# بررسی عددی و تجربی توزیع تنش پسماند ناشی از جوشکاری چند پاسه صفحات فولاد ضدزنگ

شهاب‌الدين اميني[i] *; مهسا سيديان چوبي[ii]; محمد حق پناهي[iii]

## چکیده

در جوشكاري چند پاسه، گستردگي تنش‌هاي پسماند و حداكثر مقدار آن با اضافه شدن هر پاس جوشكاري تغيير مي‌نمايد. فرايند شبيه‌سازي مي‌تواند براي تخمين مقادير و توزيع اين تنش‌ها مورد استفاده قرار گيرد. در اين مقاله، به بررسي ميدان‌هاي حرارتي گذرا و تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري چند پاسه لب به لب صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰٤ به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن پرداخته شده است. تحليل اين مطلب با استفاده از مدل المان محدود حرارتي - مكانيكي غيرخطي غيركوپله در حالت دو بعدي با استفاده از نرم افزار انسيس[1] ۱۰ انجام شده است. در پايان، براي بررسي درستي نتايج تحليل عددي، توزيع دما براي يك نمونه و تنش‌هاي پسماند براي دو نمونه با استفاده از روش سوراخكاري اندازه‌گيري شدند. نتايج اين تحقيق نشان مي‌دهند كه با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند كاهش يافته ولي توزيع اين تنش‌ها افزايش مي‌يابد.

**کلمات کلیدی :** ميدان حرارتي، تنش پسماند، جوشكاري چند پاسه، فولاد ضدزنگ، روش سوراخكاري

# *Numerical and Experimental Investigation of Residual Stress Distribution due to Multi-Pass Welding of Stainless Steel Plates*

Sh. Amini, M. Seyyedian Choobi and M. Haghpanahi

***ABSTRACT***

In multi-pass welding, residual stress distribution and it's maximum value change with addition of each pass. Finite element simulation can be used to estimate residual stresses. In this paper, transient thermal fields and residual stresses due to multi-pass GTA welding of 304 stainless steel plates is investigated by experimental and numerical simulation. Two-dimensional un-coupled thermo-mechanical analysis has been performed using ANSYS 10. Residual stress measurement has been performed using hole-drilling method. The results of this study reveal that maximum residual stresses decrease with the increase of number of passes due to the increase of thickness, but it increase the width of tensile and compress zones.

***KEYWORDS :*** Thermal fields, Residual stress, Multi-pass welding, Stainless steel, Hole-drilling method

تاريخ دريافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۱۰

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۸/۲۵

[i] ⋆ نويسنده مسئول و كارشناسي ارشد مكانيک; دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مكانيک: shahab_amini1363@yahoo.com.

[ii] دكتري مكانيک; دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مكانيک: mseyyedian@yahoo.com.

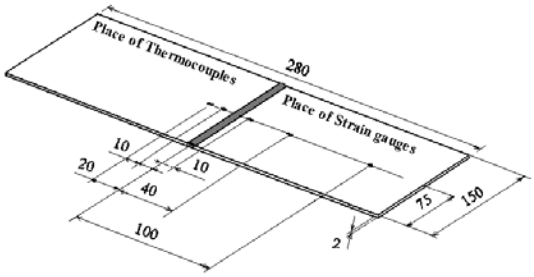
[iii] دانشيار; دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مكانيک: mhaghpanahi@yahoo.com.

