



تأثیر ضخامت، ترتیب و ترکیبات فلزهای جوشکاری در تنش‌های پسماند در جوشکاری لوله‌های فولادی گاز با استفاده از فیلر LTT

علیرضا جمی¹، محمد رضا خوشروان آذر²، مجتبی یزدانی^{3*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مکانیک، m.yazdani@sut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 2 بهمن 1399

داوری اولیه: 10 بهمن 1399

پذیرش: 15 فروردین 1400

کلیدواژگان:

جوشکاری نفوذی

المان محدود

تنش‌های پسماند

LTT

در جوشکاری قوس الکتریکی، حرارت ناشی از قوس، باعث ایجاد انقباض و انقباض غیر یکنواخت در جوش و مناطق اطراف آن می‌شود. انقباض و انقباض غیر یکنواخت و تغییر شکل پلاستیک حاصل از آن، منبع اصلی ایجاد اعوجاج و تنش پسماند در سازه‌های جوشی است. توزیع تنش‌های پسماند در یک اتصال جوشی، به عواملی چون حرارت ورودی، سرعت جوشکاری قوسی، خواص مواد، پیش گرمایش، ضخامت قطعه، هندسه شیار و زمان‌بندی اجرایی جوش بستگی دارد. در این پژوهش یک اتصال سربسر به وسیله جوشکاری نفوذی با روش‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش سوراخ‌کاری مرکزی بوده و از نتایج آن برای راستی آزمایی مدل المان محدود توسعه داده شده، استفاده شده است. در مدل المان محدود ایجاد شده از حالت غیرکوپل حرارتی-مکانیکی استفاده گردیده و روش تولد و مرگ المان‌ها در شبیه‌سازی مواد پرمکند مورد نظر قرار گرفته است. در شبیه‌سازی انجام شده فرایند استحاله فازی در نظر گرفته شده و به کمک فیلر LTT معرفی شده، تنش‌های پسماند در جوش تک پاسه 15% کاهش و در جوش دو پاسه 17% کاهش در تنش‌های پسماند کششی را نشان می‌دهند. با بررسی تأثیر ترتیب و ترکیب پاس‌ها و نوع فیلهای جوشکاری، مشخص گردید ترکیب الکترود LTT با الکترود 6010 نتایج مطلوب‌تری را برای تنش‌های پسماند ارائه می‌دهد. در خصوص تأثیر تغییر ضخامت در مقطع نمونه‌ها خروجی نتایج تحلیل عددی، تغییرات محسوسی را نشان نمی‌دهد.

The Effect of Thickness, Welding Metals Sequence and Composition on Residual Stresses in Welding Gas Steel Pipes using LTT filler

Ali Reza Jami¹, Mohammad Reza Khoshrovan Azar¹, Mojtaba Yazdani^{2*}

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 22 January 2021

First Decision: 30 January 2021

Accepted: 4 March 2021

Keywords:

Penetration welding

Finite element

Residual stresses

LTT

Abstract

In electric arc welding, the heat generated by the arc causes non-uniform expansion and contraction in the weld and surrounding areas. Uneven expansion and contraction and the resulting plastic deformation are the main sources of residual distortion and stress in welded structures. The distribution of residual stresses in a welded joint depends on factors such as heat input, arc welding speed, material properties, preheating, part thickness, groove geometry and welding execution schedule. In this research, a head to head joint is investigated by penetration welding with experimental methods and finite element simulation. Residual stresses are measured by the central hole drilling method and by converting the obtained data into residual stresses, the obtained results are used to verify the developed finite element model. In the finite element model, the non-coupled thermal-mechanical mode is used and the method of birth and death of the elements is used in the simulation of filler materials. In the simulation, the phase transformation process is considered and with the help of LTT filler introduced, the residual stresses in the single-pass welding show a 15% reduction and in the two-pass welding show a 17% reduction in the tensile residual stresses. By examining the effect of the arrangement and composition of the passes and the type of welding fillers, it was found that the combination of LTT electrode with 6010 electrode provides more favorable results for residual stresses. Regarding the effect of thickness change in the cross section of the samples, the output of the results of both numerical analysis software does not show significant changes.

1- مقدمه

می‌مانند، تنش‌های پسماند در حالت خود تعادلی¹ یعنی برآیند

نیروها و ممان‌های تولید شده صفر می‌باشند. تنش‌های پسماند

تنش‌های پسماند به تنش‌هایی گفته می‌شوند که بعد از برداشتن

بارهای خارجی از روی یک جسم، همچنان در داخل آن باقی

¹ Self-equilibrating

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. R. Jami, M. R. Khoshrovan Azar, M. Yazdan, The Effect of Thickness, Welding Metals Sequence and Composition on Residual Stresses in Welding Gas Steel Pipes using LTT filler, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 11- 22, 2021 (in Persian)

منظور کاهش تنش‌های پسماند ایجاد نمایند. تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که استفاده از فیلرهای LTT باعث کاهش تنش‌های پسماند کششی شده که حتی بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری، عمرخستگی اتصالات جوش را بهبود بخشیده است. مهمترین اختلاف در ترکیب شیمیایی الکترودهای LTT با فیلرهای معمولی، وجود درصد زیادی عناصر Ni و Cr (تا 10 درصد) است. فیلرهای معمولی اغلب درصد ناچیزی از این عناصر را دارند. یکی از معایب الکترودهای LTT محدودیت تهیه آنها و از طرفی قیمت بالای آنها در مقایسه با الکترودهای رایج می‌باشد.

فیو و همکاران [4]، به بررسی تأثیر ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش‌های پسماند و اعوجاج در یک اتصال T شکل به کمک شبیه‌سازی المان محدود با در نظرگیری مدل تحلیلی کوپل حرارتی- مکانیکی پرداختند. پژوهش آنها نشان داد که در جوشکاری بلوکی، توزیع تنش‌های پسماند به خصوص تنش‌های پسماند عرضی، در شروع و پایان جوشکاری در وسط صفحه به ترتیب جوشکاری وابسته است. چنگ و همکاران [5]، تنش‌های پسماند را با استفاده از تحلیل المان محدود توسط نرم‌افزار ANSYS پیش‌بینی کرده و اثرات عوامل مختلفی چون سرعت جوشکاری، اندازه قطعه، قیدهای خارجی و پیش گرمایش را بر روی تنش‌های پسماند بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که تنش‌های پسماند طولی در مجاورت جوش، به دلیل مقاومت ماده در مقابل سرد شدن، از نوع کششی بوده و در نقاط دور از جوش به دلیل خود تعادلی از نوع فشاری است و اندازه تنش پسماند ماکزیمم در حد تنش تسلیم ماده است. تنش‌های پسماند عرضی از نوع کششی در وسط صفحه و تنش‌های فشاری در انتهای جوش روی می‌دهد. مقدار تنش‌های فشاری در نوع عرضی، بزرگتر از تنش‌های کششی می‌باشند. لگات [6]، مجموعه‌ای از جوش‌های سربه‌سر را که با تعداد پاس‌های مختلف از 4 تا 36 پاس در لوله‌های فولاد زنگ نزن ایجاد شده بودند، مدل‌سازی کرده‌اند. بررسی پارامتری آنها شامل مطالعه اثرات اندازه لوله (ضخامت لوله و تعداد پاس جوشکاری)، انرژی خالص، نسبت شعاع داخلی به ضخامت، تنش تسلیم جوش و درجه حرارت بین پاسی بود. تنش‌های محیطی و محوری در خط مرکزی جوش و منطقه HAZ در نمودارهایی رسم شد تا اثرهای هر یک از این متغیرها بر روی هر دو نوع تنش نشان داده شود. بر همین اساس، آنها توصیه‌هایی را برای به کارگیری تنش‌های پسماند در ارزیابی رشد ترک‌های سطحی در جوش‌های سربه‌سر محیطی در سیستم‌های هسته‌ای ارائه کردند. مالک و همکاران [7]، یک روش محاسباتی را برای آنالیز

بسته به نوع و مقدار آنها می‌توانند باعث کاهش استحکام خزشی و خستگی، ایجاد ترک تنش خوردگی¹، به وجود آمدن شکست ترد و یا کاهش استحکام گسست شوند. مقدار و توزیع تنش‌های پسماند در سازه‌های جوشی توسط عواملی چون توزیع درجه حرارت در جوش، انبساط حرارتی ماده و خواص مکانیکی ماده در دماهای بالا تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بنابراین پیش‌بینی دقیق این تنش‌ها اهمیت فوق العاده‌ای دارند تا از یکپارچگی سازه‌های جوشی، در حین کار اطمینان حاصل شود.

