



## مقایسه تجربی و عددی اثرات تغییرات فازی و جوشکاری ناهمراستا در تنش‌های پسماند در جوشکاری لوله‌های گازی با استفاده از فیلر LTT

علیرضا جمی<sup>1</sup>، محمد رضا خوشروان آذر<sup>2</sup>، مجتبی یزدانی<sup>3\*</sup>

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، صندوق پستی 1996-51335، دانشکده مکانیک، m.yazdani@sut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 اردیبهشت 1400

داوری اولیه: 22 خرداد 1400

پذیرش: 25 خرداد 1400

### کلیدواژگان:

جوشکاری نفوذی

المان محدود

تنش‌های پسماند

LTT

جوشکاری ناهمراستا

در جوشکاری قوس الکتریکی، حرارت ناشی از قوس، باعث ایجاد انبساط و انقباض غیر یکنواخت در جوش و مناطق اطراف آن می‌شود. انبساط 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 زمان بندی 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 غیر کوپل حرارتی- مکانیکی استفاده گردیده و روش تولد و مرگ المان‌ها در شبیه‌سازی مواد پرکننده مورد نظر قرار گرفته است. در شبیه‌سازی انجام شده فرآیند استحاله فازی در نظر گرفته شده و به کمک فیلر LTT معرفی شده، تنش‌های پسماند در جوش تک پاسه 15% کاهش در تنش‌های پسماند کششی را نشان می‌دهد. با بررسی تأثیر جوشکاری ناهمراستا در نمونه‌ها، میزان تنش‌های پسماند ایجاد شده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

## Experimental and Numerical Comparison of the Effects of Phase Transformation Changes and Asymmetric Welding on Residual Stresses in Gas Pipe Welding Using LTT Filler

Alireza Jami<sup>1</sup>, Mohammad Reza Khoshrovan Azar<sup>1</sup>, Mojtaba Yazdani<sup>2\*</sup>

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

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

\* P.O.B. 51335- 1996 Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 13 May 2021

First Decision: 12 June 2021

Accepted: 15 June 2021

### Keywords:

Penetration Welding

Finite Element

Residual Stresses

LTT

HI-LOW

### 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 in the tensile residual stresses. By examining the effect of misaligned welding on the specimens, the amount of residual stresses generated increases significantly.

### 1- مقدمه

آن باقی می‌مانند. تنش‌های پسماند در حالت خود تعادلی<sup>1</sup> یعنی برآیند نیروها و ممان‌های تولید شده صفر می‌باشند. تنش‌های پسماند بسته به نوع و مقدار آن‌ها می‌توانند باعث کاهش

تنش‌های پسماند به تنش‌هایی اطلاق می‌شوند که بعد از برداشتن بارهای خارجی از روی یک جسم، همچنان در داخل

<sup>1</sup> Self-equilibrating

### Please cite this article using:

A. Jami, M. R. Khoshrovan Azar, M. Yazdani, Experimental and Numerical Comparison of the Effects of Phase Transformation Changes and Asymmetric Welding on Residual Stresses in Gas Pipe Welding Using LTT Filler, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 39- 49, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نشان داده‌اند که استفاده از فیله‌های 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 فیله‌های معمولی، وجود درصد زیادی از عناصر Ni و Cr (تا 10 درصد) است. فیله‌های 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. دنگ [4]، به بررسی اعوجاج و تنش‌های پسماند در فولادهای کربنی با دو نوع فولاد با درصد کربن متفاوت و با در نظرگیری تغییرات فازی پرداخت. با توجه به نتایج این بررسی در فولادهایی با درصد کربن کمتر، تأثیر تغییرات فازی بر روی تنش‌های پسماند و اعوجاج کمتر خواهد بود ولی در فولادهای با کربن متوسط تأثیر تغییرات فازی بیشتر مشهود می‌باشد. هنسل و همکاران [5]، به مطالعه اثر سرعت خنک‌کاری و به دنبال آن تشکیل فازهای جدید و تأثیر آن بر تنش‌های پسماند پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که استحاله فازی آستینیتی به طور محسوسی بر روی تنش‌های پسماند در ناحیه نزدیک پاشنه جوش تأثیر خواهد داشت. در تحقیق آن‌ها از سه نوع فولاد S355Q، S690Q و S960Q استفاده شده است. 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 کردند. 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. همت زاده و همکاران [7]، جوشکاری لوله‌های فولادی پرآلیاژ API X42 را به کمک شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار SYSWELD بررسی کرده و از طریق اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ<sup>3</sup> اقدام به اعتبارسنجی نتایج کردند. با توجه به نتایج، اثر حرارت ورودی نسبت به اثر شعاع به ضخامت بیشتر بوده که بیانگر این واقعیت است که افزایش دما، فاکتور مهمتری در شکل‌گیری تنش‌های

استحکام خزشی و خستگی، ایجاد ترک تنش خوردگی<sup>1</sup>، 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 فوق‌العاده‌ای 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 تغییر فازی حالت جامد قرار می‌گیرند. این تغییر فاز با آزاد شدن گرمای نهان، تغییر در ابعاد و اثرات شبه پلاستیسیته (تغییر پلاستیک یا مومسان) همراه است. آزاد شدن گرمای نهان در هنگام تغییر فاز حالت جامد، 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 شد، 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 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 پایین<sup>2</sup>، که امروزه به الکترودهای LTT معروف می‌باشند؛ از این قابلیت برخوردارند؛ که تنش‌های پسماند فشاری در منطقه جوش به منظور کاهش تنش‌های پسماند ایجاد نمایند. تحقیقات قبلی