## ۱- مقدمه

جوشكاري ذوبي يكي از انواع فرايندهاي قابل اطمينان در اتصال فلزات است كه بطور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار مي‌گيرد. در اين ميان، جوشكاري چند پاسه صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰٤ كاربرد بسيار گسترده‌اي در صنايع مختلف دارد. بعلت حرارت‌دهي موضعي و نرخ خنک شدن سريع، تنش‌هاي پسماند قابل توجهي در فلز جوش و پايه ايجاد مي‌شود. اين تنش‌هاي پسماند مي‌توانند مشكلات مهمي مانند كاهش عمر خستگي و يا افزايش احتمال شكست ترد را به همراه داشته باشند. عوامل زيادي روي بزرگي و توزيع اين تنش‌ها اثرگذار هستند. برخي از محققان نيز به بررسي اثر اين فرايند بر روي تنش‌هاي پسماند پرداخته‌اند. ريبيكي[۲] [۱] مقدار و توزيع تنش‌هاي پسماند در جوشكاري چند پاسه لوله‌ها را به كمک يک مدل محاسباتي تخمين زده و برابري خوبي بين نتايج اين مدل و نتايج آزمايشگاهي بدست آورده است. آرنولدفري[۳] [۲] به بررسي و تخمين تنش‌هاي پسماند با استفاده از روش المان محدود و ارائه يک مدل تئوري اصلاح شده پرداخته كه قادر به تخمين تنش‌هاي پسماند سه بعدي در نمونه‌هاي جوشكاري شده چند پاسه است. لجيل[٤] [۳] يک نمونه H شكل جوشكاري شده چند پاسه فولاد ضدزنگ را به كمک روش المان محدود بررسي نموده است. ميدان‌هاي دمايي را با استفاده از معادله روزنتال[۵] محاسبه و با نتايج آزمايشگاهي مقايسه نموده و سپس براي يک شبيه‌سازي مكانيكي دو بعدي مورد استفاده قرار داده است. تنگ[٦] و همكارش [۴] اثر عواملي مانند سرعت، حركت قوس، ابعاد نمونه، شرايط مرزي و پيش گرمايش را روي مقدار و توزيع تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري صفحات فولادي به كمک روش المان محدود روي يک مدل سه بعدي مورد بررسي قرار داده‌اند. بريكستاد[۷] و همكارش [۵] با استفاده از يک مدل دو بعدي به بررسي تغييرات تنش‌هاي پسماند شعاعي و محوري در اثر تغيير پارامترهاي جوشكاري در امتداد ضخامت لوله‌هاي فولاد ضدزنگ پرداخته‌اند. چانگ[۸] و همكارش [۶] به ارزيابي تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري چند پاسه لب به لب صفحات فولادي با استفاده از روش المان محدود پرداخته و با نتايج آزمايشگاهي به روش تفرق اشعه ايكس[۹] مقايسه نموده‌اند. دورانتن[۱۰] و همكارانش [۷] جوشكاري چند پاسه لوله‌هاي فولاد ضدزنگ را به كمک يک مدل سه بعدي شبيه‌سازي و با نتايج آزمايشگاهي مقايسه نموده و برابري خوبي بدست آورده‌اند. چو[۱۱] و همكارانش [۸] توزيع تنش‌هاي پسماند بعد از جوشكاري و بعد از عمليات حرارتي را به كمک تحليل المان محدود بررسي نموده‌اند. براي اين كار از يک مدل دو بعدي و مقايسه نتايج آن با كار آزمايشگاهي استفاده نموده‌اند. اكبری موسوي و همكارش [۹] اثر هندسه شيار روي توزيع تنش‌هاي پسماند را با استفاده از يک تحليل المان محدود سه بعدي بررسي و با نتايج آزمايشگاهي انجام شده به روش تفرق اشعه ايكس مقايسه نموده كه برابري خوبي داشته‌اند. دنگ[۱۲] [۱۰] اثر تغيير فاز و تغيير حجم ناشي از تبديل فاز آستنيت به مارتنزيت روي تنش‌هاي پسماند نهايي ناشي از جوشكاري فولادهاي كربني را به كمک يک مدل المان محدود سه بعدي مورد بررسي قرار داد. ستاري‌فر و همكارش [۱۱] با استفاده از مدل المان محدود سه بعدي علاوه بر بررسي تعداد پاس روي تنش‌هاي پسماند لوله‌هايي با ضخامت‌هاي مختلف به بررسي شكل شيار نيز پرداخته و نتايج بدست آمده را با نتايج آزمايشگاهي انجام شده به روش سوراخكاري مقايسه نموده‌اند. نتايج بدست آمده نشان دادند كه اين دو عامل مهم مي‌توانند اثر قابل توجهي روي مقدار و توزيع تنش‌هاي پسماند داشته باشند. در اين مقاله، اثر افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰٤ روي تنش‌هاي پسماند بررسي شده است. براي اين كار، تنش‌هاي پسماند در صفحاتي به ضخامت‌هاي ۲، ٦، ۸ ميلي‌متر كه به ترتيب به وسيله ۱، ۲، ۳ پاس و به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن[۱۳] جوشكاري شده‌اند، به كمک روش المان محدود تعيين شده و سپس از روش سوراخكاري[۱٤] [۱۲] براي تأييد نتايج شبيه‌سازي استفاده شد.

## ۲- كار آزمايشگاهي

دو صفحه از جنس فولاد ضدزنگ ۳۰٤ به ابعاد ۱۵۰×۱٤۰×۲ ميلي‌متر، بدون در نظر گرفتن شيار[۱۵] و بدون فاصله[۱٦] و بدون گيره‌بندي و به صورت لب به لب به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن طي يک پاس جوشكاري شدند. قبل از انجام آزمايش‌ها، همه نمونه‌ها تنش‌زدايي شدند. شكل (۱) هندسه، جزييات ابعادي، محل نصب دماسنج‌ها[۱۷] و كرنش‌سنج‌ها[۱۸] را نشان مي‌دهد. شرايط جوشكاري نيز در جدول (۱) آورده شده است.