با توجه به تحقیقات کریم نیا و همکاران [1]، در جوشکاری قوس الکتریکی و در مرحله خنک‌شدن، فلزات تحت استحاله فازی قرار می‌گیرند. این تغییر فاز با آزاد شدن گرمای نهان، تغییر در ابعاد و اثرات شبه پلاستیسیته (پلاستیک یا مومسان) همراه است. آزاد شدن گرمای نهان در هنگام استحاله فازی، مشابه آزاد شدن آن در حین تبدیل فاز آن از مایع به جامد است. معمولاً در اکثر تحلیل‌ها آزادسازی گرمای نهان نادیده گرفته می‌شود. با این وجود، تغییرات ابعادی و حجم، اثرات قابل توجهی به جا می‌گذارند.

در پژوهش مارتینز و همکاران [2]، حرارت ناشی از قوس جوشکاری باعث ایجاد انبساط و انقباض غیریکنواخت در جوش و مناطق اطراف آن شده، این انبساط و انقباض غیریکنواخت و تغییر شکل پلاستیک حاصل از آن منبع اصلی ایجاد اعوجاج و تنش پسماند در سازه‌های جوشی است. بعد از جوشکاری، فلز دُوب شده و نواحی همجوار جوش سرد شده و فلز منقبض می‌شود. بعد از خاتمه انجماد و سرد شدن، یک تنش پسماند کششی در جوش به وجود می‌آید. هرچه حرارت ورودی بیشتر باشد، دمای منطقه دُوب بالاتر و انقباض ماده بعد از سرد شدن بیشتر و در نتیجه تنش‌های پسماند نهایی بزرگتر خواهند بود. اهمیت تنش‌های پسماند زمانی چشمگیر می‌شود که جسم تحت تنش خارجی نیز قرار بگیرد که در آن صورت، تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. محققان زیادی از جمله نوبرت و همکاران [3]، اثر این تنش‌های پسماند مضر را بر استحکام خستگی جوش بررسی کرده و نتیجه گرفتند که عمرخستگی اتصال در حضور تنش پسماند فشاری به خصوص در سطح افزایش می‌یابد.

مواد جوشکاری جدید مارتنزیتی با دمای تبدیل پایین²، که امروزه به الکترودهای LTT معروف می‌باشند؛ از این قابلیت برخوردارند؛ که تنش‌های پسماند فشاری در منطقه جوش به

¹ Stress Corrosion Crack (SCC)

² Low Transformation Temperature

گردیده است. در ادامه توزیع تنش‌های پسماند بررسی شده و تأثیر تعداد و ترکیب پاس‌های جوشکاری و ضخامت لوله‌های فولادی در تنش‌های پسماند ایجاد شده، بررسی گردیده است.

2- مواد و روش

2-1- تحلیل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی که از تحلیل حرارتی به دست آمده است، به معادلات تحلیل مکانیکی به عنوان بارگذاری حرارتی وارد می‌شوند. تنش و کرنش حرارتی در هر مرحله زمانی محاسبه می‌گردد و حالت نهایی تنش پسماند با انباشته شدن تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی به دست می‌آید.

2-2- خواص مکانیکی

وجود تغییرات دمایی بالا در حین فرایند جوشکاری باعث رفتار غیرخطی مواد در تغییر شکل‌های جوشی می‌شود. خواص مکانیکی مواد شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، استحکام تسلیم و ضریب انبساط حرارتی است که در تحلیل ترموالاستیک و ترموپلاستیک فرایند جوشکاری تأثیرگذار می‌باشند. خواص مکانیکی مواد نیز به شدت تابع دما بوده و با استفاده از نرم‌افزار JMatPro این خواص تولید و در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

2-3- انتقال حرارت

در حین جوشکاری انتقال حرارت از طریق تشعشع، همرفت و هدایت اتفاق می‌افتد. بر اساس معادلات انرژی، نرخ افزایش انرژی داخلی و انرژی جنبشی برای قطعه با انتقال حرارت صورت گرفته از سطوح قطعه و حرارت ایجاد شده در حجم قطعه کار، معادل قرار داده می‌شوند:

$$\frac{D}{Dt}(U + KE) = P + Q_c + Q_s \quad (1)$$

در رابطه (1)، U مقدار انرژی داخلی در حجم دیفرانسیلی dV با مختصات مکانی (x, y, z) و زمانی t ، KE انرژی جنبشی، Q_c نرخ گرمای عبوری از سطوح مجاور، Q_s مقدار حرارت تولید شده توسط منبع حرارتی و P کار نیروهای خارجی می‌باشد که برابر صفر قرارداده می‌شود، همچنین روابط زیر پیشنهاد شده است. [10]:

$$P = \frac{D}{Dt}(KE) + T_{ij} \frac{\partial q_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$Q_c = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dV \quad (3)$$

بنابراین معادله (1) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\text{div}q + \rho q_s \quad (4)$$

توزیع دما و تنش‌های پسماند حاصل، در حین جوشکاری استوانه‌های جدار نازک از جنس فولاد کم کربن ارایه نمودند. مطالعات پارامتری آن‌ها براساس شبیه‌سازی عددی انجام گرفته و اثر پارامترهای بحرانی فرایند جوشکاری بر روی تنش‌های پسماند جوشی بررسی شده است. آن‌ها دریافتند که، تنش‌های پسماند محیطی به موقعیت زاویه‌ای از نقطه شروع حساس می‌باشند ولی، تنش‌های پسماند محوری با تغییر موقعیت زاویه‌ای به صورت محسوسی تغییر نمی‌کنند. در روی سطح داخلی اثرات شروع جوش در هر دو نوع تنش محوری و محیطی شدیدتر می‌باشد. خال جوش‌ها در دو موقعیت 0 و 180 درجه اثر قابل توجهی بر روی تنش‌های محوری دارند در حالی که بر روی تنش‌های محیطی اثر قابل ملاحظه‌ای ندارد. رن و همکارانش [8]، به بررسی توزیع تنش‌های پسماند جوشی در جوشکاری محیطی لوله X80 به دو روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود پرداختند، روش المان محدود شامل یک مدل دو بعدی متقارن بود که در نرم‌افزار SYSWELD ایجاد شده بود و توسط نتایج حاصل از روش کرنش‌سنجی سوراخ مرکزی صحنه‌گذاری گردیده بودند. در این بررسی یک جوش 16 پاسه محیطی بر روی لوله‌ای به قطر خارجی 42 اینچ و ضخامت 28 میلی‌متر ایجاد شده و در نقاطی مقدار تنش به روش کرنش‌سنجی سوراخ مرکزی بدست آمده و در نهایت این نتایج برای صحنه‌گذاری مدل المان محدود استفاده شد و با استفاده از مدل المان محدود تنش‌های پسماند حاصل به طور کامل بررسی شدند. طبق نتایج بدست آمده، تنش‌های پسماند کششی در منطقه HAZ از مرکز جوش بیشتر می‌باشد و در برخی نقاط حتی به مقدار تنش تسلیم ماده هم می‌رسد و تنش‌های پسماند فشاری بجز در چند نقطه، بیشترین مقدار خود را در مرکز جوش دارا می‌باشند. مشایخی و هدایتی [9]، تأثیر ترتیب جوشکاری و هیدروتست بر تنش‌های پسماند جوشی در اتصال لوله‌های فولادی زنگ‌نزن از جنس 304 را بررسی کردند. مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که تأثیر ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش‌های پسماند در نقاط ابتدایی و انتهایی جوشکاری مشهود است. ضمن اینکه هیدروتست باعث کاهش تنش‌های پسماند به اندازه 65% مقدار اولیه شده است.