<sup>1</sup> Stress Corrosion Crack (SCC)

<sup>2</sup> Low Transformation Temperature

<sup>3</sup> Hole Drilling

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 فرآیند 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 فرآیند 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 معادله (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]:

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

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

با جاگذاری معادلات (2) و (3) در معادله (1)، معادله نهایی به صورت زیر بیان می‌شود:

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

$\rho$  چگالی،  $\frac{Du}{Dt}$  گرمای ویژه  $(C_p)$ ،  $q_s$  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 (4) به شکل زیر بیان می‌شود:

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

پسماند محوری بوده و بر روی گردپایان‌های حرارتی موثرتر است. همچنین بیشترین تنش‌های پسماند در حالتی رخ داده که حرارت ورودی ماکزیمم و نسبت شعاع به ضخامت مینیمم است که ناشی از افزایش بیش از اندازه دما و همچنین اثرات دمای بین‌پاسی است. 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 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. حمصی و همکاران [9]، به بررسی تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری اتصال لوله ای فولاد S355 و اعتبارسنجی به وسیله مقایسه با نتایج آزمایش تجربی که در آن تنش‌های پسماند از طریق روش اشعه ایکس به دست آمد، پرداختند. به منظور شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری از نرم‌افزار SYSWELD استفاده کرده و به منظور لحاظ کردن اثرات تغییرات فازی بر روی نتایج، از آنالیز کوپل حرارتی- مکانیکی- متالورژیکی استفاده کردند. طبق نتایج آنها ماکزیمم مقدار تنش‌های پسماند در منطقه HAZ اتفاق افتاده و استحاله فازی نقش موثری در تنش‌های ایجاد شده دارد.

در پژوهش حاضر یک اتصال سر به سر به وسیله جوشکاری نفوذی از طریق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا با توجه به نتایج حاصل از آزمایش تجربی، مدل المان محدود مشابهی توسعه داده شده و اعتبارسنجی گردیده است. در ادامه توزیع تنش‌های پسماند بررسی شده و اثرات تغییرات فازی و جوشکاری ناهمراستا در تنش‌های پسماند در جوشکاری با فیلر LTT لوله‌های فولادی مورد استفاده در صنعت گاز، بررسی گردیده است.

## 2- مواد و روش

### 1-1- تحلیل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی که از تحلیل حرارتی به

که  $h_{convection}$  ضریب جابجایی،  $\varepsilon_{em}$  ضریب تشعشع و  $\sigma_{bol}$  ثابت بولتزمن است.

مقدار ضریب انتقال حرارت کلی ناشی از اتلاف حرارتی در فرآیند 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.

$$Q = \frac{\eta UI}{V} \quad (12)$$

که در این رابطه،  $U$  ولتاژ قوس،  $I$  شدت جریان،  $V$  سرعت جوشکاری و  $\eta$  بازده قوس الکتریکی است. متعدد بودن عوامل موثر بر بازده قوس و پیچیدگی تأثیر 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 تعیین دقیق میزان انرژی حرارتی وارد بر اتصال را مشکل می‌سازد. با توجه به جدول 1 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 الکتروود 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 الکتروود دستی<sup>2</sup> با قوس الکتریکی و الکترودهای پوشش‌دار بوده و در فرآیند جوشکاری، نمونه‌ها چرخانده شده است.

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 معادله (7) ارایه 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،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $\varepsilon$  ضریب انتشار سطح،  $\alpha$  ضریب جذب سطح و  $q_r$  انتقال حرارت تشعشعی بر واحد حجم می‌باشد.

## 2-4- اتلاف حرارتی

در فرآیند 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 بریکستاد<sup>1</sup> ارائه شده است:

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

نتایج ارائه شده توسط گلدگ و همکاران [12] نشان داد که 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 صرف‌نظرکردن از تشعشع، اختلاف دمایی، کمتر از 3 درصد می‌باشد، لذا می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. در مدل دیگری که توسط ماهر و همکاران [13]، ارائه گردیده - است، در شرایط مرزی در قالب اتلاف حرارتی، فرض بر این است که شرایط تشعشع و جابجایی به محیط از تمام اطراف صفحه جوشکاری به جز صفحه تقارن و ناحیه بالای حرارتی، اعمال می‌شود. برای این نواحی، مقدار حرارت اتلافی از رابطه (9) محاسبه می‌شود:

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

<sup>2</sup> SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

<sup>1</sup> Brickstad

**7-2- جنس لوله**

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

جدول 3 خصوصیات مکانیکی مواد لوله‌های مورد آزمایش

Table 3 Mechanical properties of test pipe materials

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

جدول 4 ترکیب شیمیایی مواد لوله‌های مورد آزمایش

Table 4 chemical composition of test pipe materials

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

**8-2- نوع جوشکاری**

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

**9-2- مشخصات الکترودهای جوشکاری**

الکتروده AWS A5.1 E6010 در صنعت به عنوان الکتروده E6010 شناخته می‌شود؛ و جزء 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

