



# بررسی اثرات پارامترهای جوش کاری بر راندمان پروسه جوش کاری زیرپودری

ستایش حاک زرگر<sup>۱</sup>، محمدرضا فراهانی<sup>۲\*</sup>، محمد کاظم بشارتی گیوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۵۱۵-۱۴۳۹۵، mrfarahani@ut.ac.ir

**چکیده-** در این مطالعه از روش المان محدود به منظور تحلیل رفتار ترمو مکانیکی در جوش کاری لب به لب ورق‌ها به روش زیرپودری استفاده می‌شود. به منظور بررسی اثر پارامترهای جوش کاری، بر بزرگی راندمان پروسه جوش کاری زیرپودری، تغییرشکل‌های بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود جوش کاری با نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی مقایسه خواهد شد. با کالیبراسیون مدل المان محدود با استفاده از نتایج بررسی‌های تجربی، بزرگی راندمان جوش کاری در هر نمونه آزمایش بدست می‌آید. بر مبنای این تحقیق، روال لازم برای مدل‌سازی المان محدود به منظور بررسی تأثیر ولتاژ، شدت جریان و سرعت جوش کاری بر جوش کاری زیرپودری با دقت قابل قبول توسعه داده می‌شود. تغییرشکل‌های زاویه‌ای در ورقی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر از جنس فولاد کربنی مطالعه خواهند شد. بعد از بررسی نتایج با استفاده از تحلیل‌های آماری مشخص می‌شود، ولتاژ و سرعت جوش کاری اثر محسوسی بر روی راندمان جوش کاری زیرپودری نداشته و تنها با افزایش شدت جریان مقدار راندمان افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه‌گان:** راندمان جوش کاری زیرپودری، تحلیل المان محدود، تغییرشکل زاویه‌ای، پارامترهای جوش کاری.

## Investigation on the effects of welding parameters on the submerged arc welding efficiency

S.H. Zargar<sup>1</sup>, M. Farahani<sup>2\*</sup>, M.K. Besharati Givi<sup>3</sup>

1- MSc Student, Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran

2- Assist. Prof., Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14395-515, Tehran, Iran. mrfarahani@ut.ac.ir

**Abstract-** In this study, the finite element technique was used to analyze the thermo-mechanical behavior of the submerged arc butt-welded plates. In order to investigate the effects of the welding parameters on the magnitude of the submerged arc welding process efficiency, the distortions obtained from the finite element simulation were compared with experimental results. For studying the effects of welding voltage, current and speed on SAW process, finite element model with acceptable accuracy was developed. Welding efficiency of each sample were estimated by calibration of the finite element model. The angular distortions were studied in carbon steel plates of 12 millimeter thickness. Statistical analysis shows that the welding voltage and speed have no significant effect on the SAW efficiency. It is observed that by increasing the welding current, the magnitude of the welding efficiency increased significantly.

**Keywords:** Submerged Arc Welding Efficiency, Finite Element Analysis, Angular Distortion, Welding Parameters.

## ۱- مقدمه

در فرایند جوش کاری قوسی زیرپودری، ایجاد فلز مذاب و اتصال قطعات، در اثر حرارت ایجاد شده حاصل از ذوب الکتروود سیمی مصرفی و قطعات به وجود می‌آید. در این فرایند، سرباره نقش حفاظت و تصفیه را بر عهده داشته و بنابراین جوش‌های تمیزی حاصل می‌شود. فرایند جوش کاری زیرپودری عمدتاً جوش کاری با نرخ رسوب بالا، نفوذ زیاد، در سازه‌های بزرگ فولادی که مساعد برای جوش کاری اتوماتیک می‌باشند به کار می‌رود. در برخی موارد جوش کاری فولادهای زنگ نزن نیز توسط این روش صورت می‌گیرد. در صنعت کشتی‌سازی و ساخت مخازن ذخیره و تحت فشار از این روش به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود [۱].

راندمان قوس که از آن به عنوان راندمان فرایند، راندمان گرمایی و راندمان انتقال گرما نیز نام برده می‌شود، نقش بسیار مهمی را در جنبه‌های مختلف تکنولوژی جوش کاری بازی می‌کند. بزرگی راندمان قوس، اثر مستقیمی بر حجم مذاب تولید شده و میزان انرژی ورودی در حین پروسه جوش کاری دارد. تغییرات راندمان بر بزرگی تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های جوشی نیز اثرگذار است، به همین دلیل هنگام به کارگیری شبیه‌سازی‌های عددی برای فرایندهای جوش کاری، دانستن مقدار راندمان بسیار مهم می‌باشد. در حقیقت راندمان قوس مشخص می‌کند که چه میزان از انرژی جوش کاری به قطعه وارد می‌شود و چه میزان از آن تلف می‌شود [۲].

دو روش مختلف برای تعیین راندمان قوس وجود دارد. یکی از آنها بر مبنای استفاده از آزمایش‌های تجربی با کالری‌متر و روش دیگر کالیبره کردن مدل‌های عددی با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده از قبیل ماکزیمم دمای حاصل از جوش کاری در فاصله معین از خط مرکزی جوش، مقدار تغییر شکل می‌باشد [۳]. هر دو روش دارای خطا می‌باشند. استفاده از کالری‌متر به طور وسیعی در گذشته مورد استفاده قرار گرفته است، در صورتی که امروزه با توجه به پیشرفت علم المان محدود و همچنین تمایل به انجام مدل‌سازی‌های عددی، استفاده از روش‌های مدل‌سازی توسعه زیادی داشته است [۴-۶].