شكل (۱): هندسه، ابعاد و محل نصب ترموكوپل‌ها و كرنش‌سنج‌هاي نمونه آزمايشگاهي

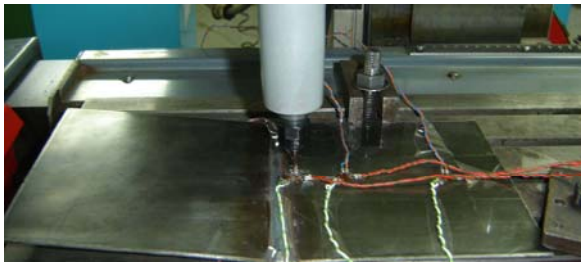
جدول (۱): شرايط جوشكاري تک پاسه صفحه ۲ ميلي‌متري

| سرعت (mm/sec) | ولتاژ (V) | جريان (A) | ضخامت (mm) |
|---|---|---|---|
| ۲/۵ | ۱۲ | ۸۰ | ۲ |

سطوح بالايي، پاييني و جانبي اين صفحات در برابر جريان هواي آرام با دماي محيط قرار داشتند. براي تحليل حرارتي و اندازه‌گيري دما، دو عدد دماسنج نوع K در دو نقطه به فواصل ۱۰ و ۲۰ ميلي‌متري از خط جوش و در سطح مقطع ميانی جوش روي سطح بالايي صفحه سمت چپ نصب شدند. شكل (۲)، دماسنج‌هاي نصب شده را نشان مي‌دهد. براي جلوگيري از گرم شدن دماسنج‌ها در اثر تشعشع ناشي از قوس جوشكاري، از يک صفحه محافظ بين دماسنج‌ها و خط جوش استفاده شد.

شكل (۲): دماسنج‌هاي نصب شده براي اندازه‌گيري دما

براي اندازه‌گيري تنش‌هاي پسماند از روش سوراخكاري استفاده گرديد [۱۲]. سه عدد كرنش‌سنج نوع A در فواصل ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ ميلي‌متري از خط جوش و در سطح مقطع ميانی جوش روي سطح بالايي صفحه سمت راست نصب شدند. براي انجام آزمايش از ابزار سوراخكاري به قطر ۲ ميلي‌متر و يک ابزار دوراني با سرعت ۳۰۰۰۰ دور در دقيقه استفاده گرديد. هم مركز كردن ابزار با مركز كرنش‌سنج‌ها نيز با چشم غيرمسلح انجام شد. شكل (۳)، صفحه نمونه مورد آزمايش را در حال انجام سوراخكاري نشان مي‌دهد. در پايان براي اطمينان از نتايج كار آزمايشگاهي، اندازه‌گيري تنش پسماند روي دو قطعه متفاوت تكرار شد.



شكل (۳): صفحه نمونه در حين انجام آزمايش سوراخكاري

## ۳- تحليل المان محدود

### ۳-۱- تحليل حرارتی

معادله حاكم براي تحليل انتقال حرارت گذرا به صورت رابطه (۱) است:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q \quad (۱)$$

از انتقال حرارت در اثر تشعشع چشم‌پوشي شده و فقط شرايط مرزي جابجايي با ضريب انتقال حرارت ۱۵ $W/m^{2}°C$ براي جريان آرام هواي محيط با دماي ۲۰ °C در نظر گرفته شده است. براي شبيه‌سازي منبع حرارتي جوشكاري از مدل توليد حرارت حجمي دو بيضي‌گون[۱۹] گلداک[۲۰] [۱۳] استفاده شده است. اين مدل به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c_f^2)} \quad (۲)$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c_r^2)} \quad (۳)$$

متغير $Q$ حرارت منتقل شده در واحد زمان بوده كه برابر است با $Q = IU\eta$. بازده[۲۱] در اين روش جوشكاري بين ۵۰ الي ۷۰ درصد پيشنهاد مي‌شود. در اين تحقيق به علت ارائه نتايج بهتر و نزديک‌تري به نتايج كار آزمايشگاهي از مقدار ۶۰ درصد براي بازده استفاده شده است. جدول شماره (۲) عوامل در نظر گرفته شده براي مدل گلداک در جوشكاري تک پاسه صفحه‌اي به ضخامت ۲ ميلي‌متر را نشان مي‌دهد. مقادير $a$ و $b$ با توجه به سطح مقطع هندسه جوش و مقدار $c$ در جلو و عقب با توجه به ابعاد واقعي حوضچه و به روش تجربي تعيين شده‌اند.

جدول (۲): مقدار عوامل مدل گلداک

| عوامل | مقدار |
|---|---|
| $a$ | ۰/۰۰۳ m |
| $b$ | ۰/۰۰۲ m |
| $c_f$ | ۰/۰۰۷ m |
| $c_r$ | ۰/۰۰۳ m |
| $f_f$ | ۱/۴ |
| $f_r$ | ۰/۶ |

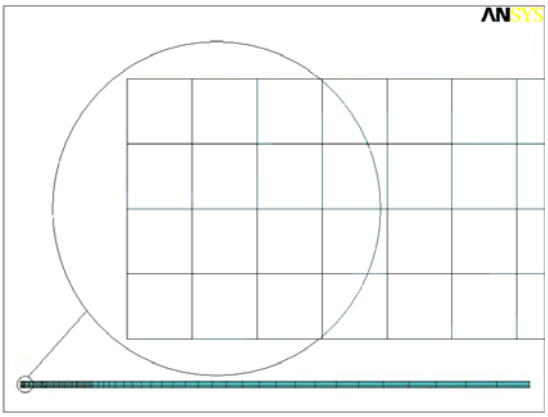
### ۳-۲- تحليل مكانيكی

نتايج تحليل حرارتي به عنوان اطلاعات ورودي تحليل مكانيكي مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعلت تقارن، فقط نيمي از