Table 5 Chemical composition of LTT welding metal

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

**3- شبیه سازی انجام شده در نرم‌افزارهای ABAQUS و SYSWELD**

شبیه سازی فرآیندهای جوشکاری به صورت غیر کوپل حرارتی - مکانیکی بوده و نتیجه تحلیل حرارتی به عنوان ورودی‌ها در تحلیل مکانیکی استفاده شده است. روش تولد و مرگ المان<sup>1</sup> در

<sup>1</sup> Birth and death method

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 DC3D8 با یک درجه آزادی دما برای تحلیل‌های حرارتی و المان‌های هشت گرهی C3D8 با سه درجه آزادی جابجایی برای تحلیل‌های مکانیکی استفاده شده است. در شکل‌های 1- الف و ب شرایط مرزی اعمال شده و در شکل 2- الف مسیر انتخابی برای استخراج داده‌ها و در شکل 2- ب کانتورهای تنش در سطح داخلی و خارجی نمونه نشان داده شده‌است.

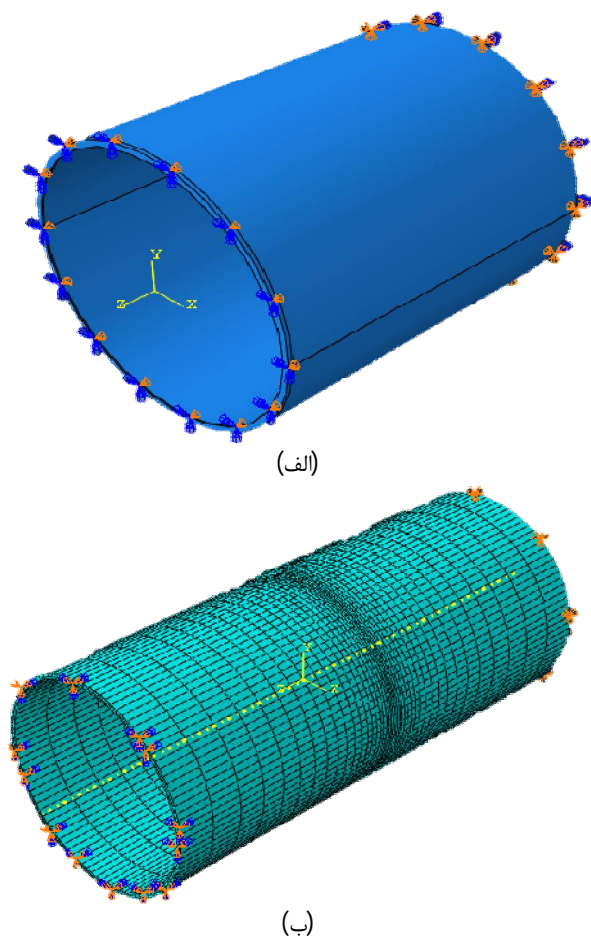


Fig. 1 a) Mechanical-thermal boundary conditions of symmetry, b) Mechanical boundary conditions

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

**3-1- شبیه سازی تغییرات فازی در نرم‌افزار سیسولد**

در نرم‌افزار آباکوس با در نظر گرفتن آنتالپی بصورت وابسته به دما می‌توان با دقت مناسبی تغییرات خواص مکانیکی و حرارتی را مدل‌سازی نمود ولی این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی تغییرات حجم ناشی از تغییرات فازی نمی‌باشد.

حسب زمان تعیین نمود. دو مدل در نرم‌افزار سیسولد برای تعریف خصوصیات متالورژیکی ماده وجود دارد که هر دو بر اساس قانون Johnson-Mehl-Avrami عمل می‌کنند.

#### 4- آزمون‌های تجربی

##### 1-4- روش اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، از روش سوراخ‌کاری مرکزی و اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده؛ استفاده گردیده است.

##### 2-4- 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 گازرسانی، در محل پروژه، در حالت‌های زیر مطابق با مشخصات ارائه‌شده در جدول 6 جوشکاری گردیده‌اند.

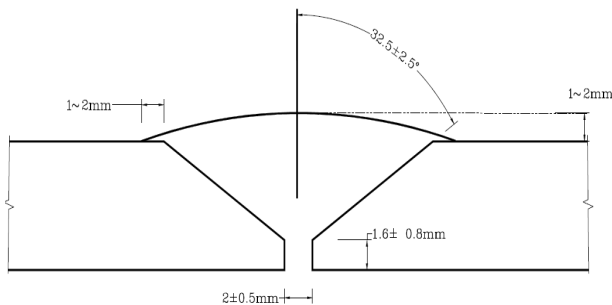


Fig. 3 Welding geometry

شکل 3 هندسه محل جوشکاری

جدول 6 پارامترهای جوشکاری نمونه‌های مورد آزمایش

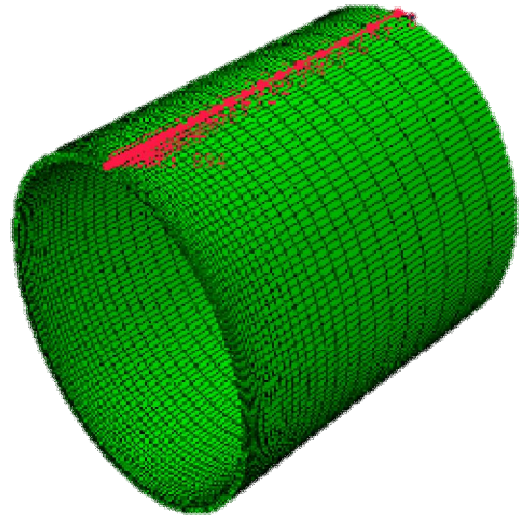
Table 6 Welding parameters of the tested samples