مشخص شده است که به طور کلی مقدار راندمان فرایند برای جوش کاری با الکتروود مصرفی به طور میانگین ۱۰ تا ۲۰

درصد بیشتر از جوش کاری با الکترودهای غیرمصرفی می‌باشد [۶]. جایت و همکارانش مقایسه ای بین راندمان قوس تعیین شده به وسیله حوزه‌های دمایی در ماده پایه و منطقه مذاب که توسط کالریمتر اندازه گرفته شده بودند، انجام دادند [۷]. در تحقیقاتی که توسط نیلز و جکسون انجام گرفت، مشخص شد که در فرایند جوش کاری گاز - تنگستن، با افزایش شدت جریان میزان راندمان کاهش یافته و همچنین تغییرات زاویه نوک الکتروود تأثیر قابل توجهی روی راندمان ندارد [۸]. بنابراین گزارش سکویبو همکارانش، وجود شیار به عنوان مکانی برای ذوب الکتروود می‌تواند سبب افزایش راندمان فرایند شود و این امر را به این دلیل می‌داند که مقدار زیادی از اتلاف گرما به واسطه دیواره شیار جذب می‌شود [۹]. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد راندمان فرایند جوش کاری زیرپودری انجام نگرفته است و در عمده تحقیقات انجام شده در این حوزه، مقدار راندمان قوس را ثابت فرض نموده‌اند.

پارامترهای مؤثر زیادی در فرایند جوش کاری زیرپودری وجود دارند. تنوع این پارامترها باعث پیچیده شدن بررسی اثرات آنها بر روی راندمان قوس جوش کاری می‌شود. قطر الکتروود، جنس الکتروود، جنس پودر، نوع قطبیت، نوع یخ، شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوش کاری از جمله این پارامترها هستند. به منظور تسهیل در بررسی‌های انجام شده، می‌بایست تعدادی از این پارامترها ثابت فرض می‌شد. قطر الکتروود، نوع پودر و شکل یخ از جمله این پارامترها هستند. در این مطالعه، تنها تأثیر پارامترهای جوش کاری زیرپودری از قبیل شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوش کاری بر روی راندمان قوس فرایند جوش کاری بررسی شده است.

## ۲- جنبه‌های تئوری

در مدل‌سازی فرایند جوش کاری، تقابل بین حوزه‌های مختلف علوم مهندسی از قبیل انتقال حرارت، متالورژی و مکانیک وجود دارد. در روش المان محدود دو روش مشخص و مجزا برای انجام تحلیل‌های ترمومکانیکال وجود دارد: روش مستقیم<sup>۱</sup> و روش غیر مستقیم<sup>۲</sup>. در این مطالعه روش غیر مستقیم برای انجام تحلیل‌های المان محدود مورد استفاده قرار گرفته است.

1. Couple  
2. Uncouple

معادله (۳) معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت در یک جسم جامد است. حل عمومی با استفاده از شرایط اولیه و مرزی زیر بدست می‌آید:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (۴)$$

$$\left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} N_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} N_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} N_z \right) + q_s + h_c(T - T_\infty) + h_r(T - T_r) = 0 \quad (۵)$$

که در معادلات (۴) و (۵)،  $N_x$ ،  $N_y$  و  $N_z$  کسینوس‌های هادی،  $h_c$  ضریب انتقال حرارت همرفت و  $h_r$  ضریب انتقال حرارت تشعشع می‌باشد.  $T_\infty$  دمای محیط اطراف و  $T_r$  دمای منبع تشعشع می‌باشد. ضریب انتقال حرارت تشعشع به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۱۱]:

$$h_r = \sigma \epsilon F (T^2 + T_r^2) (T + T_r) \quad (۶)$$

که در آن  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن،  $\epsilon$  ضریب پخش موثر و  $F$  فاکتور شکل می‌باشد.

با حل معادله (۳) با در نظر گرفتن شرایط مرزی معادله‌های (۴) و (۵)، می‌توان توزیع دمایی را در بدنه بدست آورد. این میدان دمایی سپس برای حل مدل مکانیکی به منظور محاسبه تغییرشکل‌های جوشی استفاده می‌شود.

## ۲-۲- تحلیل مکانیکی الاستو-پلاستیک

معادلات پایه‌ای مربوط به تحلیل مکانیکی شامل معادلات تعادل و معادلات پایه‌ای هستند که در زیر آمده‌اند [۱۱]:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \cdot b_i = 0 \quad (۷)$$

که در معادله (۷)  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش و  $b_i$  نیروی حجمی می‌باشند. همچنین فرض می‌شود که تانسور تنش متقارن است، یعنی  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ . معادلات پایه‌ای:

مدل مواد ترمو الاستو-پلاستیک، بر پایه معیار فون میسز و قانون کرنش سختی همسان‌گرد در نظر گرفته می‌شود. روابط تنش و کرنش عبارتند از معادلات (۸-الف) و (۸-ب):

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\epsilon] - [C^{th}]dT \quad (۸-الف)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (۸-ب)$$

که در این معادلات  $[D^e]$  ماتریس سختی الاستیک،  $[D^p]$  ماتریس سختی پلاستیک،  $[C^{th}]$  ماتریس سختی حرارتی،  $d\sigma$  جز تنش،  $d\epsilon$  جز کرنش و  $dT$  جز دما می‌باشند. از آنجا که

در این روش ابتدا یک تحلیل حرارتی بر روی مدل انجام می‌گیرد. این تحلیل یک آنالیز حرارتی گذرا است که در طی آن توزیع دمایی وابسته به زمان مشخص می‌شود. سپس تحلیل مکانیکی انجام می‌گیرد. در این مرحله تاریخچه دمایی گره‌های مختلف به عنوان ورودی تحلیل به کار می‌رود، به گونه‌ای که برای محاسبه کرنش‌ها و تنش‌ها در آنالیز سازه‌ای، ابتدا حوزه‌های دمایی در هر مرحله زمانی از نتایج حاصل از آنالیز حرارتی فراخوانی می‌شوند.