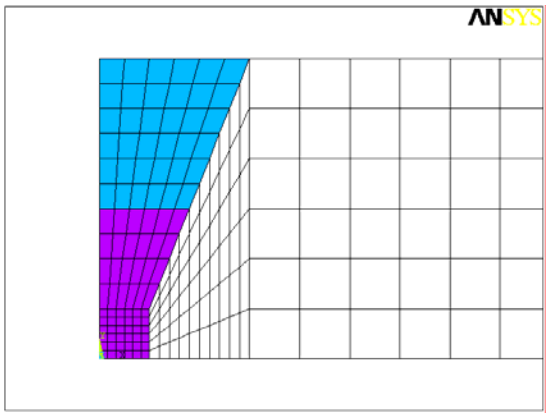
نمونه به عنوان مدل مورد مطالعه انتخاب شد و صفحه تقارن در جهت عمود بر خط جوش قيدگذاري گرديد. نرخ كرنش عبارت است از:

$$\dot{\varepsilon}_t = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^{th} \qquad (٤)$$

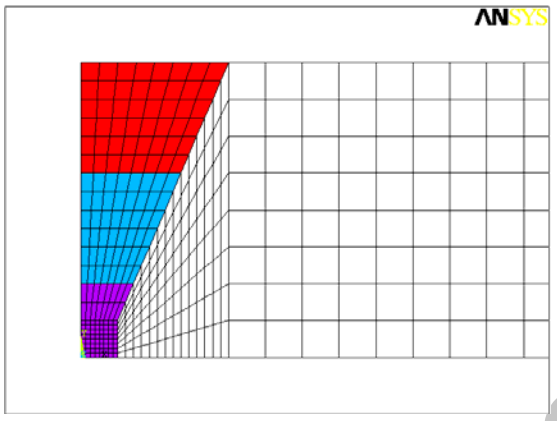
شبيه‌سازي فرايند جوشكاري قوسي انجام گرفته، شامل يک تحليل حرارتي - مكانيكي غيركوپله است. به اين ترتيب كه ابتدا يک مدل با هندسه مشخص از سطح مقطع مياني نمونه ترسيم و المان‌بندي شده، پس از آن يک تحليل حرارتي گذراي غيرخطي و سپس يک تحليل سازه‌اي غيرخطي روي اين مدل انجام گرفت. اشكال (٤) الي (٦) مدل‌هاي المان محدود صفحات با ضخامت‌هاي مختلف را نشان مي‌دهند. به علت شيب حرارتي بالا در منطقه جوش[٢٢] و منطقه متأثر از حرارت[٢٣]، از يک مش‌بندي به نسبت ريزتري تا فاصله ٢٠ ميلي‌متر از خط جوش استفاده شده و پس از آن المان‌ها با نسبت خاصي بزرگ‌تر شده‌اند. در مدل‌سازي جوشكاري چند پاسه، صفحاتي با ابعاد مشخص شده در شكل شماره (١) ولي با يک شيار V شكل با زاويه ٥٠ درجه و فاصله ٢ ميلي‌متري بين صفحات مدل‌سازي شده‌اند. در مدل حرارتي از المان‌هاي صفحه‌اي ٤ گره‌اي[٢٤] كه هر گره فقط داراي يک درجه آزادي دمايي است استفاده شد و در مدل مكانيكي از المان‌هاي صفحه‌اي ٤ گره‌اي كه هر گره داراي دو درجه آزادي جابجايي در جهات افقي و عمودي است استفاده شد.




شكل (٤): مدل المان‌بندي شده صفحه‌اي به ضخامت ٢ ميلي‌متر




شكل (٥): مدل المان‌بندي شده صفحه‌اي به ضخامت ٦ ميلي‌متر




شكل (٦): مدل المان‌بندي شده صفحه‌اي به ضخامت ٨ ميلي‌متر

براي شبيه‌سازي فلز پركن[٢٥] اضافه شده در منطقه جوش به عنوان يک پاس جوش جديد در جوشكاري چند پاسه از روش تولد و مرگ المان[٢٦] [١٤] استفاده شده است. در اين روش همه المان‌ها حتي آن دسته از المان‌هايي كه در مراحل بعدي زنده مي‌شوند بايد در ابتدا ايجاد شوند و براي قرار دادن المان‌ها در حالت مرگ هيچ المانی جدا نمي‌شود و يا از بين نمي‌رود بلكه با ضرب كردن سختي آنها در يک ضريب بسيار كوچک، اين المان‌ها غيرفعال مي‌شوند. خصوصيات حرارتي و مكانيكي فلز جوش و پايه به صورت وابسته به دما [٥] تعريف شده است. جدول شماره (٣) شرايط جوشكاري را براي پاس‌هاي مختلف نشان مي‌دهد.