در این پژوهش یک اتصال سر به سر به وسیله جوشکاری نفوذی از طریق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با توجه به نتایج حاصل از آزمایش تجربی، مدل المان محدود مشابهی توسعه داده شده و اعتبارسنجی

جوشکاری به جز صفحه تقارن و ناحیه بالای حرارتی، اعمال می‌شود. برای این نواحی مقدار حرارت اتلافی از رابطه (9) محاسبه می‌شود:

$$Q = h_{convection}(T_i - T_a) + \varepsilon_{em}\sigma_{bol}(T_i^4 - T_a^4) \quad (9)$$

که $h_{convection}$ ضریب جابجایی، ε_{em} ضریب تشعشع و σ_{bol} ثابت بولتزمن است.

مقدار ضریب انتقال حرارت کلی ناشی از اتلاف حرارتی در فرایند جوشکاری را می‌توان با رابطه (10) تعیین کرد:

$$h_{total} = h_{convection} + \varepsilon_{em}\sigma_{bol}(T_i^3 + T_i^2T_a + T_a^2T_i + T_a^3) \quad (10)$$

بنابراین کل حرارت اتلافی از رابطه (11) تعیین می‌شود:

$$q = h_{total}(T_i - T_a) \quad (11)$$

2-5- انرژی جوش

باتوجه به نتایج ارائه شده توسط پاولیک [14] انرژی جوش یا حرارتی که از قوس الکتریکی وارد قطعه می‌شود از رابطه (12) به دست می‌آید.

$$Q \quad (12)$$

که در این رابطه، U ولتاژ قوس، I شدت جریان، V سرعت جوشکاری و η بازده قوس الکتریکی است. متعدد بودن عوامل موثر بر بازده قوس و پیچیدگی تاثیر آنها، مانع از تخمین دقیق آن می‌شود. در جدول 1 مقادیر بازده قوس الکتریکی برای تعدادی از روش‌های جوشکاری نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقادیر بسیار متفاوتی برای قوس الکتریکی در جوشکاری گزارش شده است، که این امر تعیین دقیق میزان انرژی حرارتی وارد بر اتصال را مشکل می‌سازد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول 6 برای مقادیر پارامترهای جوشکاری میزان انرژی حرارتی جوشکاری نمونه‌ها برای الکترودهای مورد استفاده با لحاظ راندمان 80% جوشکاری مطابق جدول 2 می‌باشد.

جدول 1 بازده قوس الکتریکی جوشکاری

Table 1 Arc welding efficiency

روش جوشکاری	نام مخفف لاتین	بازده حرارتی قوس (%)
جوشکاری الکتروده دستی	SMAW	85-66

جدول 2 میزان انرژی جوش وارد شده به نمونه‌ها

Table 2 Arc welding energy

Electrode	U(V)	I(A)	V(cm/min)	Q(kj)
E6010	24	100	16	720
LTT	24	70	21	480

2-6- روش جوشکاری

در این پژوهش، جوشکاری نمونه‌ها به روش جوشکاری الکتروده

ρ چگالی، $\frac{Du}{Dt}$ گرمای ویژه (C_p) ، حرارت تولیدی در واحد حجم و برابر $k \cdot \nabla T$ که k ضریب رسانایی گرمایی و T دما می‌باشد. با استفاده از قانون فوریه معادله به حالت زیر تبدیل می‌شود:

$$\rho C_p = \text{div}(k \cdot \nabla T) + \rho q_s \quad (5)$$

این معادله به عنوان معادله‌ی انتقال حرارت در جوشکاری استفاده می‌شود. نرم‌افزارهای SYSWELD و ABAQUS از حل عددی معادلات انتقال حرارت، تغییرات فاز و پلاستیسیته خطی به صورت وابسته به زمان برای مسائل جوشکاری استفاده می‌کنند. انتقال حرارت صورت گرفته از سطوح به صورت جابه‌جایی و توسط معادله (6) بیان می‌گردد.

$$q_i n_i = h(T - T_0) \quad (6)$$

و انتقال حرارت تشعشعی سطوح با رابطه (7) ارائه شده است.

$$q_i n_i = \sigma \varepsilon T^4 - \alpha q_r \quad (7)$$

در معادلات (6) و (7)، h ضریب انتقال حرارت همرفتی، T دمای سطح، T_i دمای محیط همرفت، σ ثابت استفان بولتزمن، ε ضریب انتشار سطح، α ضریب جذب سطح و q_r انتقال حرارت تشعشعی بر واحد حجم می‌باشد.

2-4- اتلاف حرارتی

در فرایند جوشکاری، اتلاف حرارتی به صورت تشعشع در دماهای بالا و در مجاورت جوش و انتقال حرارت به صورت همرفت در دماهای پایین‌تر صورت می‌گیرد. در بعضی از منابع از شرایط ترکیبی استفاده شده است که هر دو حالت انتقال حرارت را در بر می‌گیرد. با توجه به روابط ارائه شده توسط تنگ و همکاران [11]، برای ضریب انتقال حرارت وابسته به دما، معادله 8 معروف به مدل بریستکاد¹ ارائه شده است:

$$h = \begin{cases} 0.0668T \left(\frac{w}{m^2}\right) & 0 < T < 500^\circ C \\ 0.231T - 82.1 \left(\frac{w}{m^2}\right) & 500^\circ C < T \end{cases} \quad (8)$$

با توجه به نتایج ارائه شده توسط گلداد و همکاران [12]، خطای ناشی از عدم مدل‌سازی مناسب ضریب انتقال جابجایی، در استخراج خروجی حرارتی به شدت اثر گذار است. اما در تعیین توزیع تنش‌های پسماند اثر کمتری دارد. بررسی آنها نشان می‌دهد که با صرف‌نظر کردن از تشعشع، اختلاف دمایی، کمتر از 3 درصد می‌باشد، لذا می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. در مدل دیگری که توسط ماهر و همکاران [13]، ارائه‌گردیده است، از شرایط مرزی در قالب اتلاف حرارتی، فرض بر این است که شرایط تشعشع و جابجایی به محیط از تمام اطراف صفحه

¹ Brickstad

تحلیل مکانیکی استفاده شده است. روش تولد و مرگ المان² در شبیه‌سازی مواد پر کننده استفاده شده و اتلاف حرارتی به صورت ترکیبی از همرفت و تشعشع در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌ها، از المان‌های 8 گرهی با یک درجه آزادی دما از نوع DC3D8 برای تحلیل‌های حرارتی و المان‌های هشت گرهی با سه درجه آزادی جابجایی از نوع C3D8 برای تحلیل‌های مکانیکی استفاده شده است. در شکل‌های 1-الف و ب شرایط مرزی اعمال شده و در شکل 2-ب کانتورهای تنش در سطح داخلی و خارجی نمونه نشان داده شده‌است.