Bead Number	Welding Process	Current Amp Range(A)	Voltage Range (V)	Travel Speed Range (cm/min)
1(Root)	SMAW	100-70	28-24	21-16

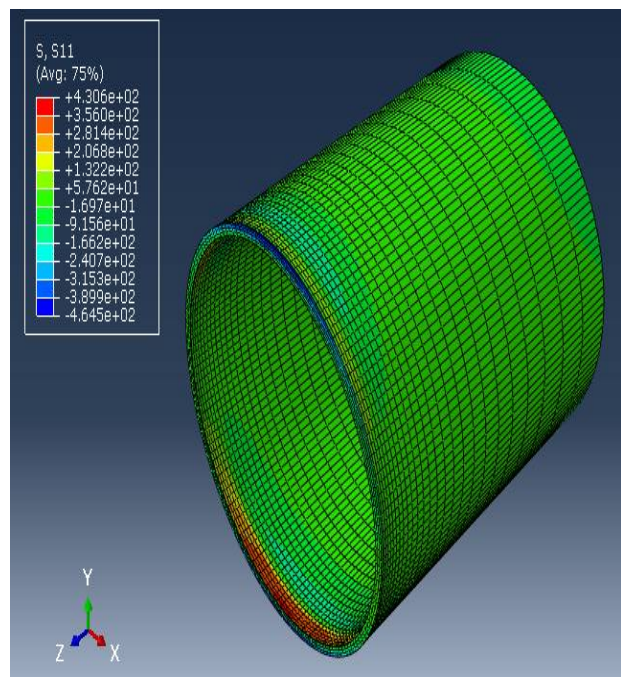
- جوشکاری تک پاس با الکتروود E6010

- جوشکاری تک پاس با الکتروود AMA 1461

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



(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

یکی از ویژگی‌های مهم نرم‌افزار سیسولد، مدل‌سازی تغییرات فازی همراه با تغییرات خواص مکانیکی و حرارتی و تغییرات حجم ناشی از تغییر فاز می‌باشد. در تعریف نرم‌افزار سیسولد از قانون Johnson-Avrami جهت محاسبه‌ی تحولات سینماتیکی تغییر فاز استفاده می‌شود. این روش به منحنی‌های CCT و IT وابسته می‌باشد و نسبت فازهای مختلف و تغییرات فازی را بر حسب زمان و دما محاسبه می‌کند. بدین صورت که برای یک دمای ثابت می‌توان با معادلات مربوطه، مقدار فاز را بر



## 5- نتایج تحلیل عددی

### 5-1- بررسی اثر لحاظ استحاله فازی

- جوش یک پاسه-E6010

در شکل‌های 5- الف و ب، نتایج حاصل از حل عددی توسط دو نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و SYSWELD برای تنش‌های محوری و محیطی در سطح خارجی نمونه‌ها و در شکل‌های 5- ج و د در سطح داخلی نمونه‌ها ارائه شده‌اند. با توجه به نمودار 5- الف ماکزیمم مقادیر تنش محیطی کششی با لحاظ استحاله فازی از 120MPa به 210MPa در سطح خارجی نمونه‌ها افزایش یافته‌است. بنابراین با لحاظ استحاله فازی ضمن افزایش چشمگیر ماکزیمم مقدار تنش کششی محل تنش نیز به سمت منطقه HAZ پیش روی می‌کند. با توجه به نمودار 5- ب مشاهده می‌شود که تأثیر استحاله فازی در تنش‌های محوری در سطح خارجی نمونه‌ها قابل توجه نبوده است و نتایج ارائه شده توسط هر دو نرم‌افزار تطابق نسبی با هم دارند. با توجه به نمودار 5- ج ماکزیمم مقادیر تنش محیطی کششی در سطح داخلی با لحاظ استحاله فازی از محل تاج جوش به منطقه HAZ منتقل گردیده است. در نمودار 5- د مشاهده می‌شود که ماکزیمم مقادیر تنش محوری کششی با لحاظ استحاله فازی از 50MPa به 250MPa در سطح داخلی نمونه‌ها افزایش یافته‌است. ماکزیمم مقدار تنش کششی منطقه HAZ و ماکزیمم مقدار تنش فشاری در منطقه تاج جوش در قالب تنش فشاری اتفاق افتاده است.

