستنسومتر کورس بلند ELP500 انجام شد. برای اندازه‌گیری میزان جابجایی ایجاد شده در قطعه در حین آزمون کشش و به‌کارگیری روش برهم‌نگاری، از دوربین سی سی دی 3/2² مگاپیکسل استفاده شده است. کنترل دوربین توسط نرم‌افزار IC Capture 2.4 انجام می‌شود و نتایج تصویر برداری در نرم‌افزار GOM Correlate مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مجموعه مورد استفاده برای روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی و کشش در شکل 3 نمایش داده شده است.

برای اتصال قطعات، فرآیند جوشکاری قوسی با گاز محافظ³ بر روی نمونه‌هایی از جنس فولادهای کربنی⁴ انجام شد. برای حذف اثرات پارامترهای جوش در تنش‌های ایجاد شده، فرآیند جوشکاری برای تمامی نمونه‌ها به طور یکسان با سرعت 2mm/s و جریان جوش 130A انجام شد. نمونه‌ها از جنس ورق فولادی با کد استاندارد ASTM A36 انتخاب شدند که یک ورق فولادی کم کربن دارای قابلیت جوشکاری و شکل‌پذیری مناسبی می‌باشد. خواص مکانیکی جنس فلز پایه در جدول 1 نمایش داده شده است.

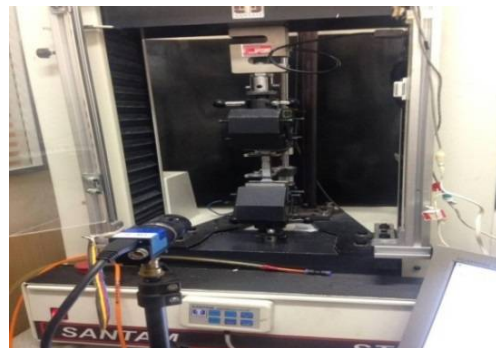


Fig. 3 Digital image correlation equipment

شکل 3 تجهیزات اعمال بار و برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

جدول 1 مشخصات مکانیکی فولاد ASTM A36

Table 1 Mechanical properties of ASTM A36 steel

مشخصات	پارامتر
ASTM A36	نوع ماده
210	مدول یانگ (GPa)
0/26	ضریب پواسون
7850	چگالی (Kg/m ³)

¹ SANTAM STM 20

² Charged Coupled Device (CCD)

³ Gas Metal Arc Welding (GMAW)

⁴ ASTM A36

جابجایی‌های ثبت شده توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و اکستنسومتر نشان داده شده است.

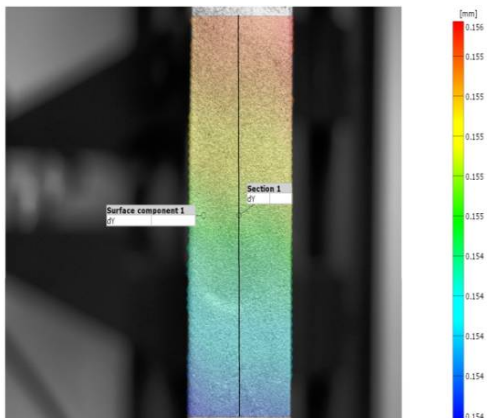


Fig. 9 Displacement contour recorded using DIC method

شکل 9 کانتور جابجایی ثبت شده توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

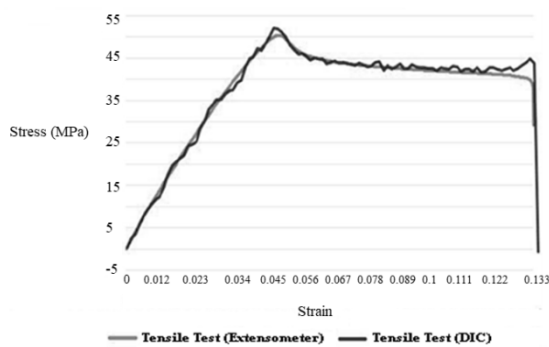


Fig. 10 Amount of displacement recorded using two methods of DIC and extensometer