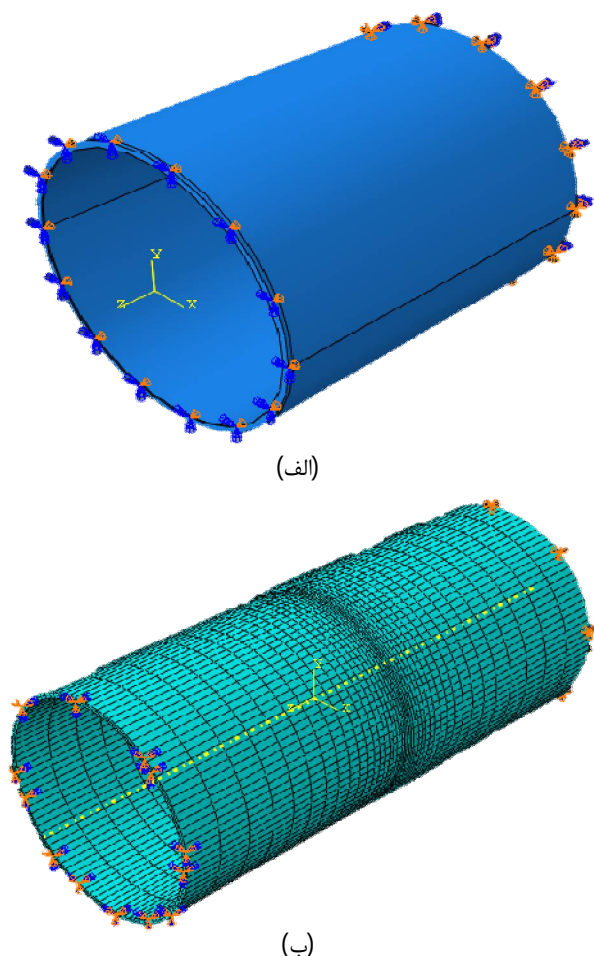


Fig. 1 a) Mechanical-thermal boundary conditions of symmetry, b) Mechanical boundary conditions

شکل 1 الف) شرایط مرزی مکانیکی - حرارتی تقارن، ب) شرایط مرزی مکانیکی

4- آزمون‌های تجربی

4-1- روش اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، از روش سوراخ‌کاری مرکزی

دستی¹ با قوس الکتریکی و الکترودهای پوشش‌دار بوده و در فرایند جوشکاری، نمونه‌ها چرخانده شده‌است.

2-7- جنس لوله

جنس لوله‌های بکار رفته برای ساخت نمونه‌ها از استاندارد API و از جنس API-5L-GRADE B با ضخامت 4/8 و 6/5 میلی‌متر انتخاب گردیده و تمامی مقطع لوله جوشکاری شده است؛ که در ادامه در جدول 3 و 4 مشخصات آنها ارائه شده‌است.

جدول 3 خصوصیات مکانیکی مواد لوله‌های مورد آزمایش

Grade	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
B	245	415

جدول 4 ترکیب شیمیایی مواد لوله‌های مورد آزمایش

C	Mn	P	S	Ni	Mo
%	%	%	%	%	%
0/28	1/2	0/03	0/03	0/5	0/15

2-8- نوع جوشکاری

جوشکاری از نوع جوش‌جریان مستقیم با قطبیت معکوس (DCEP) می‌باشد.

9-2- مشخصات الکترودهای جوشکاری

الکتروده AWS A5.1 E6010 که در صنعت به عنوان الکتروده E6010 شناخته می‌شود؛ از الکترودهای رایج مورد استفاده در صنایع و توسعه خطوط لوله و شبکه گازرسانی بوده و در جوشکاری لوله‌ها از آن استفاده می‌گردد. در این پژوهش از الکتروده AWS A5.4E318-16 با نام تجاری AMA1461 به عنوان الکتروده LTT استفاده شده و در جدول 5 مشخصات آن ارائه گردیده‌است. قطر تمامی الکترودهای بکار رفته در این تحقیق 3/2 میلی‌متر می‌باشد.

جدول 5 ترکیب شیمیایی فلز جوش LTT

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb
%	%	%	%	%	%	%
0/025	0/8	0/9	18/5	12/0	2/7	0/4

3- شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزارهای ABAQUS و SYSWELD

شبیه‌سازی فرایندهای جوشکاری به صورت غیر کوپل حرارتی - مکانیکی بوده و نتیجه تحلیل حرارتی به عنوان ورودی‌ها در

² birth and death method

¹ SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

و اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده، استفاده گردیده است.

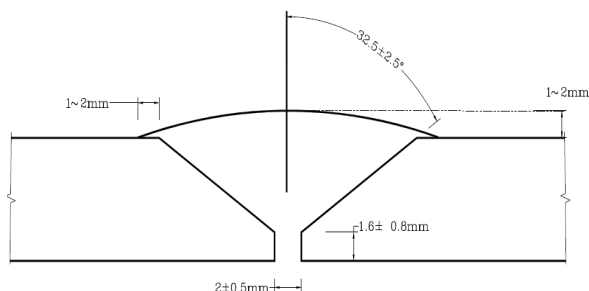


Fig. 3 Welding geometry

شکل 3 هندسه محل جوشکاری

جدول 6 پارامترهای جوشکاری نمونه‌های مورد آزمایش

Table 6 Welding parameters of the tested samples

Bead Number	Welding Process	Current Amp Range (A)	Voltage Range (V)	Table 3 welding parameters of test pipe Travel Speed Range (cm/min)
1(Root)	SMAW	70-50	28-24	13-9
2 (Hot pass)	SMAW	100-80	28-24	21-16

- جوشکاری تک پاسه با الکتروود E6010
- جوشکاری دو پاسه با الکتروود E6010
- جوشکاری تک پاسه با الکتروود AMA 1461
- جوشکاری دو پاسه با الکتروود AMA 1461
- جوشکاری دو پاسه با الکتروود AMA 1461 و الکتروود E6010

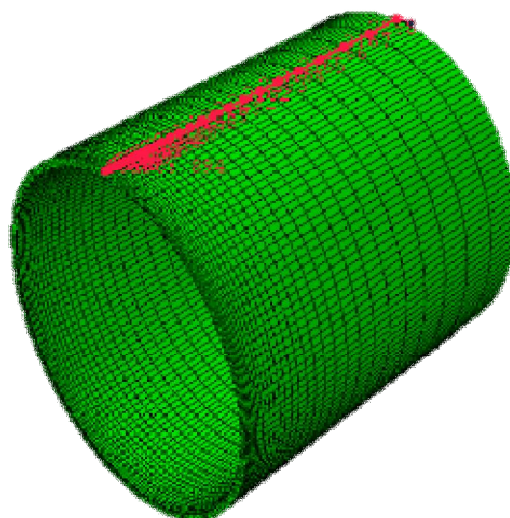
نمونه‌ها بعد از جوشکاری به منظور انجام آزمون‌ها و اندازه‌گیری به آزمایشگاه تحقیقاتی رفتار دینامیکی مواد دانشگاه صنعتی سهند تبریز منتقل شدند. آماده‌سازی‌های اولیه شامل شستشو، تمیزکاری و سمباده‌زنی محل‌های مورد نظر انجام شد و سپس کرنش‌سنج‌های سه جهته (رزت) با دقت در محل آماده‌سازی شده نصب گردیدند. بعد از اتصال به دستگاه ثبت داده¹ پر سرعت با نرخ داده برداری 1 میلیون دیتا در ثانیه، نسبت به سوراخ‌کاری و اندازه‌گیری کرنش‌ها اقدام شد. شکل - الف محل و نحوه اتصال کرنش‌سنج بر روی یک نمونه آزمایش را نشان می‌دهد و در شکل 4- ب همان نمونه بعد از سوراخ‌کاری مرکزی نشان داده شده است.