- جوش یک پاسه-LTT

در شکل‌های 6- الف و ب نتایج حاصل از حل عددی توسط دو نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و SYSWELD برای تنش‌های محوری و محیطی در سطح خارجی نمونه‌ها و در شکل‌های 6- ج و د در سطح داخلی نمونه‌ها ارائه شده‌اند. با توجه به نمودار 5- الف، ماکزیمم مقادیر تنش محیطی کششی با لحاظ استحاله فازی از 120MPa به 210MPa در سطح خارجی نمونه‌ها افزایش یافته‌است. در مقایسه با فیلر 6010 استفاده از فیلر LTT باعث بروز تنش‌های کششی ماکزیمم در منطقه HAZ گردیده است. در نمودار 5- ب مشاهده می‌شود که تأثیر استحاله فازی در تنش‌های محوری در سطح خارجی نمونه‌ها با افزایش تنش کششی ماکزیمم از 80MPa به 120MPa رسیده است. نمودار 5- ج نشان می‌دهد که ماکزیمم مقادیر تنش محیطی کششی در سطح داخلی با لحاظ استحاله فازی از محل تاج جوش به منطقه HAZ منتقل گردیده است. ماکزیمم مقدار تنش کششی منطقه HAZ و ماکزیمم مقدار تنش فشاری در منطقه تاج جوش در قالب تنش فشاری در سطح خارجی نمونه‌ها اتفاق افتاده و در سطح داخلی برعکس است.

شده نصب گردیدند. بعد از اتصال به دستگاه ثبت داده<sup>1</sup> پر سرعت با نرخ داده برداری 1 میلیون دیتا در ثانیه، نسبت به سوراخ کاری و اندازه‌گیری کرنش‌ها اقدام شد. شکل 4- الف محل و نحوه اتصال کرنش‌سنج بر روی یک نمونه آزمایش را نشان می‌دهد و در شکل 4- ب همان نمونه بعد از سوراخ کاری مرکزی نشان داده شده است.



(الف)

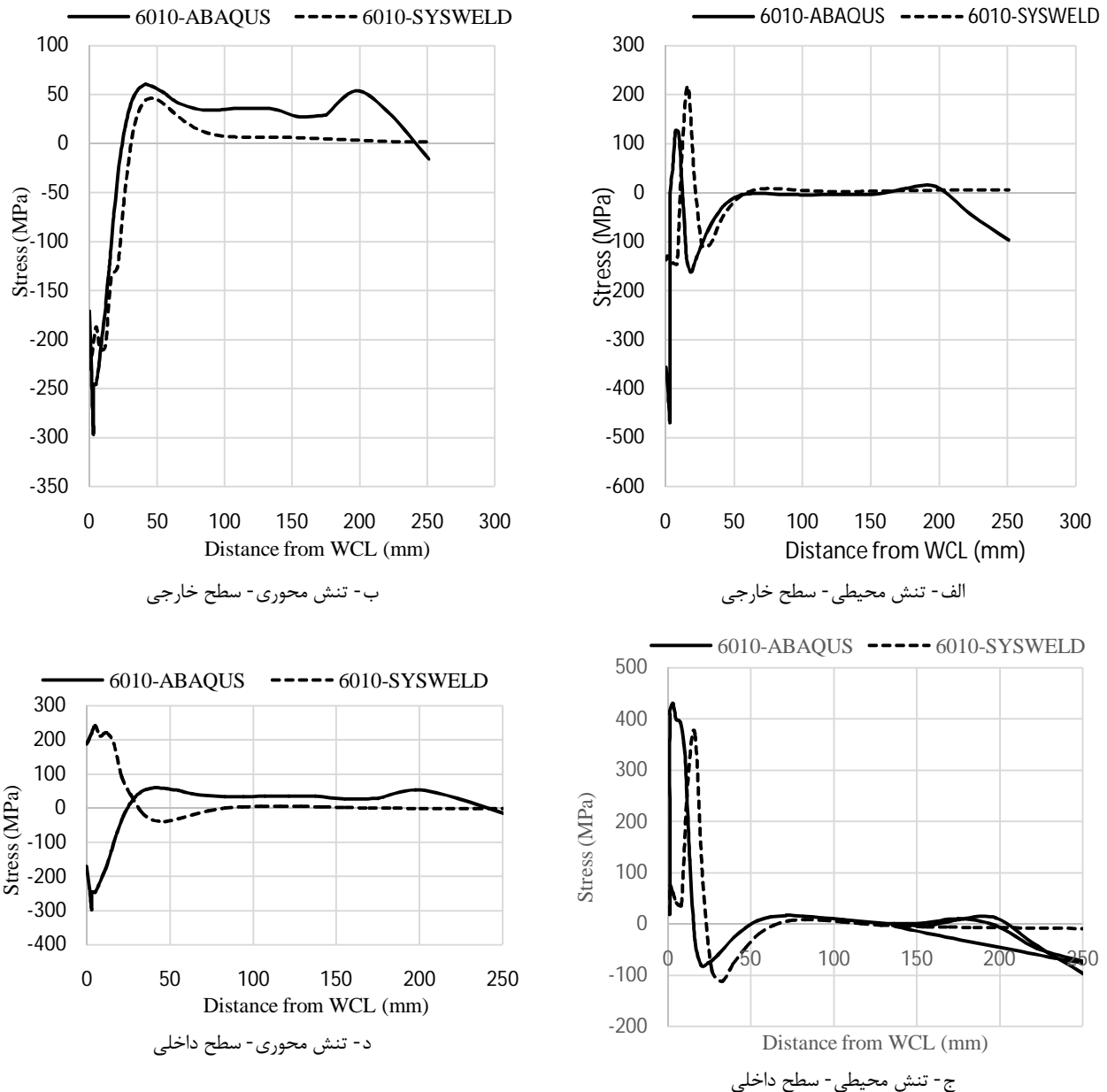


(ب)