شکل 10 میزان جابجایی ثبت شده توسط دو روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و اکستنسومتر

با توجه به شکل 10 مشخص است که نتایج جابجایی به دست آمده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، تطابق خوبی با روش استفاده از اکستنسومتر دارد و بر این اساس می‌توان از آن با دقت بالایی برای اندازه‌گیری تمام میدانی کرنش در سطح سایر نمونه‌ها نیز بهره برد. پس از تایید دقت روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی به انجام آزمون کشش برای تعیین میزان تنش پسماند پرداخته شده است. در حین انجام آزمون کشش، تغییر شکل ایجاد شده در سه نمونه توسط سیستم برهمنگاری تصاویر دیجیتالی ثبت شد. در حین تصویربرداری، نورپردازی نمونه‌ها باید به دقت انجام شود تا تصاویر ثبت شده کیفیت لازم را برای محاسبه نتایج با دقت بالا داشته باشند. میزان تغییر شکل ایجاد شده در نقاط مختلف قطعه بر اساس جابجایی الگوی تصادفی و مقایسه با مقدار مرجع محاسبه می‌شود. با هدف دستیابی به دقت بالاتر، کالیبراسیون نرم‌افزار با اعمال اندازه‌های هندسی مشخص انجام شده است. در شکل 11 نمونه‌ای از عملیات

برای ایجاد الگوی لکه‌ای¹ مورد نیاز در روش برهمنگاری، از اسپری رنگ سفید و مشکی استفاده شده است که در شکل 7 نمونه شاهد پس از ایجاد الگوی لکه‌ای و در شکل 8 تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات کشش نشان داده شده است.

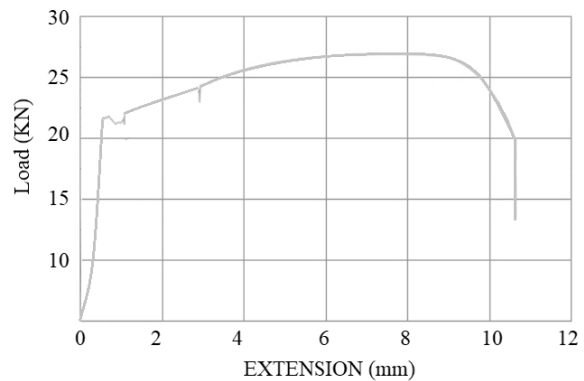


Fig. 6 Load-displacement diagram of A36 steel

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی فولاد A36

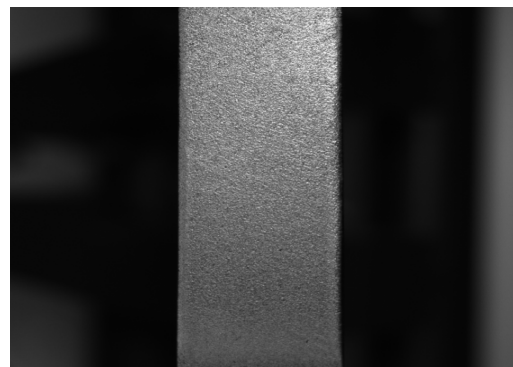


Fig. 7 Sample of tensile test with speckle pattern

شکل 7 نمونه آزمون کشش با الگوی لکه‌ای

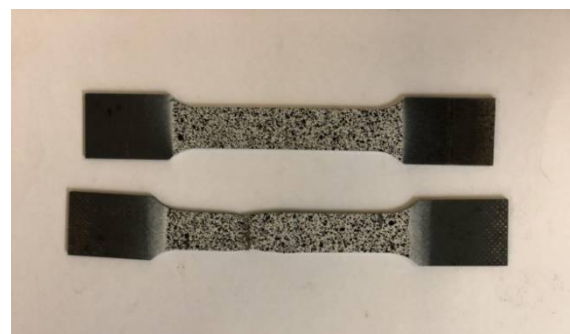


Fig. 8 Sample of base metal before and after tensile test

شکل 8 نمونه فلز پایه قبل و پس از آزمون کشش

کانتور جابجایی محاسبه شده توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مربوط به قطعه در حین آزمون کشش در شکل 9 نشان داده شده است. در شکل 10 نتایج مقایسه

¹ Speckle pattern

کالیبره کردن نرم‌افزار نشان داده شده است.