جدول (٣): شرايط جوشكاري براي پاس‌هاي مختلف جوش

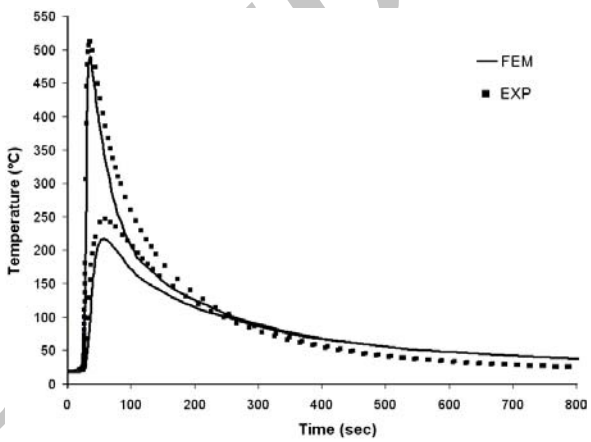
| تعداد پاس‌ها | جريان (A) | ولتاژ (V) | قطر سيم جوش (mm) | سرعت (mm/sec) |
|---|---|---|---|---|
| ١ | ٧٠-٨٠ | ١٢ | ٢/٤ | ٢/٥ |
| ٢ | ١٣٠-١٤٠ | ١٢ | ٢/٤ | ٢/٥ |
| ٣ | ١٧٠-١٨٠ | ١٢ | ٢/٤ | ٢/٥ |

## ۴- بحث و نتایج

### ۴-۱- نتایج حرارتی

#### ۴-۱-۱- مقایسه نتایج حرارتی عددی و آزمایشگاهی

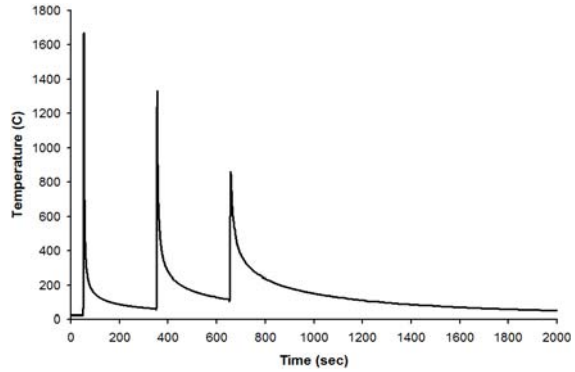
براي اطمينان از درستي عوامل در نظر گرفته شده در مدل گلداک و مقايسه نتايج شبيه‌سازي حرارتي با نتايج آزمايشگاهي، چرخه حرارتي نقاطي به فواصل ۱۰ و۲۰ ميلي‌متر از خط جوش با چرخه حرارتي گزارش شده به وسيله دماسنج‌هاي متصل شده در همين نقاط مقايسه شد. با توجه به شكل (۷) و مقايسه بين اين نتايج مي‌توان درستي عوامل در نظر گرفته شده را دريافت.