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

<sup>1</sup> Data Logger



**Fig. 5** a, b) Comparison of environmental and axial stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD External surface of samples , c, d) Comparison of environmental and axial stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD internal surface of samples. E6010 filer

شکل 5 الف، ب) مقایسه تنش‌های محیطی و محوری خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD سطح خارجی نمونه‌ها ج- د) مقایسه تنش‌های محیطی و محوری خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD، سطح داخلی نمونه‌ها با الکتروود E6010

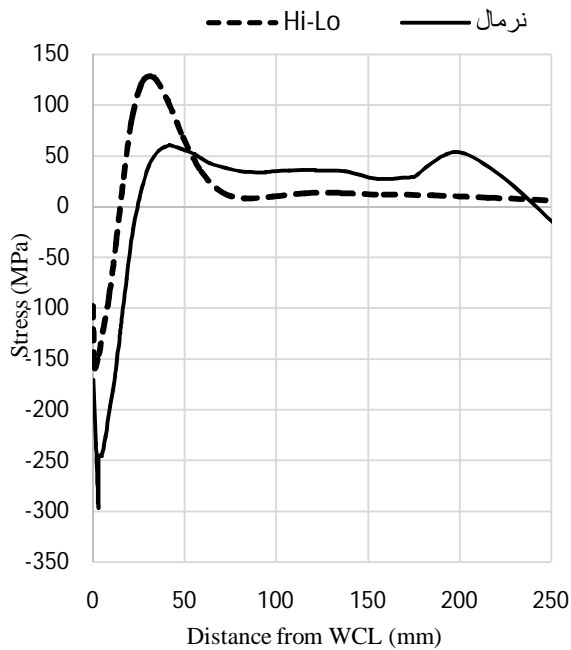
## 6- نتایج آزمون تجربی

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.

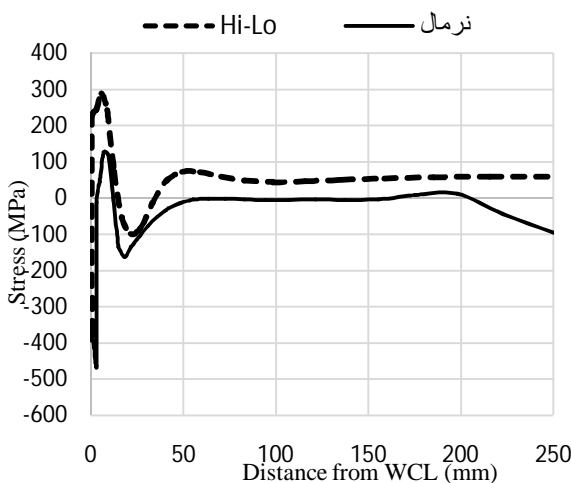
## 5-2- جوشکاری ناهمراستا (HI-LO)

در این بخش به مقایسه نتایج تأثیر عدم هم راستایی در مونتاژ و جوشکاری نمونه‌ها در تنش‌های پسماند ایجاد شده پرداخته می‌شود. مطابق شکل 7- الف در حالت تنش محوری مقدار تنش ماکزیمم تنش کششی از 60MPa به 130MPa افزایش می‌یابد. در شکل 7- ب این تغییرات در تنش محیطی شدیدتر بوده و از 120MPa به 300MPa افزایش یافته‌است.





(الف)

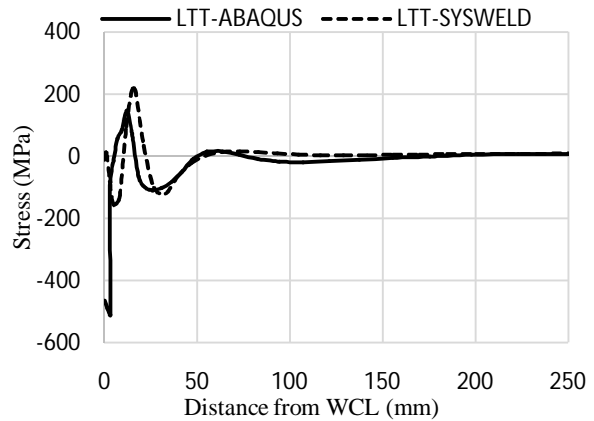


(ب)

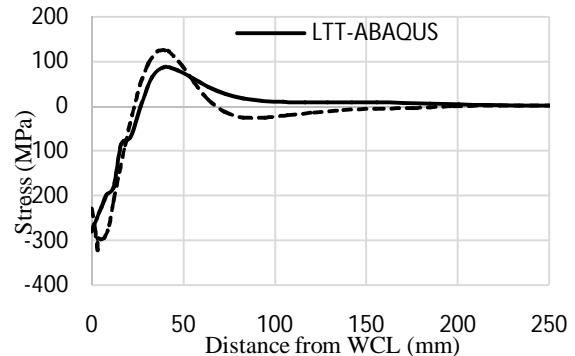
**Fig.7 a**, Comparison of the effect of misalignment on welding of samples on axial residual stresses on the outer surface of samples, b) Comparison of the effect of misalignment on welding of samples on environmental residual stresses on the outer surface of samples