با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی قطعه پایه (شکل 6) محدوده الاستیک قطعه مشخص شده است.

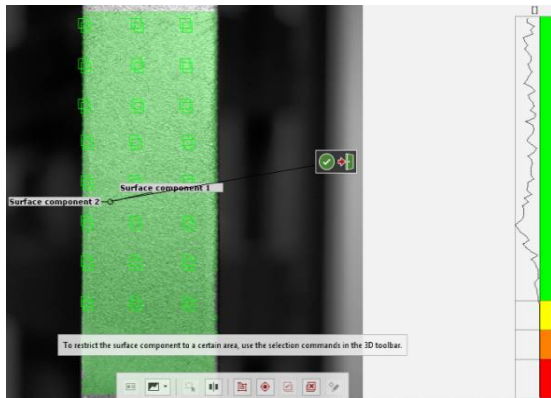


Fig. 12 Determination the quality of the created spot pattern

شکل 12 تعیین کیفیت لکه‌ای ایجاد شده

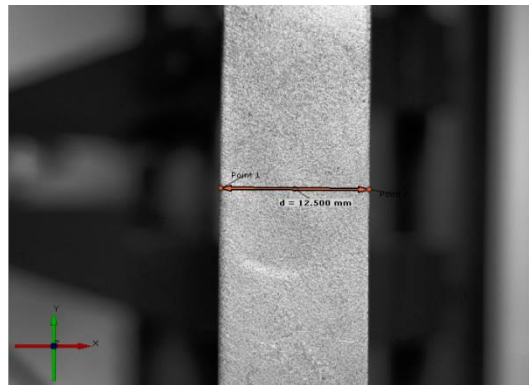


Fig.11 Definition of sample geometric dimensions in GOM software

شکل 11 تعریف ابعاد هندسی نمونه در نرم‌افزار GOM

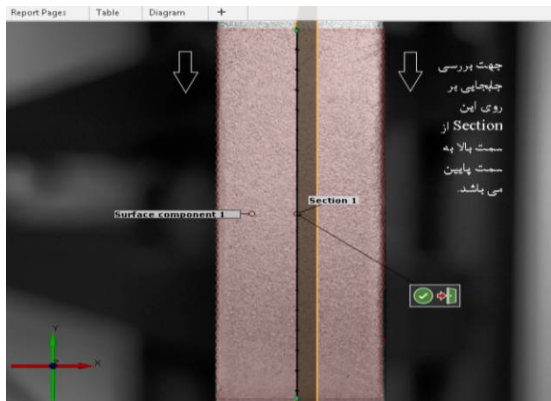


Fig. 13 The path defined on the sample

شکل 13 مسیر تعریف شده بر روی نمونه

با توجه به محدوده الاستیک قطعه مورد نظر سه نیروی 3، 4 و 5 کیلونیوتن برای انجام آزمون انتخاب شدند. علت انتخاب این سه مقدار نیرو، انجام بررسی‌ها و اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند در محدوده الاستیک می‌باشد. به علت مشخص بودن مقادیر نیرو، سطح مقطع و طول اولیه گیج، مدول یانگ قطعه فولادی نیز بدست خواهد آمد. با توجه به محاسبات عددی مقدار مدول یانگ قطعه فولادی 209GPa محاسبه شده است. در شکل‌های 14 و 15 نتایج اندازه‌گیری جابجایی در طول مسیر خط مرکزی نمونه‌های پایه و جوشکاری شده نشان داده شده است. قابل ذکر است که همه نمودارهای مربوط به فاصله-جابجایی که در ادامه ارائه شده است، یکنواخت‌سازی و نویزگیری شده‌اند تا نتایج به صورت شفاف و قابل مقایسه ارائه شوند. همانگونه که در شکل 14 مشاهده می‌گردد، در نمودار تغییر مربوط به قطعه پایه میزان تغییر شکل در طول مسیر تعیین شده دارای شیب یکنواختی می‌باشد. مطابق شکل 15،