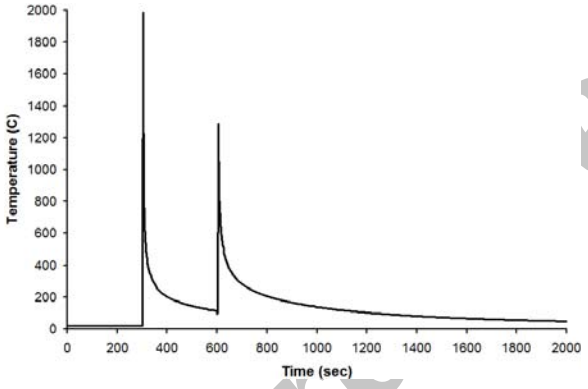

شكل (٦): مقايسه نتايج شبيه‌سازي چرخه حرارتي و كار آزمايشگاهي

#### ۴-۱-۲- نتایج حرارتی جوشکاری چند پاسه

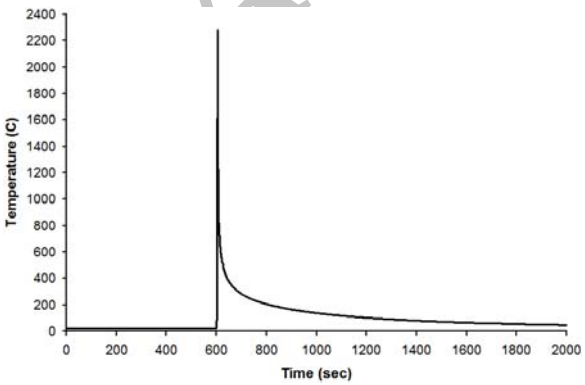
اشكال (۸) الي (۱۰)، چرخه حرارتي نقاط مختلفي روي خط جوش در جوشكاري سه پاسه صفحه ۸ ميلي‌متري را نشان مي‌دهند. نقطه اول در ريشه[۲۷] جوش واقع شده است. طبق شكل (۸) نمودار حرارتي اين نقطه داراي سه مقدار حداكثر مجزا است. حداكثر مقدار دما در نقطه اول برابر با ١٦٧١ درجه سانتي‌گراد است كه در جوشكاري پاس اول ايجاد شده. شكل (۹) نمودار حرارتي را براي نقطه‌اي در وسط ضخامت صفحه نشان مي‌دهد. در هنگام جوشكاري پاس اول هيچ ماده‌اي در اين نقطه وجود ندارد يعني در طول جوشكاري اولين پاس دماي اين نقطه برابر دماي محيط معادل ۲۰ درجه سانتي‌گراد ثابت باقي مي‌ماند. اين نقطه هنگام جوشكاري پاس دوم ايجاد شده و سپس تحت اثر جوشكاري سومين پاس نيز قرار مي‌گيرد. در نتيجه، نمودار حرارتي اين نقطه فقط داراي دو مقدار حداكثر است. شكل (۱۰) نيز نمودار حرارتي را براي نقطه‌اي روي گرده جوش نشان مي‌دهد. در هنگام جوشكاري پاس‌هاي اول و دوم هيچ ماده‌اي در اين منطقه وجود ندارد و در طول جوشكاري اولين و دومين پاس دماي اين نقطه برابر دماي محيط ثابت باقي مي‌ماند. اين نقطه هنگام جوشكاري پاس سوم ايجاد مي‌شود. در نتيجه، نمودار حرارتي اين نقطه فقط داراي يک مقدار حداكثر حرارتي است.




شكل (۸): چرخه حرارتي نقطه‌اي در ريشه جوش




شكل (۹): چرخه حرارتي نقطه‌اي در وسط ضخامت

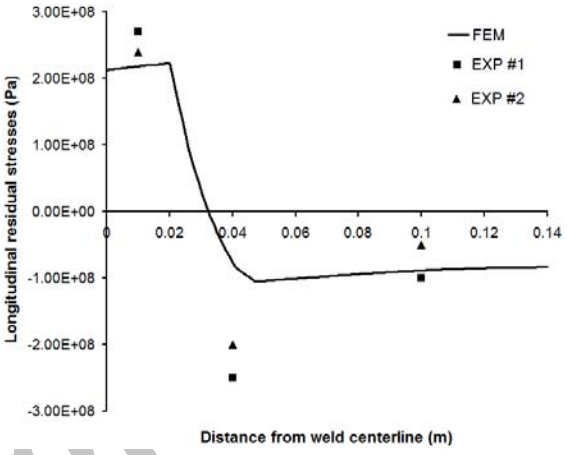



شكل (۱۰): چرخه حرارتي نقطه‌اي در گرده جوش

## ۴-۲- نتایج تنش‌های پسماند

### ۴-۲-۱ مقایسه نتایج تنش پسماند عددي و آزمایشگاهي

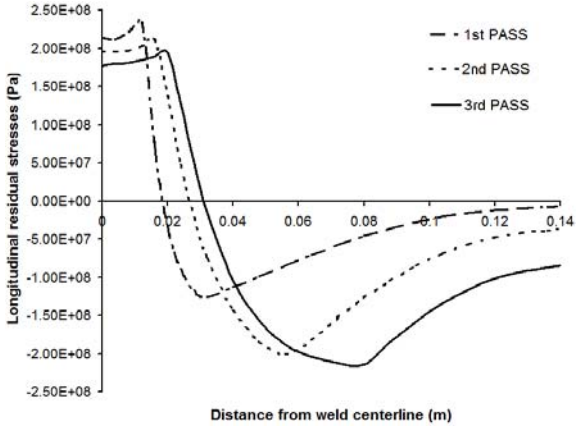
اندازه‌گیري تنش‌هاي پسماند روي دو نمونه صفحه جوشکاري شده مشابه با ضخامت ۲ میلي‌متر تکرار شد. شکل (۱۱) نتایج این دو بررسي آزمایشگاهي و مقایسه آنها با نتایج شبیه‌سازي را نشان مي‌دهد. نتایج مشابه بدست آمده در این دو تکرار، نشان دهنده تکرارپذیر بودن کار آزمایشگاهي است.




شکل (۱۱): مقایسه نتایج کار آزمایشگاهي با نتایج المان محدود

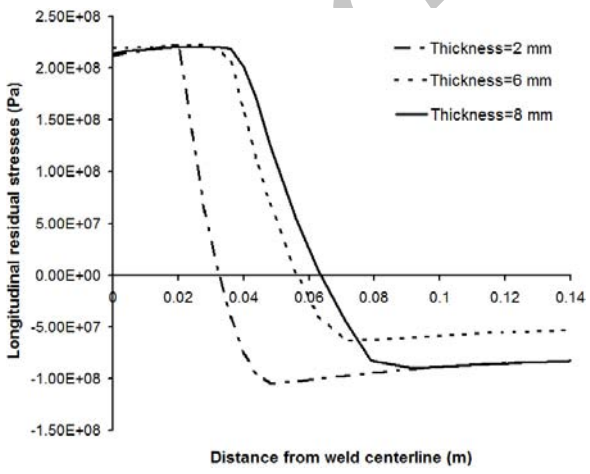
### ۴-۲-۲ نتایج تنش پسماند در جوشکاری چند پاسه