شکل 7 الف، مقایسه تأثیر عدم هم راستایی در جوشکاری نمونه‌ها در تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی نمونه‌ها ب- مقایسه تأثیر عدم هم راستایی در جوشکاری نمونه‌ها در تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی نمونه‌ها

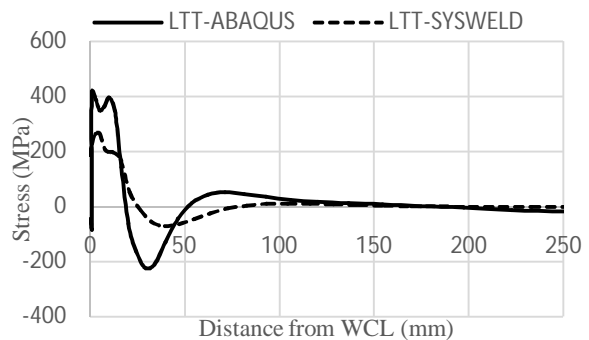
با در نظر گرفتن ماهیت اندازه‌گیری انجام شده (تنش صفحه‌ای) و به جهت عدم امکان اندازه‌گیری تنش‌ها در راستای ضخامت (مقطع جوشکاری) مقادیر ماکزیمم تنش آزاد شده در محل اشاره شده، مدنظر بوده است. با توجه به خروجی تحلیل‌های عددی با فاصله گرفتن جزئی از مرکز جوش (تاج جوش) ماهیت تنش‌های پسماند تغییرات چشمگیری دارند. لذا



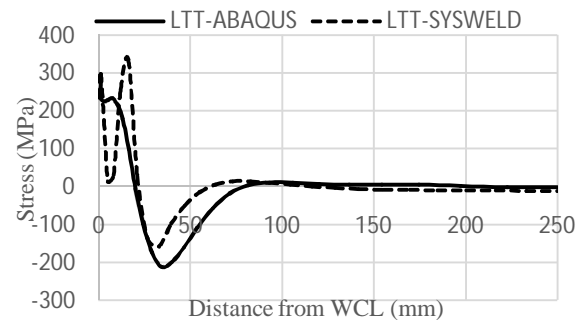
الف- تنش محیطی- سطح خارجی



ب- تنش محوری- سطح خارجی



ج- تنش محیطی- سطح داخلی



د- تنش محوری- سطح داخلی

**Fig.6 A, B** Comparison of environmental and axial stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD External surface of samples , c, d) Comparison of environmental and axial stresses of two software outputs in terms of phase transformation in SYSWELD internal surface of samples. LTT filer

شکل 6- الف، ب مقایسه تنش‌های محیطی و محوری خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD سطح خارجی نمونه‌ها ج، د) مقایسه تنش‌های محیطی و محوری خروجی دو نرم‌افزار با لحاظ استحاله فازی در SYSWELD سطح داخلی نمونه‌ها با الکتروود LTT

لحاظ استحاله فازی برابر 130MPa بوده که اختلاف چشمگیری با مقدار تجربی نشان داده شده در شکل 8- الف، دارد. در شکل 8- ب ماکزیمم مقدار تجربی تنش پسماند برای جوش تک پاس LTT برابر 225MPa اندازه‌گیری گردید. این تنش در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی مطابق ردیف دو جدول 6 برابر 200MPa بوده و 12% اختلاف با مقدار تجربی دارد و این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست‌آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون لحاظ استحاله فازی برابر 150MPa بوده و 25% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد.

جدول 7 خروجی نتایج آزمون‌های تجربی و تحلیل عددی

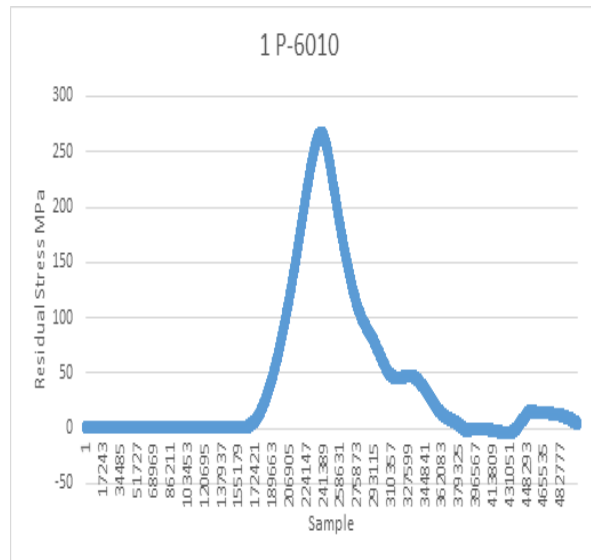
Table 7 Outputs of experimental test results and numerical analysis

ردیف الکتروود	ماکزیمم تنش پسماند اندازه‌گیری شده (MPa)	رنج مقادیر تنش پسماند تجربی تحلیل عددی ABAQUS (MPa)	رنج مقادیر تنش پسماند تجربی تحلیل عددی SYSWELD (استحاله فازی) (MPa)
1	E6010	270	130 تا 430
2	LTT	225	150 تا 510