پس از تعیین ابعادی نمونه، بایستی کیفیت لکه‌ای ایجاد شده مورد بررسی قرار گیرد. کیفیت نامناسب لکه‌ای باعث ایجاد خطا در نتایج به دست آمده خواهد شد. این کیفیت با تغییر پارامترهای اندازه زیرمجموعه¹ و فاصله بین نقاط² قابلیت بهینه شدن خواهد داشت و در انتها بهترین حالت ممکن انتخاب می‌شود. با توجه به شکل زیر، ارزیابی نرم‌افزار از لکه‌ای ایجاد شده بر روی نمونه رنگ سبز ایجاد شده و دارای کیفیت قابل قبول برای لکه‌ای می‌باشد.

با توجه به شکل 12 مشخص شده است که لکه‌ای ایجاد شده بر روی نمونه دارای دقت بالایی بوده و تمامی نواحی نمونه در منطقه کیفیت بالای لکه‌ای واقع شده است. پس از وارد کردن تمامی تصاویر ثبت شده از آزمون کشش به نرم‌افزار، تحلیل بر روی تمامی نقاط نمونه انجام شده است.

اندازه تنش پسماند، بر روی نقاط موجود بر روی یک مسیر تعریف شده از سمت بالا به پایین مورد بررسی قرار گرفته است. تعریف مسیر اصولاً در نمای دید قطعه‌کار و در جهت‌های مورد نظر اعمال خواهد شد و نرم‌افزار دارای این قابلیت می‌باشد که در تمامی راستاها نتایج را محاسبه کند. در شکل 13 مسیر ایجاد شده بر روی نمونه و جهت مورد بررسی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار مورد استفاده، دو نوع فیلتر فضایی³ و زمانی⁴ وجود دارد که تنظیم کردن مناسب مقادیر آن‌ها تأثیر زیادی بر دقت نتایج به دست آمده خواهد داشت.

4- بحث و تحلیل نتایج

¹ Facet size

² Point distance

³ Spatial

⁴ Temporal

نمودار تغییر شکل ایجاد شده در طول مسیر تعریف شده برای قطعه جوش داده شده دارای شیب یکسان نمی‌باشد. این شیب در نواحی که تحت تأثیر اثرات جوشکاری نمی‌باشد، دارای مقداری ثابت و نزدیک به فلز پایه است. در نواحی که تحت تأثیر فرآیند جوشکاری است، مقادیر جابجایی دارای شیب متفاوتی از نواحی دور از جوش است. از آنجا که گرده جوشکاری در این نمونه‌ها به طور کامل سنگ زده شده و برداشته شده است، تغییرات اثر نیرو در جابجایی این نقاط در محدوده الاستیک می‌تواند ناشی از وجود تنش پسماند موجود در نمونه باشد. به منظور ایجاد امکان بررسی کمی و دقیق‌تر نتایج، هر نمونه تحت سه نیروی 3، 4 و 5 کیلونیوتن مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در شکل‌های 16 تا 18 نشان داده شده است و مشاهده می‌گردد همه آزمایش‌ها روند یکسانی ارایه می‌دهند.