پس از انجام آنالیز حرارتی، تحلیل مکانیکی انجام می‌شود. این کار منجر به صرفه‌جویی بالایی در زمان لازم جهت مدل‌سازی می‌شود [۱۰].

تغییر شکل‌های زاویه‌ای ناشی از جوش کاری در اینجا با استفاده از روش المان محدود محاسبه می‌شوند. ملاحظات تئوری تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی به صورت مختصر در ادامه توضیح داده می‌شوند:

## ۲-۱- تحلیل حرارتی گذرا

هنگامی که یک حجم به وسیله صفحات دلخواه در بر گرفته می‌شوند، تعادل حرارتی توسط معادله (۱) بیان می‌شود [۱۱]:

$$-\left( \frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (۱)$$

که در این معادله  $R_x$  و  $R_y$  و  $R_z$  نرخ شار حرارتی در واحد سطح،  $T(x, y, z)$  دمای کنونی،  $\rho$  چگالی و  $c$  گرمای ویژه و  $t$  بیانگر زمان است. سپس مدل با معرفی و اعمال قوانین شار حرارت فوریه کامل می‌شود (معادلات ۲-الف تا ۲-ج) [۱۱]:

$$R_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۲-الف)$$

$$R_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (۲-ب)$$

$$R_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (۲-ج)$$

که در این معادلات  $k_x$  و  $k_y$  و  $k_z$  ضریب هدایت حرارتی به ترتیب در راستاهای  $x$  و  $y$  و  $z$  هستند. پارامترهای  $k_x$  و  $k_y$  و  $k_z$  و  $\rho$  و  $c$  همگی خود تابعی از دما هستند. با اعمال معادلات (۲) در معادله (۱)، معادله (۳) بدست می‌آید [۱۱]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۳)$$

پاس با توجه به مرجع [۱۴] انتخاب شدند.

فرایند جوش کاری استفاده شده در این مطالعه، جوش کاری زیرپودری می‌باشد. بعد از آماده‌سازی نمونه و اتصال قطعات به یکدیگر و تنظیم پارامترهای مورد نظر، دو ورق در یک پاس به یکدیگر جوش داده شدند.

به منظور بررسی اثر پارامترهای پروسه جوش کاری (شدت جریان، ولتاژ و سرعت) از روش طراحی آزمایش استفاده شد. با استفاده از روش طراحی آزمایش، می‌توان بیشترین اطلاعات را با کمترین تعداد دفعات انجام آزمایش بدست آورد. طراحی آزمایش با تعیین اهداف و فاکتورهای مؤثر بر اهداف شروع شده و سپس اهداف در غالب یک معادله ریاضی مدل می‌شوند. در روش فاکتوریل کامل<sup>۲</sup> که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، اثرات تمام فاکتورها به طور کامل در آزمایش مد نظر قرار می‌گیرد. این روش دقیق‌ترین روش و البته زمان‌برترین و پرهزینه‌ترین روش نیز محسوب می‌شود [۱۵]. حد بالا و پایین استفاده شده برای هر پارامتر در جدول ۱ نشان داده شده است. به منظور تعیین این حدود از مقالات و استانداردهای موجود در زمینه جوش کاری زیرپودری استفاده شد [۱۷، ۱۶، ۱].

جنس ماده استفاده شده در این تحقیق فولاد کربنی St37 می‌باشد. همچنین قطر سیم جوش به کار رفته ۴ میلی‌متر و نوع آن AMA 50-14 بوده و نوع پودر استفاده شده نیز AMA OP129 می‌باشد. کلیه این پارامترها در تمامی آزمون‌های تجربی ثابت در نظر گرفته شدند.

جدول ۱ حدود بالا و پایین پارامترهای جوش کاری استفاده شده

شماره قطعه کار	شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت (mm/s)
۱	۵۰۰	۲۰	۳
۲	۵۰۰	۲۰	۵
۳	۵۰۰	۳۲	۳
۴	۵۰۰	۳۲	۵
۵	۶۵۰	۲۰	۳
۶	۶۵۰	۲۰	۵
۷	۶۵۰	۳۲	۳
۸	۶۵۰	۳۲	۵
۹	۵۷۵	۲۶	۴

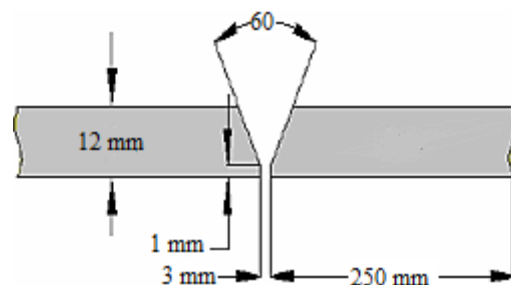
تحلیل الاستو-پلاستیک حرارتی یک مسأله غیرخطی است، در این تحقیق از روش تحلیل مرحله به مرحله<sup>۱</sup> برای حل مسأله استفاده می‌شود.