5- نتایج تحلیل عددی

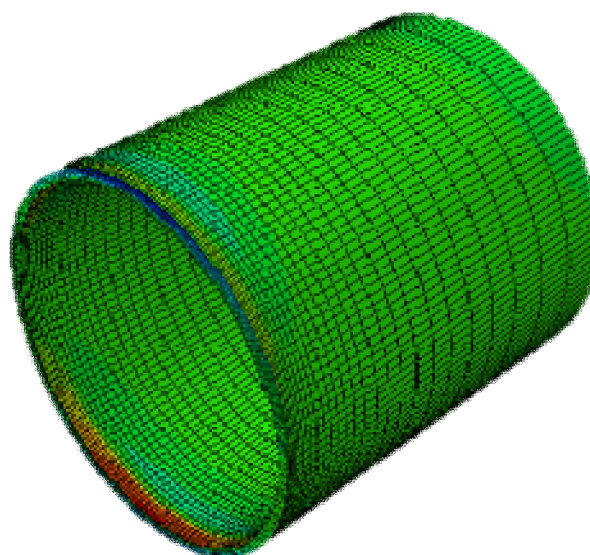
5-1- اثر ترکیب فیلرهای جوشکاری

- جوش یک پاسه

با توجه به شکل‌های 5- الف و ب به عنوان مثال نتایج حاصل از حل عددی توسط دو نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و SYSWELD ارایه شده‌اند که میزان تنش فشاری در منطقه بین



(الف)



(ب)

Fig. 2 a) Selective path to extract the results at an angle of 180 degrees from the starting point of welding, b) stress contour on the inner and outer surface of the pipe

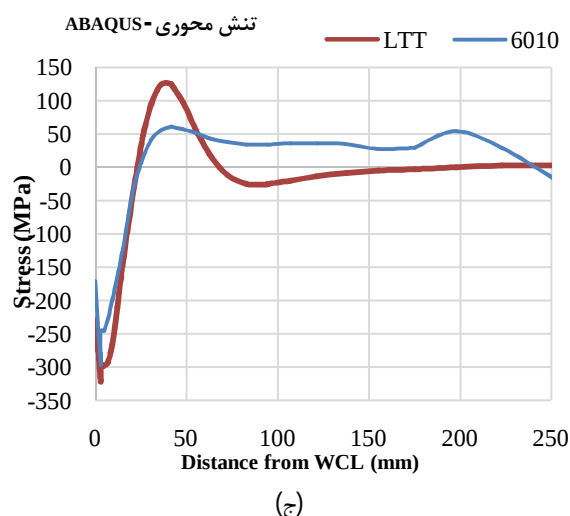
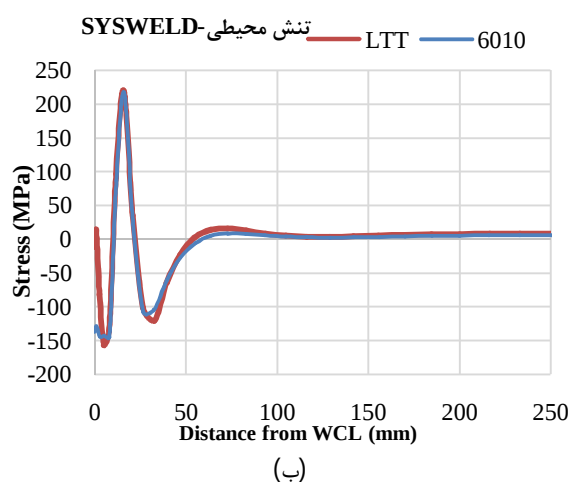
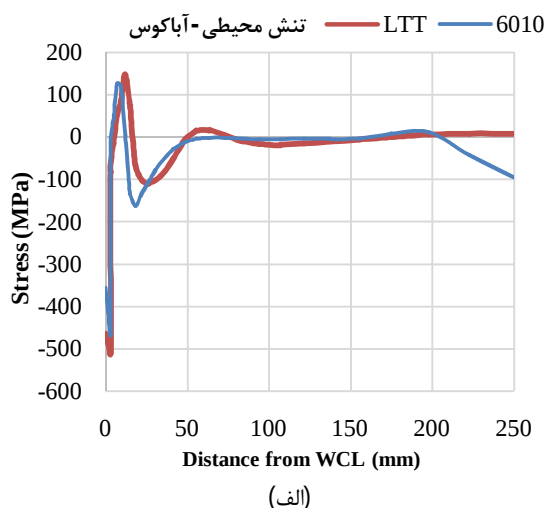
شکل 2 الف) مسیر انتخابی جهت استخراج نتایج در زاویه 180 درجه از نقطه شروع جوشکاری، ب) کانتور تنش در سطح داخلی و خارجی لوله

4-2- آماده‌سازی و تست نمونه‌ها

نمونه‌های مورد آزمایش بعد از برش به منظور پخ‌زنی و ایجاد هندسه محل اتصال، ماشین‌کاری گردیده (شکل 3) و در محل اجرای یکی از پروژه‌های شرکت ملی گاز استان آذربایجان غربی با توجه به شرایط اجرای شبکه توسعه گازسانی، در محل پروژه، در حالت‌های زیر مطابق با مشخصات ارائه‌شده در جدول 6، جوشکاری شده‌اند.

¹ Data Logger

مشاهده می‌شود که در این تنش تاثیر استحاله فازی قابل توجه نبوده است و نتایج ارایه شده توسط هر دو نرم‌افزار تطابق نسبی با هم دارند. با توجه به نتایج ماکزیمم مقدار تنش محیطی در منطقه تاج جوش و ماکزیمم مقدار تنش محوری در منطقه HAZ هر دو در قالب تنش فشاری اتفاق افتاده است.



تاج جوش و HAZ با لحاظ استحاله فازی، از 350 MPa در حالت استفاده از فیلر 6010 به 140 MPa در استفاده از فیلر LTT کاهش یافته و در محدوده خارج از ناحیه جوش، تنش کششی از 120 MPa با لحاظ استحاله فازی به 250 MPa افزایش یافته است. نتایج ارایه شده توسط دو نرم‌افزار برای این نوع از تنش باهم اختلاف دارند. در شکل 5 ج و 5 د نیز نتایج تنش محوری نمایش داده شده است.



Fig. 4 a) Sample rosette strain gauge installed, b) Rosette strain gauge sample installed after drilling
 شکل 4 الف) نمونه کرنش سنج رزت نصب شده، ب) نمونه کرنش سنج رزت نصب شده بعد از سوراخ کاری

فاحشی با تغییر جنس و ترکیب فیلر بکار رفته نشان نمی‌دهد.