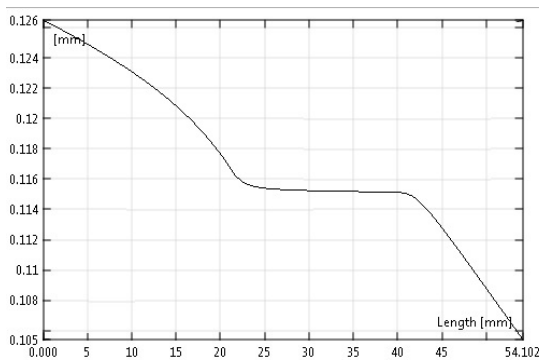


Fig.16 Displacement- distance diagram of welded sample and force 3KN

شکل 16 نمودار جابجایی-فاصله نمونه جوش داده شده نیروی 3 کیلونیوتن

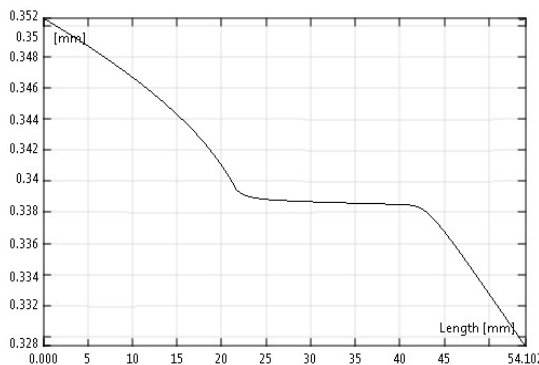
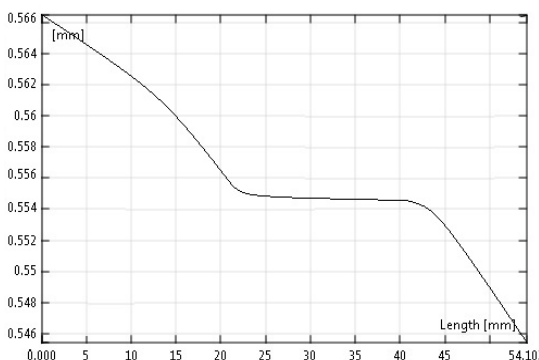


Fig. 17 Displacement- distance diagram of welded sample and force 4KN

شکل 17 نمودار جابجایی-فاصله نمونه جوش داده شده نیروی 4 کیلونیوتن



شکل 14 نمودار جابجایی-فاصله نمونه پایه

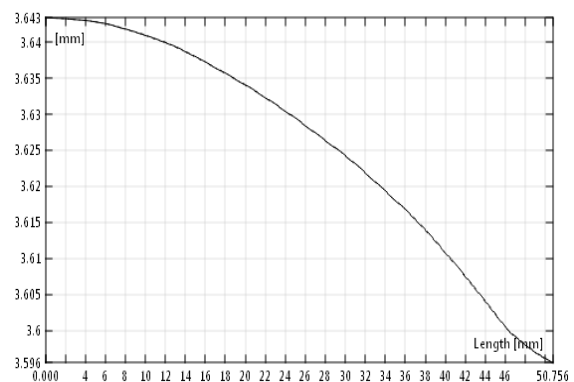


Fig. 14 Displacement- distance diagram of base sample

شکل 14 نمودار جابجایی-فاصله نمونه پایه

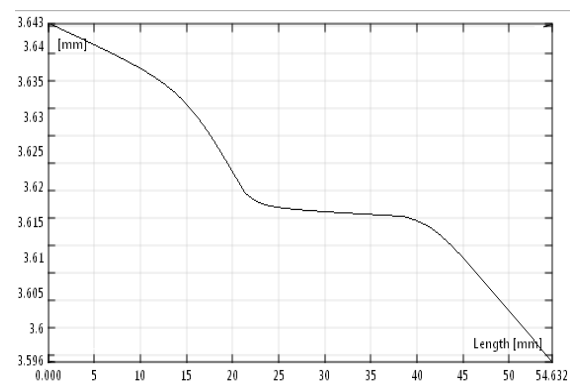


Fig. 15 Displacement- distance diagram of welded sample

شکل 15 نمودار جابجایی-فاصله نمونه جوش داده شده

به منظور بررسی میزان اثر تنش پسماند در نمونه‌های جوشکاری شده، نمونه‌های آزمون پس از جوشکاری، با استفاده از عملیات آنیلینگ تنش‌گیری شدند تا تنش‌های پسماند داخل آن‌ها تخلیه شده و نتایج برای نمونه‌های جوشی با تنش پسماند

متفاوت از یکدیگر می‌باشند. با توجه به مقادیر جابجایی و طول اولیه نمونه مقادیر کرنش ایجاد شده در حین آزمون کشش محاسبه شده است. با توجه به مقادیر کرنش به دست آمده و مقادیر مدول یانگ ثبت شده برای نمونه‌ها، مقادیر تنش در تمامی نواحی نمونه در حین انجام آزمون کشش محاسبه شده است. در جدول 3 نیز نتایج مربوط به آزمون کشش-برهمنگاری برای نمونه آنیل شده نشان داده شده است.