### ۳- تحقیقات تجربی

دو روش کلی برای تعیین راندمان قوس جوش کاری وجود دارد. یکی از آنها بر مبنای استفاده از کالری‌متر می‌باشد. روش دیگر کالیبره نمودن مدل‌های تحلیلی با در نظر گرفتن پارامترهای تجربی اندازه‌گیری شده است. ماکزیمم دما در فاصله‌ای مشخص از خط مرکزی و تغییر شکل‌های جوشی از جمله این پارامترها هستند [۱۳، ۱۲، ۳]. در این مطالعه به منظور تعیین راندمان از روش کالیبره کردن مدل المان محدود با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های جوشی استفاده شد. این روش یک روش غیر مستقیم برای اندازه‌گیری راندمان قوس می‌باشد. به همین دلیل تست‌های تجربی جهت جمع‌آوری داده‌های تغییر شکل زاویه‌ای حاصل از جوش بر روی سطح خارجی ورق‌های لب به لب جوش داده شده انجام شدند. نتایج تجربی به منظور مقایسه با نتایج مدل المان محدود برای تعیین راندمان جوش کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۳-۱- آماده‌سازی نمونه

برای تهیه یک نمونه تجربی، دو ورق با ابعاد  $12 \times 250 \times 3$  میلی‌متر با پخی به شکل V با زاویه ۶۰ درجه آماده شدند. این دو ورق نخست توسط دو خال جوش در ابتدا و انتها به یکدیگر وصل شدند. ابعاد قطعه آماده شده در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



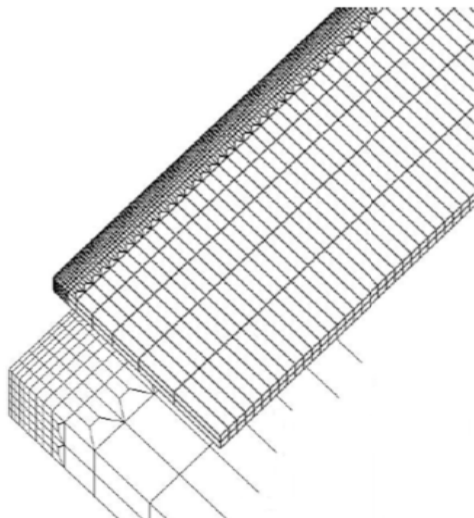
شکل ۱ ابعاد ورق‌های استفاده شده در این مطالعه

نحوه آماده‌سازی نمونه، اندازه پخ، مقدار ریشه جوش و تعداد

المان محدود سه بعدی حرارتی و مکانیکی با استفاده از نرم افزار انسیس ۱۴ انجام گرفت. برای حل مسأله از روش کوپل غیر مستقیم استفاده شد. در مدل المان محدود در این مطالعه به منظور شبیه سازی رسوب ماده پر کننده در حین جوش کاری از تکنیک تولد و مرگ المان<sup>۱</sup> استفاده می شود.

در این تکنیک بایستی تمامی المان ها از جمله المان های جوش را ایجاد نمود و سپس المان هایی که از نظر زمانی وجود ندارند را در حالت مرگ قرار داد. در حین عبور منبع حرارتی جوش کاری از هر مقطع، المان های غیرفعال شده به ترتیب زنده می شوند، به گونه ای که سرعت زنده کردن المان ها و سرعت حرکت الکتروود با هم مساوی باشد [۱۹].

المان مربوط به تحلیل گرمایی، المان Solid70 می باشد که یک المان هشت گرهی با یک درجه آزادی است. تعداد این المان ۴۶۲۸ المان می باشد. در این شبیه سازی المان استفاده شده در تحلیل مکانیکی نیز، یک المان هشت گرهی با سه درجه آزادی می باشد. اندازه مش تأثیر زیادی بر روی نتایج خروجی دارد. به همین جهت چندین مدل با اندازه های مش مختلف ارائه شده در مرجع [۲۰]، در این آزمایش مورد تحلیل قرار گرفتند که سرانجام مش نشان داده شده در شکل ۳ به عنوان مش نهایی برای تحلیل شبیه سازی مدل اتصال جوشی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت.

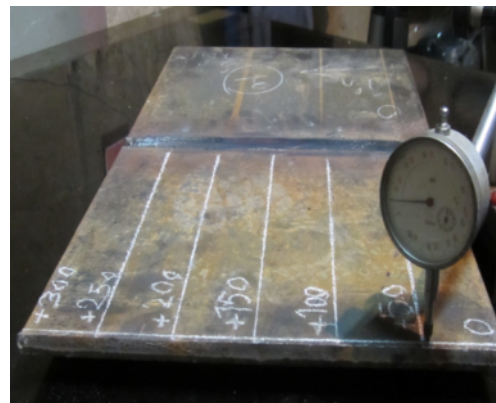


شکل ۳ مش المان محدود استفاده شده در تحلیل اتصال جوش لب به لب

خواص متالورژیکی مواد با تغییرات دما، دچار تغییر و تحول می شوند. بنابراین به منظور شبیه سازی دقیق تر نیاز است که خواص متناسب با دمای ماده مورد استفاده قرار گیرد. از بین این خواص تنش تسلیم و مدول یانگ بیشترین تأثیر را دارا هستند و سایر خواص مانند ضریب پواسون، ضریب انتقال حرارت تأثیر شدیدی بر روی نتایج شبیه سازی ندارند [۱۸]. خواص مکانیکی و حرارتی فولاد مورد استفاده در دماهای مختلف، در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۳-۲- اندازه گیری تغییر شکل زاویه ای