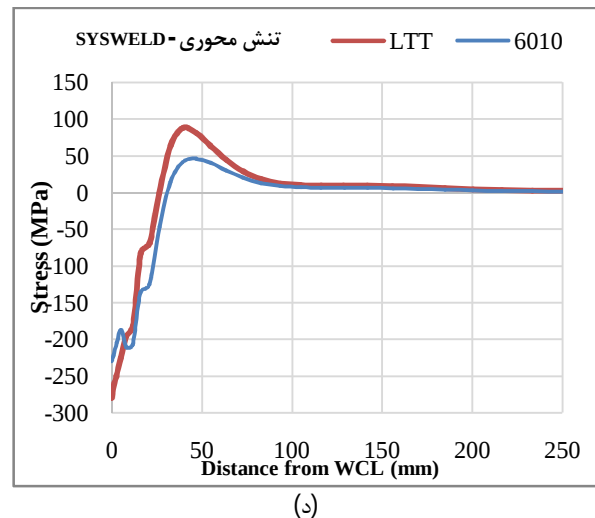
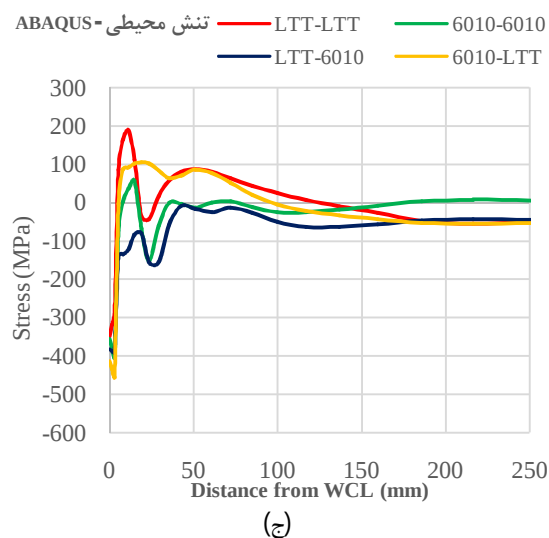
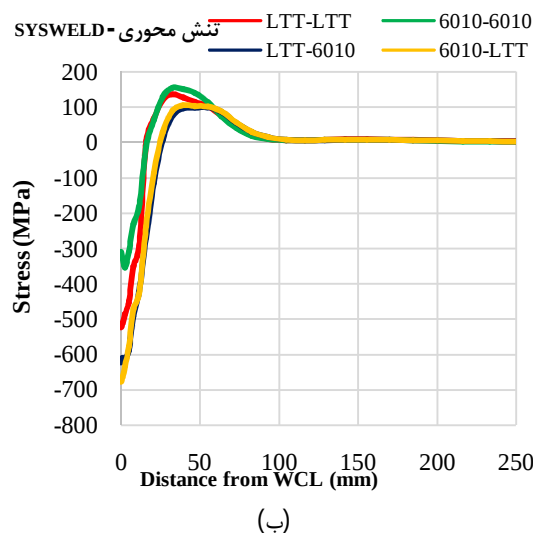
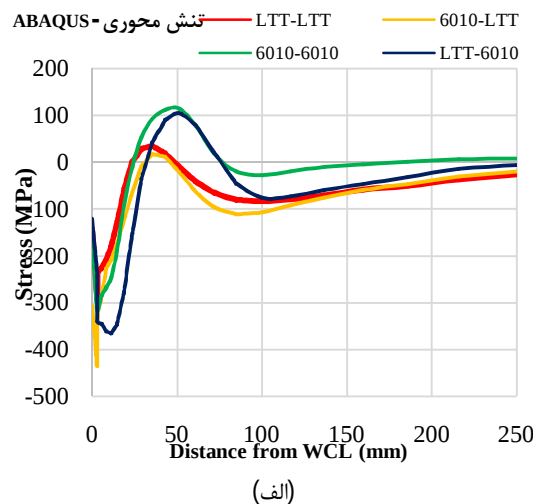


Fig. 5 A, B) Comparison of environmental stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD, c, d) Comparison of axial stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD in single-pass welding
شکل 5- الف، ب) مقایسه تنش‌های محیطی خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD، ج، د) مقایسه تنش‌های محوری خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD در جوش تک پاسه

- جوش دو پاسه

در این بخش به مقایسه نتایج جوش دو پاسه در دو نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی و نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی پرداخته می‌شود. با توجه به شکل‌های 6- الف و ب با لحاظ استحاله فازی مقادیر تنش‌های پسماند در منطقه خط جوش و ناحیه HAZ به مراتب بیشتر از مقادیر ناشی از عدم لحاظ استحاله فازی در خروجی نرم‌افزار ABAQUS است. با توجه به نتایج، ترکیب LTT-6010 (پاس اول با فیلر LTT و پاس دوم الکتروود E6010) دارای بیشترین مقدار تنش فشاری محوری در تنش پسماند می‌باشد. در ادامه در شکل 6- ج و 6- د تغییرات تنش محیطی بررسی گردیده است. با توجه به نتایج بدست آمده ترکیب الکتروود 6010-6010 دارای تغییر فاز از تنش فشاری به تنش کششی با مقادیر بالاتری با لحاظ استحاله فازی است. از طرفی تغییر از تنش‌های کششی به فشاری در ناحیه خارج از منطقه جوش با لحاظ استحاله فازی شدیدتر بوده و در فاصله 25 میلی‌متری از خط جوش با مقادیر 200 تا 300 مگاپاسکال اتفاق می‌افتد درحالی‌که این مقادیر در خروجی نرم‌افزار ABAQUS به جهت عدم لحاظ استحاله فازی دارای مقادیر به مراتب کمتری در حدود 50 تا 150 مگاپاسکال است. با توجه به نتایج ماکزیمم مقدار تنش محیطی در منطقه تاج جوش و ماکزیمم مقدار تنش محوری در منطقه HAZ اتفاق افتاده و ماهیت تنش‌های محیطی و محوری ایجاد شده، تغییرات

گرده تاج جوش و لزوم آماده‌سازی محل نصب کرنش‌سنج‌ها (تماس کامل کرنش‌سنج با سطح) اندازه‌گیری محل کرنش‌ها در ناحیه پای جوش و با فاصله کمی از تاج جوش انجام گرفته‌است.

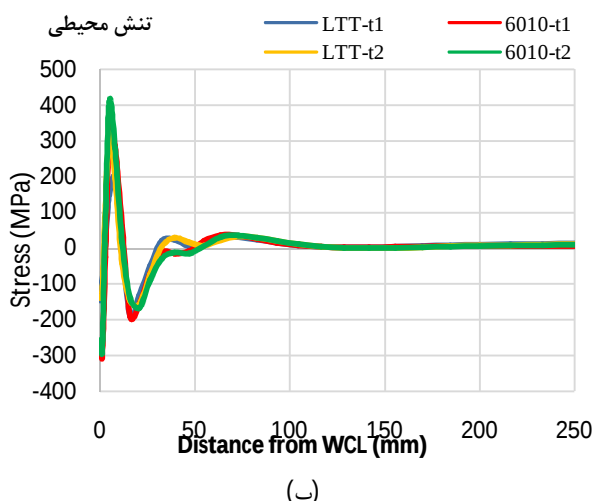
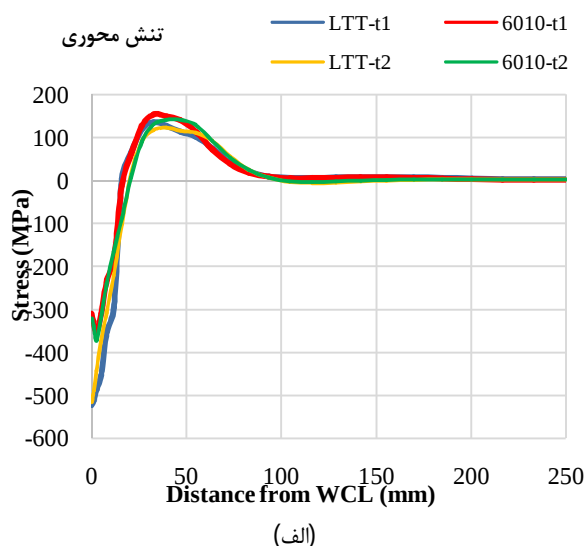


Fig. 7 a, b) Comparison of the effect of cross-sectional thickness change of samples on residual stresses created on the outer surface of samples

شکل 7 الف، ب) مقایسه تأثیر تغییر ضخامت مقطع نمونه‌ها در تنش‌های پسماند ایجاد شده در سطح خارجی نمونه‌ها

مطابق شکل 8- الف مقدار تجربی بدست آمده برای تنش پسماند برای جوش دو پاسه LTT-6010 برابر 130 MPa می‌باشد که مطابق نتایج ارائه شده در ردیف سه جدول 7 با ماکزیمم مقدار بدست آمده برای تنش پسماند کششی در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی برابر است و این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی برابر 105 MPa