به منظور محاسبه مقادیر تنش پسماند در نواحی قطعه مورد نظر، مقادیر کرنش تمامی نمونه‌ها به صورت کمی استخراج شده و مقدار تنش پسماند مطابق رابطه (11) محاسبه شده است. نتایج مربوط به تنش‌ها در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 2 نتایج عددی محاسبه شده برای نمونه جوشکاری شده بدون عملیات حرارتی

Table 2 Numerical results calculated for welded sample without heat treatment

5	4	3	نیروی کششی (KN)	
2.5e-5	2.5e-5	2.5e-5	سطح مقطع (m ²)	فلز پایه
2e+2	1.6e+2	1.2e+2	تنش (MPa)	
5.44e+1	4.33e+1	3.27e+1	تغییر شکل (μm)	ناحیه جوش
9.56e-4	7.61e-4	5.74e-4	کرنش	
2.09e+2	2.10e+2	2.09e+2	مدول یانگ (GPa)	
3.6e-5	3.6e-5	3.6e-5	سطح مقطع (m ²)	
1.39e+2	1.11e+2	0.83e+2	تنش (MPa)	
3.32e+1	2.95e+1	1.89e+1	تغییر شکل (μm)	
5.84e-4	5.18e-4	3.32e-4	کرنش	
2.38e+2	2.14e+2	2.5e+2	مدول یانگ (GPa)	

جدول 3 نتایج عددی محاسبه شده برای نمونه جوشکاری شده با عملیات حرارتی

Table 3 Numerical results calculated for welded sample with heat treatment

5	4	3	نیروی کششی (KN)	
2.5e-5	2.5e-5	2.5e-5	سطح مقطع (m ²)	فلز پایه
2e+2	1.6e+2	1.2e+2	تنش (MPa)	
5.44e+1	4.33e+1	3.27e+1	تغییر شکل (μm)	ناحیه جوش
9.56e-4	7.61e-4	5.74e-4	کرنش	
2.09e+2	2.10e+2	2.09e+2	مدول یانگ (GPa)	
3.6e-5	3.6e-5	3.6e-5	سطح مقطع (m ²)	
1.39e+2	1.11e+2	0.83e+2	تنش (MPa)	
3.68e+1	3.29e+1	2.09e+1	تغییر شکل (μm)	
6.91e-4	6.47e-4	4.15e-4	کرنش	
2.15e+2	1.92e+2	2.25e+2	مدول یانگ (GPa)	

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که عملیات آنیل کردن

Fig.18 Displacement- distance diagram of welded sample and force 5KN

شکل 18 نمودار جابجایی-فاصله نمونه جوش داده شده نیروی 5 کیلو نیوتن

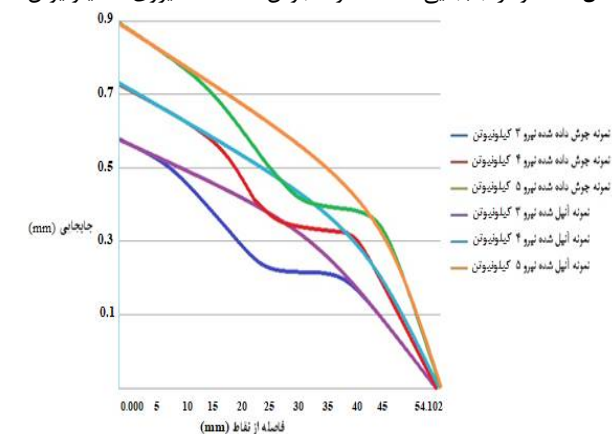


Fig. 19 Displacement- distance diagram of welded samples with and without heat treatment