بعد از جوش کاری، تغییر شکل های زاویه ای ایجاد شده در هر نمونه اندازه گیری شدند. به همین منظور ابتدا ورق بر روی دو قطعه هم ارتفاع قرار داده شد و سپس ساعت اندیکاتور در کنار ورق قرار داده و نقطه کنار خط جوش به عنوان نقطه صفر در نظر گرفته شد. سپس لبه انتهایی ورق را به ۶ فاصله مساوی ۵۰ میلی متری تقسیم نموده و سپس با استفاده از ساعت اندیکاتور مطابق شکل ۲، میزان تغییر شکل ها در فواصل مختلف اندازه گیری شدند. با توجه به این که قطعات به صورت متقارن به یکدیگر جوش داده شده اند، تنها تغییر شکل های یک نیمه از ورق های جوش داده شده اندازه گیری شدند. در انتها ماکزیمم مقدار تغییر شکل حاصل به منظور مقایسه نتایج، استخراج شدند.



شکل ۲ اندازه گیری تغییر شکل زاویه ناشی از جوش کاری

### ۴- محاسبات المان محدود

#### ۴-۱- شبیه سازی جوش کاری

در اینجا محاسبه تغییر شکل های جوشی با استفاده از تحلیل

1. Element Birth & Death

جدول ۲ خواص مکانیکی و حرارتی وابسته به دمای ماده مورد استفاده [۱۵].

دما (°C)	هدایت حرارتی (W/mK)	گرمای مخصوص (J/kgK)	آنتالپی (GJ/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)
۰	۵۱/۹	۴۵۰	۱	۰/۲۷۸۶	۲۹۰	۲۰۰
۱۰۰	۵۱/۱	۴۹۹/۲	۲	۰/۳۰۹۵	۲۶۰	۲۰۰
۳۰۰	۴۶/۱	۵۶۵/۵	۲/۶۵	۰/۳۳۱	۲۰۰	۲۰۰
۴۵۰	۴۱/۰۵	۶۳۰/۵	۳/۸	۰/۳۳۸	۱۵۰	۱۵۰
۵۵۰	۳۷/۵	۷۰۵/۵	۴/۱	۰/۳۵۷۵	۱۲۰	۱۱۰
۶۰۰	۳۵/۶	۷۷۳/۳	۴/۵۵	۰/۳۷۳۸	۱۱۰	۸۸
۷۲۰	۳۰/۶۴	۱۰۸۰/۴	۵	۰/۳۷۳۸	۹/۸	۲۰
۸۰۰	۲۶	۹۳۱	۵/۲۳	۰/۴۲۳۸	۹/۸	۲۰
۱۴۵۰	۲۹/۴۵	۴۳۷/۹۳	۹	۰/۴۷۳۸	-	۲
۱۵۱۰	۲۹/۷	۴۰۰	۱۱	-	-	۰/۲
۱۵۸۰	۲۹/۷	۷۳۵/۲۵	۱۱	-	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۰۰۲
۵۰۰۰	۴۲/۲	۴۰۰	۱۲/۵	۰/۴۹۹	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۰۰۲

$$\begin{cases} \alpha_h = 0.0668T & 0 < T \leq 500 \\ \alpha_h = 0.231T - 82.1 & T > 500 \end{cases} \quad (9)$$

که در رابطه (۹)، T بیانگر دما بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. فرض می‌شود که در بالای نقطه ذوب، هدایت گرمایی دو برابر می‌شود. این فرض به منظور شبیه‌سازی تأثیر اغتشاش هدایتی در ماده ذوب شده می‌باشد [۲۳].

#### ۴-۳- تحلیل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی بدست آمده از تحلیل حرارتی به عنوان بار حرارتی وارد تحلیل سازه‌ای می‌شود. سپس تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی در هر جز زمان محاسبه می‌شوند. تعداد ۱۰۱۴۴ گره مدل‌سازی شد. المان‌های مرتبه اول از نوع المان Solid185 در تحلیل مکانیکی با فرض جابجایی بزرگ غیرخطی استفاده شدند [۲۱]. در شکل ۴، توزیع حرارتی پس از خنک شدن نمونه نشان داده شده است.

فرض می‌شود که تغییر فاز حالت جامد در فولاد St37 تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج نهایی ندارد [۲۴]. در حین فرایند جوش کاری، نرخ کرنش کلی به سه جزء تجزیه می‌شود:

$$\varepsilon^* = \varepsilon^{*e} + \varepsilon^{*p} + \varepsilon^{*th} \quad (10)$$

جزء‌های سمت راست معادله (۱۰) به ترتیب بیانگر کرنش الاستیک، کرنش پلاستیک و کرنش حرارتی می‌باشند.

تمام پارامترهای جوش کاری از قبیل شرایط مرزی و زمان چرخه هر پاس در هر دو مدل حرارتی و مکانیکی همانند شرایط آماده‌سازی نمونه‌ها انتخاب می‌شوند.