شکل (۱۲) تنش‌هاي پسماند طولي در ریشه جوش از جوشکاري سه پاسه صفحه ۸ میلي‌متري را نشان مي‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش تعداد پاس‌هاي جوشکاري، حداکثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند کششي کاهش مي‌یابد. علت آن را مي‌توان این طور توجیح نمود که با افزایش تعداد پاس‌هاي جوشکاري، به طور مداوم چرخه‌هاي حرارتي جدیدي روي منطقه جوش اعمال مي‌شوند که همین چرخه‌هاي حرارتي باعث نرم شدن[۲۸] جزئي فلز در منطقه ریشه جوش و پاس‌هاي قبلي شده و باعث کاهش تنش‌هاي پسماند در این منطقه مي‌شود. ولي با توجه به منطقه تنش‌هاي فشاري مشخص شد که با اضافه شدن هر پاس جوشکاري، تنش‌هاي ایجاد شده ناشي از پاس جدید به تنش‌هاي ایجاد شده ناشي از پاس‌هاي قبلي اضافه مي‌شود و باعث منفي‌تر شدن تنش‌ها در این منطقه مي‌شود.




شکل (۱۲): مقایسه تنش‌هاي پسماند در جوشکاري چند پاسه

شکل (۱۳) تنش‌هاي پسماند طولي در گرده جوش صفحات مورد بررسي با ضخامت‌هاي مختلف را پس از انجام آخرین پاس جوشکاري نشان مي‌دهد. اشکال (۱۲) و (۱۳) نشان مي‌دهند که با افزایش تعداد پاس‌هاي جوشکاري علاوه بر تغییر حداکثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند که در قسمت قبل توضیح داده شد، تغییراتي نیز در توزیع این تنش‌ها رخ مي‌دهد. به این ترتیب که با افزایش تعداد پاس‌هاي جوشکاري در اثر افزایش ضخامت صفحات، منطقه‌ي داراي تنش‌هاي پسماند کششي افزایش مي‌یابند که علت آن را مي‌توان همان علت بیان شده در قسمت قبل دانست؛ یعني با افزایش تعداد پاس‌هاي جوشکاري، به طور مداوم چرخه حرارتي جدیدي روي صفحه اعمال و باعث ایجاد تنش‌هاي پسماند جدید شده که منجر به گسترش وسعت منطقه حاوي تنش‌هاي پسماند مي‌گردد. البته این بحث در مورد تنش‌هاي پسماند فشاري نیز درست است.




شکل (۱۳): بررسي اثر تعداد پاس روي گستره تنش‌هاي پسماند کششي

### ۳-۲-۴ بررسي اثر تعداد پاس روی تنش‌های پسماند

در كنار اين مجموعه، تحقيقاتي نيز در مورد اثر تغييرات ضخامت صفحات و بدون تغيير در تعداد پاس‌هاي جوشكاري روي تنش‌هاي پسماند براي مقايسه با نتايج ارائه شده در اين مقاله انجام گرفت. براي اين كار، صفحات فولاد ضدزنگ با ضخامت ۱ الي ۳ ميلي‌متر به صورت عددي و آزمايشگاهي مورد بررسي قرار گرفتند. نتايج اين تحقيق نشان مي‌دهد كه با تغيير ضخامت صفحات، حرارت ورودي در واحد ضخامت تغيير مي‌يابد. افزايش يا كاهش حرارت ورودي هيچ اثري روي حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند طولي كششي نداشته ولي باعث تغيير حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند طولي فشاري مي‌شود. كاهش حرارت ورودي همچنين باعث افزايش پهناي منطقه تنش‌هاي پسماند طولي كششي و كاهش پهناي منطقه تنش‌هاي پسماند طولي فشاري مي‌شود [۱۵].

## ۵- نتيجه و جمع‌بندی

در اين مقاله، به بررسي ميدان‌هاي حرارتي گذرا و تنش‌هاي پسماند ناشي از جوشكاري چند پاسه لب به لب صفحات فولاد ضدزنگ ۳۰٤ به روش جوشكاري قوس الكتريكي با الكترود تنگستن پرداخته شد. مسئله، به وسيله تحليل المان محدود حرارتي - مكانيكي غيرخطي غيركوپله در حالت دو بعدي تحليل شد و براي بررسي درستي نتايج تحليل عددي، ميدان‌هاي حرارتي و تنش‌هاي پسماند يک نمونه آزمايشگاهي با استفاده از روش سوراخكاري تعيين شدند. نتايج نشان مي‌دهند كه:

– با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، حداكثر مقدار عددي تنش‌هاي پسماند كششي كاهش مي‌يابند.

– با توجه به منطقه تنش‌هاي فشاري مشخص شد كه با اضافه شدن هر پاس جوشكاري، تنش‌هاي ايجاد شده ناشي از پاس جديد به تنش‌هاي ايجاد شده ناشي از پاس‌هاي قبلي اضافه مي‌شود و باعث منفي‌تر شدن تنش‌ها در اين منطقه خواهد شد.