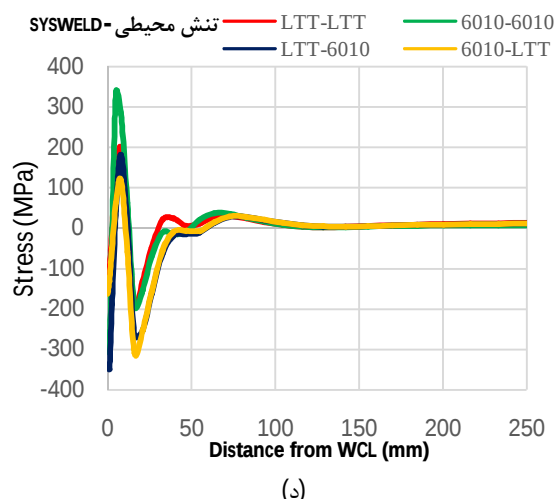


Fig. 6 a, b) Comparison of axial stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD in two-pass welding, c, d) Environmental stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD in two-pass welding

شکل 6 الف، ب) مقایسه تنش‌های محوری خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD در جوش دو پاسه، ج، د) تنش‌های محیطی خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD در جوش دو پاسه

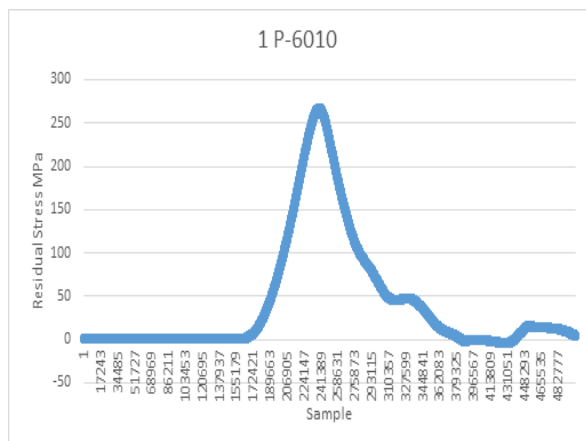
2-5- مقایسه اثر تغییر ضخامت نمونه‌ها

در این بخش به مقایسه نتایج تأثیر تغییر ضخامت مقطع نمونه‌ها از 4/8 میلی‌متر به 6/5 میلی‌متر در تنش‌های پسماند ایجاد شده با لحاظ بحث استحاله فازی به کمک نرم‌افزار SYSWELD پرداخته شده است. مطابق شکل‌های 7- الف و ب تغییرات مشهودی در تنش‌های پسماند ایجاد شده در ضخامت‌های بررسی شده؛ مشاهده نمی‌گردد.

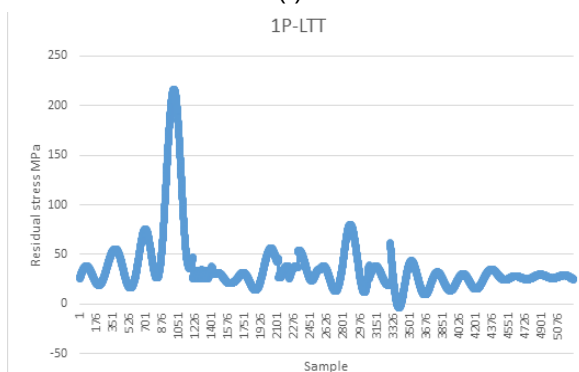
6- نتایج آزمون تجربی

در این بخش نتایج آزمون تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند به کمک روش سوراخکاری مرکزی با توجه به اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده و تبدیل آنها به تنش پسماند، ارائه می‌گردد (شکل 8). در ادامه در جدول 7 کرنش‌های اندازه‌گیری شده در محل بین تاج جوش و منطقه HAZ ارائه گردیده و با نتایج تحلیل عددی مقایسه گردیده‌اند. با در نظر گرفتن ماهیت اندازه‌گیری انجام شده (تنش صفحه‌ای) و به جهت عدم امکان اندازه‌گیری تنش‌ها در راستای ضخامت (مقطع جوشکاری) مقادیر ماکزیمم تنش آزاد شده در محل اشاره شده، مدنظر بوده است. با توجه به خروجی تحلیل‌های عددی با فاصله گرفتن جزیی از مرکز جوش (تاج جوش) ماهیت تنش‌های پسماند تغییرات چشمگیری دارند. لذا با در نظر گرفتن سطح غیر هموار

بوده که اختلاف 19% با مقدار تجربی نشان داده شده در شکل 8- الف دارد.



(د)

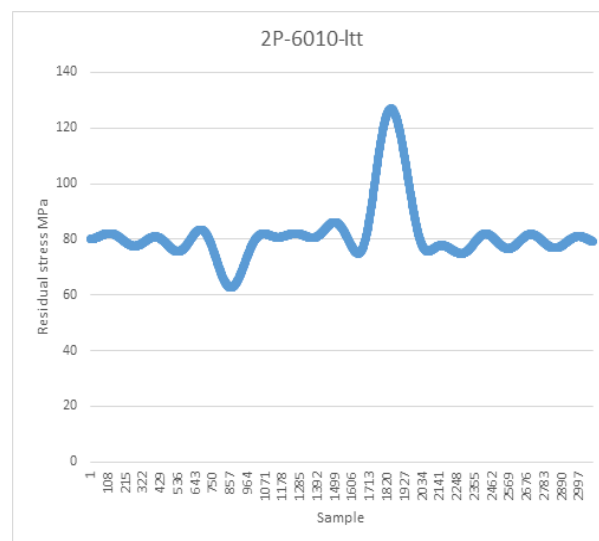


(ه)

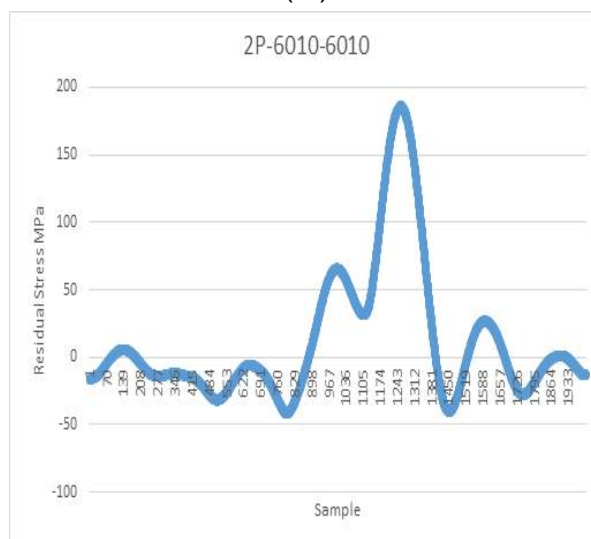
Fig. 8 a) LTT-6010 double pass welding b) 6010-6010 double pass welding c) LTT-LTT double pass welding d) 6010 single pass welding e) LTT single pass welding

External surface samples

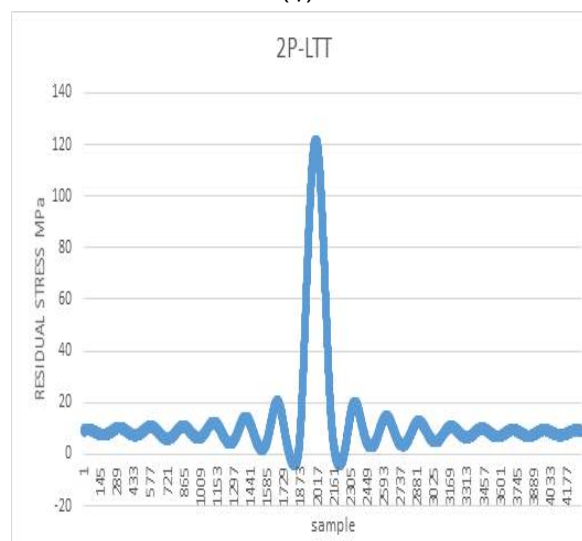
شکل 8 الف) جوش دو پاس 6010-LTT ب) جوش دو پاس 6010-6010
ج) جوش دو پاس LTT-LTT د) جوش تک پاس 6010 ه) تک پاس LTT
در سطح خارجی نمونه‌ها