#### ۴-۲- تحلیل حرارتی

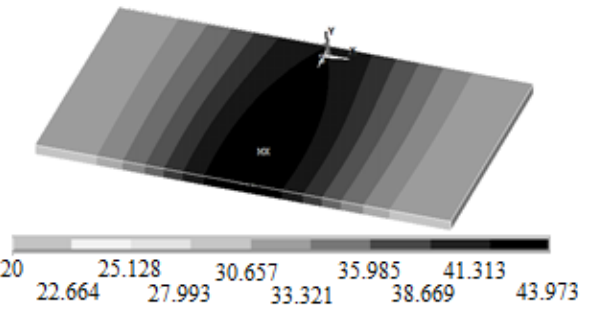
در طول پاس جوش کاری، توزیع دمایی مدل حرارتی محاسبه شد. المان‌های مرتبه اول از نوع Solid70 در تحلیل حرارتی استفاده شدند. گرمای ناشی از حرکت قوس جوش کاری در فلز جوش با استفاده از توزیع دو بیضوی گلداک و به صورت متغیر در جهت ضخامت اعمال شد. نرخ فلاکس حرارتی در هر گره فلز جوش، با استفاده از رابطه گلداک محاسبه شد و سپس کل حرارت ورودی روی آن گره‌ها به وسیله نرخ محاسبه شده، توزیع گردید [۲۱].

شرایط مرزی حرارتی شامل تشعشع و همرفت به محیط اطراف از طریق تمامی سطوح ورق به جز سطح تقارن و ناحیه ای که گرما از طریق آن به ورق وارد می‌شود، می‌باشد. اتلاف حرارت به صورت تشعشع در دماهای بالا و در مجاورت جوش و انتقال حرارت همرفت در دماهای پایین‌تر و دورتر از قوس غالب است. یک زیربرنامه<sup>۱</sup> به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزی حرارتی ترکیبی توسعه داده شد. برای ضریب انتقال حرارت وابسته به دما ( $W/m^2$ ) خواهیم داشت [۲۲]:

1. User Subroutine

جوش کاری بر روی راندمان جوش کاری از روش فاکتوریل کامل به عنوان روش طراحی آزمایش استفاده شد و نهایتاً بعد از تحلیل نتایج بدست آمده توسط نرم افزار، مطابق جدول ۴، میزان تأثیرگذاری هر پارامتر بدست آمد.

مطابق جدول آنالیز واریانس، شدت جریان تأثیر بسیار مشخصی بر روی راندمان جوش کاری داشته و با افزایش شدت جریان، همان گونه که در شکل ۶- الف مشخص است، میزان راندمان فرایند جوش کاری زیرپودری افزایش می یابد. این پدیده را می توان این گونه توجیه کرد که با افزایش شدت جریان، میزان انرژی انتقالی به قطعه کار افزایش یافته و به همین دلیل راندمان زیاد می شود. در مورد ولتاژ و سرعت جوش کاری می توان گفت مطابق شکل ۶- ب و ۶- ج به ترتیب با افزایش ولتاژ و سرعت جوش کاری، راندمان قوس ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. اگرچه مطابق مقدار عدد p بدست آمده از تحلیل واریانس، این دو پارامتر دارای تأثیر شدیدی بر روی راندمان نیستند.



شکل ۴ توزیع حرارتی نمونه بعد از خنک شدن (اعداد بر حسب درجه سانتی گراد)

تغییر شکل های جوشی، نتایج جمع شده مرحله نهایی محاسبه، زمانی که تمام مدل خنک می شود، می باشند. این فرض وجود دارد که مواد از معیار تسلیم فن میسر و قانون جریان پیروی می کنند. در محاسبات فرض می شود که کرنش سختی ایزوتروپیک غیرخطی<sup>۱</sup> وجود دارد.

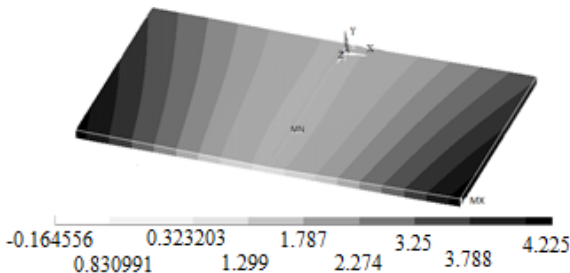
تنش های پسماند عرضی، باعث ایجاد تغییر شکل های زاویه ای می شود و کمتر بودن مقدار تنش ها در سطح تحتانی نسبت به سطح فوقانی، سبب پیچیدگی قطعات به سمت بالا می شود. توزیع تغییر شکل زاویه ای نمونه ۵ بعد از خنک شدن در شکل ۵ نشان داده شده است.

## ۵- بحث و بررسی نتایج

برای انجام طراحی آزمایش ها از نرم افزار مینی تب<sup>۲</sup> استفاده شد. آزمایش های تجربی طبق ترتیب رندوم تعیین شده توسط این نرم افزار مطابق جدول ۳ انجام شدند. بعد از انجام این آزمایش ها، تغییر شکل های زاویه ای اندازه گیری شدند. سپس برای هر آزمایش، حداقل پنج یا شش مدل المان محدود با راندمان های مختلف تحلیل شد تا نهایتاً راندمان مناسب که منجر به تغییر شکلی با دقت ۰/۲٪ نسبت به نمونه تجربی شود، بدست آمد.