شکل 19 مقایسه نمودار جابجایی - فاصله نمونه‌های جوشکاری شده و قطعات آنیل شده

با توجه به شکل 19 مشخص می‌شود که در نمونه‌های جوش داده شده بدون عملیات حرارتی، نمودار جابجایی-فاصله روند کلی کاهش مداومی را طی می‌کند. اما در بخشی از نمونه که تنش پسماند ناشی از عملیات جوشکاری وجود دارد، روند یکنواخت کاهش این نمودار با شیب کمتر ادامه یافته و حتی به سمت صفر میل کرده است. دلیل این امر، وجود ترکیبی از تنش‌های پسماند در داخل قطعه می‌باشد که این تنش با تغییر ضرایب الاستیک توانسته در مقابل کشش مقاومت کرده و میزان جابجایی این بخش از قطعه را حدی کاهش دهد. انجام عملیات حرارتی آنیلینگ، تا حد زیادی موجب حذف تنش پسماند موجود در نمونه‌های جوش داده شده خواهد شد. با حذف تنش پسماند نمودار جابجایی-فاصله به حالت نمونه پایه نزدیک شده و حالت شیب یکنواخت کاهش را پیدا خواهد کرد. در جدول 2 تمامی مقادیر مربوط به آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است. با توجه به ابعاد ارائه شده در شکل 4 سطح مقطع مربوط به تمامی نمونه‌ها برابر $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ می‌باشد. همان‌گونه که بیان شده است نیروهای مورد استفاده برای انجام آزمون کشش، 3، 4 و 5 کیلو نیوتن می‌باشد. مقادیر انتخاب شده برای نیروها بر اساس شکل 6 انتخاب شده است و تمامی این مقادیر در ناحیه الاستیک نمونه می‌باشد. با اعمال این نیروها بر روی نمونه در حین انجام آزمون کشش، مقادیر جابجایی توسط سیستم برهمنگاری تصاویر دیجیتالی ثبت شده است. این مقادیر جابجایی در جدول 2 نشان داده شده است. باید توجه داشت که مقادیر جابجایی در طول نمونه در دو ناحیه فلز پایه و جوش

- correlation. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*, 16(1), 19-28, 2022.
- [5] Huang, X., Liu, Z., & Xie, H. Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mechanica Sinica*, 26(6), 570-583, 2013.
- [6] Peters, W. H., Ranson, W. F., Sutton, M. A., Chu, T. C., & Anderson, J. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6), 226738, 1983.
- [7] Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3), 133-139, 1983.
- [8] Sutton, M. A., Mingqi, C., Peters, W. H., Chao, Y. J., & McNeill, S. R. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3), 143-150, 1986.
- [9] Vendroux, G. Correlation: A digital image correlation program for displacement and displacement gradient measurements. *GALCIT Report No. SM90-19, California Institute of Technology*, 1990.
- [10] Vendroux, G., & Knauss, W. G. Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 38(2), 86-92, 1998.
- [11] Wang, Y., & Cuitiño, A. M. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation. *International Journal of Solids and Structures*, 39(13-14), 3777-3796, 2002.
- [12] Quinta da Fonseca, J., Mummery, P. M., & Withers, P. J. Full-field strain mapping by optical correlation of micrographs acquired during deformation. *Journal of microscopy*, 218(1), 9-21, 2005.
- [13] Jin, H., & Bruck, H. A. Pointwise digital image correlation using genetic algorithms. *Experimental Techniques*, 29(1), 36-39, 2005.
- [14] Réthoré, J., Hild, F., & Roux, S. Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(49-52), 5016-5030, 2007.
- [15] Réthoré, J., Hild, F., & Roux, S. Extended digital image correlation with crack shape optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 73(2), 248-272, 2008.
- [16] Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., & Orteu, J. J. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(10), 746-757, 2008.
- [17] Barranger, Y., Doumalin, P., Dupré, J. C., & Germaneau, A. Strain measurement by digital image correlation: influence of two types of speckle patterns made from rigid or deformable

در تمامی نمونه‌ها تأثیر زیادی بر روی کاهش تنش پسماند داشته است و این میزان به صورت درصد در ازای تمامی نیروهای کشش محاسبه شده است. مطابق شکل 19 شیب نمودار جابجایی-فاصله کلیه نمونه‌های آنیل شده به نمونه پایه نزدیک شده است و دلیل آن هم کاهش تنش پسماند در نمونه‌ها با اعمال عملیات حرارتی بوده است.