(الف)



(ب)



(ج)

در ادامه در شکل 8- ب ماکزیمم مقدار تجربی تنش پسماند برای ترکیب جوش دو پاسه 6010-6010 برابر 180MPa بوده که مطابق نتایج ارائه شده در ردیف دو جدول 7 با ماکزیمم مقدار بدست آمده برای تنش پسماند کششی در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی این تنش 155MPa بوده و 14% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد و این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست‌آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی برابر 56MPa بوده که اختلاف معناداری با مقدار تجربی نشان داده شده در شکل 8- ب دارد. در شکل 8- ج ماکزیمم مقدار تجربی تنش پسماند برای ترکیب جوش دو پاسه LTT-LTT برابر 125MPa اندازه گیری گردید. این تنش در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی مطابق ردیف پنج جدول 7 برابر 146MPa بوده و 17% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد و

این امر به جهت تنش پسماند فشاری در سطح خارجی نمونه‌ها با افزایش تنش فشاری نمایان شده‌است. همچنین با توجه به مقایسه تنش‌های پسماند در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی برای جوش دو پاسه، 6010-LTT نتایج مطلوب‌تری را برای تنش‌های پسماند ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج، ماکزیمم مقدار تنش‌های محیطی در منطقه تاج جوش و ماکزیمم مقدار تنش‌های محوری در منطقه HAZ اتفاق افتاده‌است. در خصوص تأثیر تغییر ضخامت در مقطع نمونه‌ها خروجی نتایج هر دو نرم‌افزار تحلیل عددی تغییرات محسوسی را نشان نمی‌دهند. نتایج آزمون‌های تجربی با نتایج حل عددی نرم‌افزار SYSWELD هم‌خوانی مناسبی دارد و صحت شبیه‌سازی را تأیید می‌نماید.

8- تقدیر و تشکر

ویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت ملی گاز استان آذربایجان غربی به واسطه هماهنگی در تهیه نمونه‌ها و حمایت مالی از این تحقیق ابراز دارند. از کلیه پرسنل آزمایشگاه تحقیقاتی رفتار دینامیکی مواد و کارگاه عمومی دانشگاه صنعتی سهند تبریز به جهت در اختیار قرار دادن ابزار و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمون تجربی تقدیر و تشکر می‌گردد.

9- مراجع

- [1] V. Karineia, "Investigation of magnitude and distribution of residual stresses in ambient welding of a high-strength aluminum pressure vessel and extraction of relationships based on geometric parameters" PhD thesis, Amir kabir university 1393, (in Persian)
- [2] F. Martinez, Caterpillar Inc., Peoria, IL; S. Liu, Colorado School of Mines, Golden, CO, "Development of Compressive Residual Stress in Structural Steel Weld Toes by Means of Weld Metal Phase Transformations", Proceedings of the 7th International Conference, 2005.
- [3] S. Neubert, A. Pittner, M. Rethmeier, "Influence of non-uniform martensitic transformation on residual stresses and distortion of GMA-welding", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 128, pp. 192-200, 2017.
- [4] M. Fu, I. Lourenço, M. Duan, S. F. Estefen, "Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures", Marine Structures, Vol. 46, pp. 30-55, 2016.
- [5] T. Cheng and L. Teng, "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds," International

این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی برابر 185 MPa بوده که اختلاف معناداری با مقدار تجربی نشان داده شده در شکل 8-ج دارد. در شکل 8-د ماکزیمم مقدار تجربی تنش پسماند برای جوش تک پاسه 6010 برابر 270 MPa اندازه‌گیری گردید. این تنش در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی مطابق ردیف یک جدول 7 برابر 235 MPa بوده و 15% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد و این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی برابر 130 MPa بوده که اختلاف چشمگیری با مقدار تجربی نشان داده شده در شکل 8-د دارد. در نهایت در شکل 8-ه ماکزیمم مقدار تجربی تنش پسماند برای جوش تک پاسه LTT برابر 225 MPa اندازه‌گیری گردید. این تنش در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی مطابق ردیف چهار جدول 7 برابر 200 MPa بوده و 12% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد و این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی برابر 150 MPa بوده و 25% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد.

جدول 7 خروجی نتایج آزمون‌های تجربی و تحلیل عددی

Table 7 Outputs of experimental test results and numerical analysis

ردیف	الکتروود- تعداد پاس	تنش پسماند اندازه‌گیری شده (MPa)	پسماند خروجی تحلیل عددی ABAQUS (MPa)	رنج مقادیر تنش خروجی تحلیل عددی SYSWELD (استحاله فازی) (MPa)
1	6010	270	130 تا 430	235 تا 150
2	6010-6010	180	56 تا 403	155 تا 354
3	6010-LTT	130	105 تا 450	130 تا 300
4	LTT	225	150 تا 510	200 تا 150
5	LTT-LTT	125	185 تا 330	146 تا 200

7- نتیجه‌گیری

در خصوص بکارگیری الکتروود LTT با توجه به نتایج عددی و تجربی بدست آمده؛ استفاده از این الکتروود سبب کاهش تنش‌های پسماند کششی در نمونه‌ها می‌گردد. بطوری‌که مقدار تنش پسماند کششی در حالت جوش تک پاس 6010 برابر 270 MPa بوده و در حالت تک پاس LTT به مقدار 225 MPa کاهش می‌یابد. به همین ترتیب با تغییر در جوش دو پاسه 6010-6010 به LTT-LTT تنش پسماند کششی از 180 MPa به 120 MPa با بکارگیری فیلر LTT کاهش یافته‌است. از طرفی

- Mechanics, Vol. 2, pp. 23-24, 2004. (in Persian)
- [10] [SYSWELD Toolbox, 2013.
- [11] T. Chang, P. Teng, "Three-dimensional thermo-mechanical analysis of circumferentially welded thin-walled pipes," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 237-247, 1998.
- [12] J.A. Akhlaghi, M., Goldak, "Computational Welding Mechanics," Springer, 2005.
- [13] I.F.Z. Fanous, Y. Maher, A. Younan, S., Abdalla., "3D Finite Element Modeling of the Welding Process using Element Birth and element Movement Techniques," Journal of pressure vessel technology, Vol. 125, pp. 144-150, 2003.
- [14] V. Pavelic, et al., "Experimental and Computed Temperature Histories in Gas Tungsten-Arc Welding of Thin Plates," Welding Journal, Research Supplement, Vol.48, pp. 295-305. 1969.
- Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 75, pp. 857-864, 1998.
- [6] R.H. Leggat, "Residual Stress in Welded Structures," International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 85, pp. 144-155, 2008.
- [7] M. Qureshi, E.M. Ullah dar, N. Khan and I. Malik, "Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields," Thin-Walled Structures, pp. 1391-1401, 2008
- [8] X. Ren, S.K. As and O. Akselsen, "Residual Stresses of X80 Pipe Girth Weld," International Offshore and Polar Engineering Conference 2012.
- [9] M. Mashaiekh, H. Hedaiaati, "Investigation of the effect of welding sequence and hydrotest process on welding residual stresses in 304 stainless steel pipes", Journal of Applied and Computational Sciences in