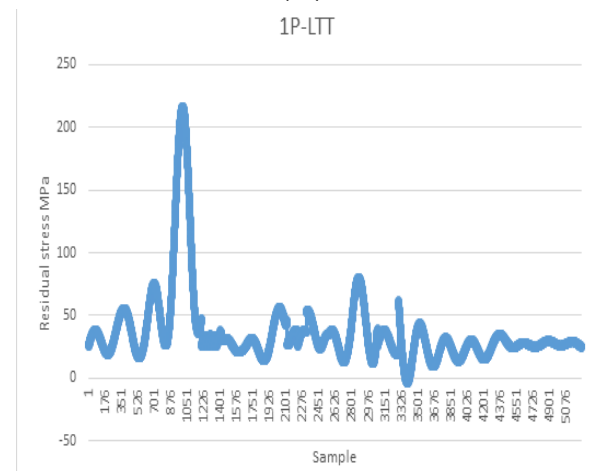
## 7- نتیجه‌گیری

در خصوص بکارگیری الکتروود LTT با توجه به نتایج عددی و تجربی بدست آمده؛ استفاده از این الکتروود به جهت افزایش سرعت جوشکاری و کاهش انرژی جوش وارد شده به قطعه کار، 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 225MPa کاهش می‌یابد. از طرفی این امر به جهت تنش پسماند فشاری در سطح خارجی نمونه‌ها با افزایش تنش فشاری نمایان شده است. با توجه به نتایج، ماکزیمم مقدار تنش‌های محیطی در منطقه تاج جوش و ماکزیمم مقدار تنش‌های محوری و ماکزیمم مقادیر تنش‌های کششی در منطقه HAZ رخ داده است. با توجه به بروز عیوبی مثل بریدگی جوش<sup>1</sup> در منطقه پای‌جوش و هم‌زمان ایجاد تنش ماکزیمم کششی ناشی از تنش‌های پسماند در این ناحیه، بسیار حائز اهمیت بوده و می‌بایستی توجه ویژه‌ای به موضوع گردد. به عبارت دیگر شناسایی تنش‌های پسماند به همراه پیش‌بینی محل دقیق بروز ماکزیمم مقادیر آن در کنار عیوب جوشکاری که در حین پروسه جوشکاری ایجاد می‌گردند؛ در برآورد دقیق‌تر عمر مفید قطعات

با در نظر گرفتن سطح غیر هموار گرده تاج جوش و لزوم آماده‌سازی محل نصب کرنش‌سنج‌ها (تماس کامل کرنش‌سنج با سطح) محل کرنش‌ها در ناحیه پای جوش و با فاصله کمی از تاج جوش انجام در نظر گرفته شده‌اند.



(الف)



(ب)

Fig. 8 a) E6010 single pass welding b) LTT single pass welding, External surface samples

شکل 8 الف) جوش تک پاس 6010 ب) جوش تک پاس LTT، در سطح خارجی نمونه‌ها

مطابق شکل 8- الف ماکزیمم مقدار تجربی تنش پسماند برای جوش تک پاس E6010 برابر 270MPa اندازه‌گیری گردید. این تنش در خروجی نرم‌افزار SYSWELD با لحاظ استحاله فازی مطابق ردیف یک جدول 6 برابر 235MPa بوده و 15% اختلاف با مقدار تجربی را دارا می‌باشد و این در حالیست که ماکزیمم مقدار بدست آمده از خروجی نرم‌افزار ABAQUS بدون

<sup>1</sup> Uder Cut

- [4] P.Dong and J.K.Hong, "On the residual stress profile in new API 579," ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, 2007
- [5] Jonas Hensel TThomas Nitschke-Pagel T Klaus Dilger, "On the effects of austenite phase transformation on welding residual stresses in non-load carrying longitudinal welds", Weld World (2015) 59:179-190.
- [6] R.H. Leggat, "Residual Stress in Welded Structures," International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 85, pp. 144-155, 2008.
- [7] Majid Hemmatzadeh, Hessamoddin Moshayedi, Iradj Sattari-Far, "Influence of heat input and radius to pipe thickness ratio on the residual stresses in circumferential arc welded pipes of API X46 steels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 150, pp. 62-71, 2017,
- [8] X. Ren, S.K. As and O. Akselsen, "Residual Stresses of X80 Pipe Girth Weld," International Offshore and Polar Engineering Conference 2012.
- [9] Kimiya Hemmesil, Majid Farajian, Mirko Boin, "Numerical Studies of Welding Residual Stresses in Tubular Joints and Experimental Validations by means of X-ray and Neutron Diffraction Analysis", Materials & Design, Volume 126, 15, pp. 339-350, 2017.
- [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.
- و قابلیت اطمینان مورد انتظار حائز اهمیت ویژه خواهد بود. به عنوان مثال در خصوص تأثیر مونتاژ و جوشکاری ناهمراستای نمونه‌ها، افزایش مقادیر تنش‌های پسماند بسیار چشمگیر می‌باشد. نتایج آزمون‌های تجربی با نتایج حل عددی نرم‌افزار SYSWELD همخوانی مناسبی دارد و صحت شبیه‌سازی را تایید می‌نماید.
- 8- تقدیر و تشکر**
- نویسندگان 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 می‌شود.
- 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 فارسی)
- [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.