جدول 4 مقدار تنش پسماند موجود در نمونه‌ها (MPa)

Table 4 Residual stress of samples (MPa)			
درصد کاهش (%)	نمونه آنیل شده	نمونه جوشکاری شده	نیروی کشش (KN)
28/1	-26/5	-36/9	3
27/4	-35/5	-48/9	4
15/8	-51/23	-60/9	5

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تنش پسماند ایجاد شده در قطعات فولادی جوشکاری شده با فرآیند جوشکاری قوسی با محافظت گاز و جریان 130 آمپر توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در شرایط جوشکاری بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر تنش پسماند در تمامی نمونه‌ها با اعمال عملیات حرارتی کاهش یافته است. میزان این کاهش برای نمونه با نیروی 3KN به میزان 28/1%، نمونه 4KN به میزان 27/4% و نمونه 5KN به میزان 15/8% می‌باشد. روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی روشی نو و مناسب برای ارزیابی غیرمخرب تنش پسماند می‌باشد.

6- مراجع

- [1] Shokrieh, M. M. (Ed.). *Residual stresses in composite materials*. Woodhead publishing, 2014.
- [2] Peng, Y., Zhao, J., Chen, L. S., & Dong, J. Residual stress measurement combining blind-hole drilling and digital image correlation approach. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106346, 2021.
- [3] Orozco-Caballero, A., Jackson, T., & Da Fonseca, J. Q. High-resolution digital image correlation study of the strain localization during loading of a shot-peened RR1000 nickel-based superalloy. *Acta Materialia*, 220, 117306, 2021.
- [4] Tho, P. D., Tien, T. M., Thanh, D. T., Ngan, V. M., & Ngoc, V. M. Experimental investigation of the secondary creep of fiber reinforced concrete at high stress: Macroscopic measurement and digital image

- stress evaluation at the micron scale. *Surface and Coatings Technology*, 251, 151-161, 2014.
- [24] Daynes, N., Horne, G., Heard, P. J., Hodgson, D. Z. L., & Shterenlikht, A. Microscale residual stress measurement in steel using focused ion beam slotting and digital image correlation. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Residual Stresses* (Vol. 23), 2008.
- [25] Winiarski, B., & Withers, P. J. Micron-scale residual stress measurement by micro-hole drilling and digital image correlation. *Experimental mechanics*, 52(4), 417-428, 2012.
- [26] Nelson, D. V., Makino, A., & Schmidt, T. Residual stress determination using hole drilling and 3D image correlation. *Experimental Mechanics*, 46(1), 31-38, 2006.
- [27] Kim, K., Choi, T., gyun Na, M., & Jung, H. Residual stress measurement on the butt-welded area by electronic speckle pattern interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(1), 115-125, 2015.
- [28] Kim, K., & Jung, H. 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, 2016.
- marks. *Strain*, 48(5), 357-365, 2012.
- [18] Schajer, G. S. Advances in hole-drilling residual stress measurements. *Experimental mechanics*, 50(2), 159-168, 2010.
- [19] Korsunsky, A. M., Sebastiani, M., & Bemporad, E. Residual stress evaluation at the micrometer scale: Analysis of thin coatings by FIB milling and digital image correlation. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2393-2403, 2010.
- [20] Krottenthaler, M., Schmid, C., Schaufler, J., Durst, K., & Göken, M. A simple method for residual stress measurements in thin films by means of focused ion beam milling and digital image correlation. *Surface and Coatings Technology*, 215, 247-252, 2013.
- [21] Yaowu, X. U., & Rui, B. A. O. Residual stress determination in friction stir butt welded joints using a digital image correlation-aided slitting technique. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(3), 1258-1269, 2017.
- [22] Sebastiani, M., Eberl, C., Bemporad, E., & Pharr, G. M. Depth-resolved residual stress analysis of thin coatings by a new FIB-DIC method. *Materials Science and Engineering: A*, 528(27), 7901-7908, 2011.
- [23] Sebastiani, M., Eberl, C., Bemporad, E., Korsunsky, A. M., Nix, W. D., & Carassiti, F. Focused ion beam four-slot milling for Poisson's ratio and residual