نهایتاً با کالیبره شدن مدل، بزرگی راندمان برای هر آزمایش تعیین شد. مقادیر بدست آمده برای راندمان قوس هر آزمایش در جدول ۳ آورده شده اند.

در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر پارامترهای جوش کاری زیرپودری شامل شدت جریان، ولتاژ و سرعت



شکل ۵ توزیع تغییر شکل زاویه ای مدل المان محدود (اعداد بر حسب میلی متر)

جدول ۳ نتایج راندمان جوش کاری بدست آمده

راندمان	ماکزیمم تغییر شکل	سرعت	ولتاژ	شدت جریان
۰/۸۶	۳/۸۴	۳	۲۰	۵۰۰
۰/۸۷	۲/۷	۵	۲۰	۵۰۰
۰/۸۵	۴/۲۹	۳	۳۲	۵۰۰
۰/۸۷	۳/۷۶	۵	۳۲	۵۰۰
۰/۹۲	۴/۱۹	۳	۲۰	۶۵۰
۰/۹۵	۲/۹۱	۵	۲۰	۶۵۰
۰/۸۸	۵/۷۶	۳	۳۲	۶۵۰
۰/۹	۴/۱۹	۵	۳۲	۶۵۰
۰/۸۶	۳/۸۹	۴	۲۶	۵۷۵

1. Bilinear  
2. Minitab

جدول ۴ جدول آنالیز واریانس

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات متوالی	مجموع مربعات تعدیل شده	میانگین مربع خطای تعدیل شده	ضریب F	ضریب P
رگرسیون	۳	۰/۰۰۷۰۵	۰/۰۰۷۰۵	۰/۰۰۲۳۵	۷/۴۷	۰/۰۲۶۹
شدت جریان	۱	۰/۰۰۵۰۰	۰/۰۰۵۰۰	۰/۰۰۵۰۰	۱۵/۹۰	۰/۰۱۰۴
ولتاژ	۱	۰/۰۰۱۲۵	۰/۰۰۱۲۵	۰/۰۰۱۲۵	۳/۹۷	۰/۱۰۲۷
سرعت	۱	۰/۰۰۰۸۰	۰/۰۰۰۸۰	۰/۰۰۰۸۰	۲/۵۴	۰/۱۷۱۵
خطا	۵	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۰۰۳۱		
کل	۸	۰/۰۰۸۶۲				

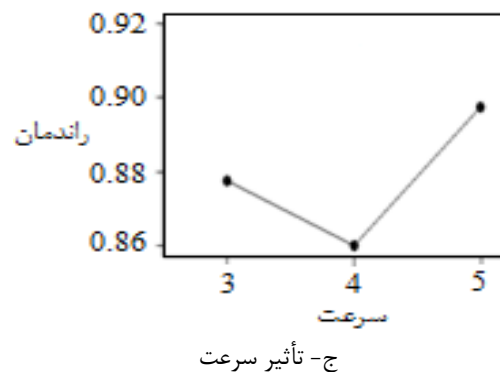
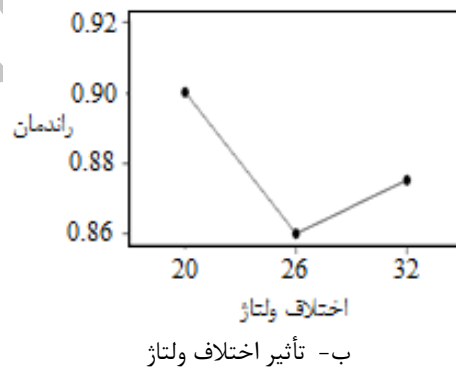
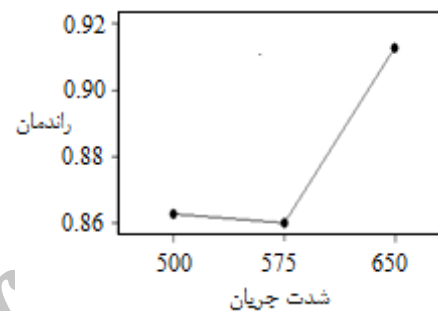
اختلاف پتانسیل در جوش کاری بالاتر رود، باز به دلیل پوشانده شدن قوس، راندمان کاهش قابل توجهی نخواهد داشت. با استفاده از رابطه (۱۱) که از درون‌یابی نتایج حاصل شده با توجه به داده‌های ورودی به دست آمده است، می‌توان راندمان را به ازای مقادیر مختلف شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوش کاری بدست آورد.

$$\begin{aligned}
 \text{Efficiency} = & 0.69277 \\
 & + 0.000333333\text{Current} \\
 & - 0.00208333\text{Voltage} \\
 & + 0.01\text{Velocity}
 \end{aligned} \quad (11)$$

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود، روش طراحی آزمایش و انجام آزمایش‌های تجربی، تأثیر پارامترهای جوش کاری زیرپودری شامل شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوش کاری بر روی راندمان قوس در فرایند جوش کاری زیرپودری مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا با انجام ۹ آزمایش تجربی و با استفاده از ساعت اندیکاتور، میزان تغییر شکل‌های زاویه‌ای اندازه‌گیری شده و سپس با مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها و نتایج شبیه‌سازی المان محدود، مقدار راندمان متناسب با شدت جریان، ولتاژ و سرعت بدست آمد. بعد از بررسی نتایج با استفاده از روش‌های آماری و آنالیز واریانس، نتایج زیر بدست آمد:

- با افزایش شدت جریان، میزان راندمان قوس فرایند جوش کاری زیرپودری افزایش مشهودی پیدا می‌کند. دلیل این امر را می‌توان ناشی از تمرکز قوس، افزایش شدت آن و هدایت مناسب ذرات مذاب به سمت منطقه جوش دانست.
- با توجه به اینکه وجود پوشش محافظ پودری در روش جوش کاری زیرپودری از اتلاف انرژی به صورت تابشی جلوگیری می‌کند، لذا اثرات طول قوس و یا به عبارت دیگر



شکل ۶ گراف‌های مربوط به اثر پارامترها

علت این امر را می‌توان ناشی از وجود پوششی از پودر دانست که اجازه اتلاف انرژی به وسیله تابش را نمی‌دهد و هر چقدر هم که طول قوس افزایش یابد و یا به عبارت دیگر



- [12] Dutta P., Joshi Y., Franche C., "Determination of gas tungsten arc welding efficiencies", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, 1994, pp. 80-89.
- [13] Akbari D., Farahani M.R., Satarifar I., "Study the temperature distribution and residual stresses in multi passes welding of dissimilar steel plates", *8<sup>th</sup> national conference on welding and inspection*, Tehran, Iran, 2006. (In Persian)
- [14] "Technical Handbook Submerged Arc Welding".
- [15] Montgomery D.C., "Design and analysis of experiments", *5<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons Publication*, 2001.
- [16] Mahapatra M.M., Datta G.L., Pradhan B., Mandal N.R., "Three-dimensional finite element analysis to predict the effect of SAW process parameters on temperature distribution and angular distortions in single-pass butt joints with top and bottom reinforcements", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, 2006, pp. 721-729.
- [17] Karaoglu S., Secgin A., "Sensitivity analysis of submerged arc welding process parameters", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 202, 2008, pp. 500-507.
- [18] Zhu X.K., Chao Y.J., "Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation", *Computers and Structures*, Vol. 80, 2002, pp. 967-976.
- [19] Nami M.R., Kadivar M.H., Jafarpour Kh., "A three-dimensional study of thick welded plates by multi-layered approach using a Vyskvplastyk Anand model", *Journal of Mechanical engineering of Terbiat Modares University*, Vol. 6, 2005, pp. 80-86. (In Persian)
- [20] Farahani M.R., Akbari D., Satarifar I., Biglari F.R., "Study the effect of geometry parameters on the welding residual stresses in butt-welded pipes", *Journal of Amirkabir University*, Vol. 68, 2007, pp. 37-46. (In Persian)
- [21] Goldak K., Chakaravarti A., Bibby M., "A new finite element model for welding heat sources", *Metallurgical Trans B*, Vol. 15B, 1984, pp. 299-305.
- [22] Brickstad B., Josefson B.L., "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, 1998, pp. 11-25.
- [23] Fenggui L., Shun Y., Songnian L., "Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool", *computational materials science*, Vol. 29, 2004, pp. 371-378.
- [24] Deng D., "FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effect", *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 359-366.

ولتاژ جوش کاری بر روی راندمان جوش کاری ناچیز است.  
- سرعت جوش کاری نیز ظاهراً تنها بر روی مقدار انرژی جوش اثر است و اثر محسوسی بر روی راندمان جوش کاری ندارد.

## ۷- مراجع

- [1] Lienert Th., Siewert Th., Babu S., Acofi V., "Welding, Brazing and Soldering", *ASM Handbook*, Vol. 6A, 1993.
- [2] Gonzalez J.J., Freton P., Masquere M., "Experimental quantification in thermal plasma medium of the heat flux transferred to an anode material", *Journal of Applied Physics*, Vol. 40, 2007, pp. 5602-5611.
- [3] Goncalves C.V., Vilarinho L.O., Scotti A., Guimaraes G., "Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 17, 2006, pp. 42-51.
- [4] Pépe N., Egerland S., Paul A., Colegrove D. Y., Leonhartsberger A., Scotti A., "Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes", *Journal of Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 16, 2011, pp. 412-417.
- [5] Marder BY J.N. Dupont A.R., "Thermal efficiency of arc welding processes", *Welding Research Supplement*, 1995, pp. 406-416.
- [6] Bag S., De A., "Probing reliability of transport phenomena based heat transfer and fluid flow analysis in autogeneous fusion welding process", *Journal of Metallurgy & Material Transaction A*, Vol. 41A, 2010, pp. 2337-2347
- [7] Giedt W.H, Tallerico L.N, Fuerschbach P.W, "GTA welding efficiency: calorimetric and temperature field measurement", *Welding Journal of Research Supplement*, 1989, pp. 28-32.
- [8] Niles R-W., Jackson C.E, "Weld thermal efficiency of the GTAW process", *Welding Journal*, Vol. 54, 1975, pp.26-32.
- [9] Saquib M., Untawale S.P., "Measuring the process efficiency of controlled welding processes", *International Journal of Instrumentation, Control and Automation (IJICA)*, Vol. 1, 2012, pp. 33-39
- [10] Farahani M.R, Satarifar I., "Study the effect of number of welding passes on the residual stresses in butt-welded plates", *2<sup>th</sup> international and 8<sup>th</sup> national conference on manufacturing engineering*, Tehran, Iran, 2006. (In Persian)
- [11] Chang P., Teng T., "Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints", *Computational Materials Science*, Vol. 29, 2004, pp. 511-522.