– با افزايش تعداد پاس‌هاي جوشكاري در اثر افزايش ضخامت صفحات، منطقه‌ي داراي تنش‌هاي پسماند كششي و فشاري افزايش مي‌يابد.

## ۶- فهرست علائم

| | |
|---|---|
| $k$ | ضريب هدايت حرارتي، $W/m\,℃$ |
| $c$ | گرماي ويژه، $J/kg\,℃$ |
| $T$ | دما، $℃$ |
| $t$ | زمان، $sec$ |
| $Q$ | نرخ توليد حرارت، $W$ |
| $f_f$ | حرارت منتقل شده به جلوي حوضچه |
| $f_r$ | حرارت منتقل شده به عقب حوضچه |
| $I$ | شدت جريان، $A$ |
| $U$ | ولتاژ، $V$ |
| $\rho$ | چگالي، $kg/m^3$ |
| $\eta$ | بازده |
| $\dot{\varepsilon}_t$ | نرخ كرنش كل |
| $\dot{\varepsilon}^e$ | نرخ كرنش الاستيک |
| $\dot{\varepsilon}^p$ | نرخ كرنش پلاستيک |
| $\dot{\varepsilon}^{th}$ | نرخ كرنش حرارتي |

## ۷- مراجع


[۱] Rybicki, E. F.; "Computation of Residual Stresses due to Multi-Pass Welds in Piping Systems", Journal Pressure Vessel Technology, 101, pp. 149–154, 1979.

[۲] Arnold Free, J.; "Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method", Computers & Structures, 32, 2, pp. 365–378, 1989..

[۳] Lejeail, Y.; "Simulation of a Stainless Steel Multi-Pass Weldment", 5th International Conference on Residual Stresses (ICRS-5), Linkoping, Sweden, pp. 484–489, June, 1997.

[۴] Teng, T. L.; and Lin, C. C.; "Effect of Welding Conditions on Residual Stresses due to Butt Welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75, pp. 857–864, 1998.

[۵] Brickstad, B.; and Josefson, B. L.; "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75, pp. 11–25, 1998.

[۶] Chang, P. H.; and Teng, T. L.; "Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints", Computational Materials Science, 29, pp. 511–522, 2004.

[۷] Duranton, P.; Devaux, J.; Robin, V.; Gilles, P.; and Bergheau, J. M.; "3D Modeling of Multi-Pass Welding of a 316L Stainless Steel Pipe", Journal of Materials Processing Technology, 153, pp. 457–463, 2004.

[۸] Cho, J. R.; Lee, Y. B.; Moon, Y. H.; and Van Tyne, C. J.; "Investigation of Residual Stress and Post Weld Heat Treatment of Multi-Pass Welds by Finite Element Method and Experiments", Journal of Materials Processing Technology, 155, pp. 1690–1695, 2004.

[۹] Akbari Mousavi, S. A. A.; and Miresmaeili, R.; "Experimental and Numerical Analysis of Residual Stress Distribution in TIG Welding Process for 304L Stainless Steel", Journal of Materials Processing Technology, 208, pp. 383–394, 2008.

[۱۰] Deng, D.; "FEM Prediction of Welding Residual stress and Distortion in Carbon Steel Considering Phase Transformation Effects", Material and Design, 30, pp. 359–366, 2009.

[۱۱] Sattari-Far, I.; and Farahani, M. R.; "Effect of the Weld Groove Shape and Pass Number on Residual Stresses in Butt-Welded Pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86, pp. 723–731, 2009.

[۱۲] ASTM Standard: "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method", Designation: E 837-01, 2002.

[۱۳] Goldak, J. A.; and Akhlaghi, M.; Computational Welding Mechanics, Springer, 2005.

[۱۴] ANSYS User Manual, ANSYS release 10.0., Swanson Analysis System, Houston, USA, 2006.

[۱۵] Seyyedian, M.; Amini, Sh.; and Haghpanahi, M.; "Study of the Effect of Thickness on Residual Stresses in Butt-Welding of SUS304 Plates", The 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding (IIW), Singapore, pp. 195–200, 2009.

## ۸- زیرنویس ها

[۱] ANSYS
[۲] Rybicki
[۳] Arnold Free
[٤] Lejeail
[٥] Rosenthal
[٦] Teng
[۷] Brickstad
[۸] Chang
[۹] X-Ray Diffraction
[۱۰] Duranton
[۱۱] Cho
[۱۲] Deng
[۱۳] Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)
[۱٤] Hole Drilling Method
[۱٥] Groove
[۱٦] Gap
[۱۷] Thermocouples
[۱۸] Strain Gages
[۱۹] Double Ellipsoid
[۲۰] Goldak
[۲۱] Efficiency
[۲۲] Fusion Zone (FZ)
[۲۳] Heat Affected Zone (HAZ)
[۲٤] Node
[۲٥] Filler Metal
[۲٦] Element Birth and Death
[۲۷] Root
[۲۸] Annealing