



## مدل سازی المان محدود و تست تجربی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به منظور مطالعه ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی

حامد پاشازاده<sup>۱\*</sup>، میلاد رستمی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۲  
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶  
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۲  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

### کلمات کلیدی:

مدل سازی المان محدود  
جوش نقطه‌ای مقاومتی  
توزیع دما  
فشار اتصال  
اندازه دکه جوش

**خلاصه:** فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی یک پروسه اتصال است که شامل فعل و انفعالات الکتریکی، حرارتی و مکانیکی می‌باشد و به همین دلیل این روش شدیداً غیرخطی بوده و مدل سازی آن دشوار است. در این مقاله، برای تجزیه و تحلیل و مدل سازی فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی، از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس استفاده شده است. به منظور افزایش دقت، خواص مواد به صورت وابسته به دما تعریف شده‌اند و تبدیل فاز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. ماده مورد استفاده فولاد آ.آ.آ. ای. ای. ای. ۱۰۰۸ می‌باشد و پارامترهای اصلی فرآیند شامل شعاع تماس، فشار تماس و توزیع دما مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین چگونگی رشد نقطه جوش در طول فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از حل عددی برای اندازه دکه جوش با نتایج حاصل از آزمون تجربی همخوانی خوبی داشته است. با استفاده از این نتایج، تنظیمات بهینه برای جریان، زمان و فشار دستگاه جوش نقطه‌ای می‌تواند در مواد مختلف برای افزایش کیفیت جوشکاری به کار رود. علاوه بر این، برای جریانی الکتریکی جریان شانتینگ (انحرافی) بر اندازه دکه جوش تأثیر می‌گذارد. برخی از آزمایشات به منظور بررسی تأثیر جریان الکتریکی، طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند.

### ۱- مقدمه

در طول مراحل فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی<sup>۱</sup>، تغییر شکل، تنش و کرنش در جوشکاری به دلیل فشار الکتریکی و گرمایش تغییر کرده و فشار و کرنش بعد از جوشکاری باقی می‌ماند. این ویژگی‌های الکتریکی، مکانیکی و حرارتی تأثیر بسزایی در خواص اتصال جوش دارند که شامل شکست و خستگی می‌شود. لذا دانستن نوع عملکرد فشار، تاریخچه‌ی دما و تغییر شکل در طول مراحل فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی امری ضروری می‌باشد. مراحل فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی پروسه‌ی پیچیده‌ای می‌باشد که در آن فعل و انفعالات برهمکنشی ما بین پدیده‌های الکتریکی، حرارتی، مکانیکی، متالورژیکی و حتی رفتار سطح روی می‌دهد. بدلیل همین پیچیدگی، گردآوری اطلاعات جامع از پروسه جوشکاری با آزمایش‌های تجربی سخت و هزینه‌بر می‌باشد. از طرف دیگر مدل‌سازی عددی می‌تواند ابزار بالقوه‌ای در مطالعه‌ی فعل و انفعالات فوق باشد.

تعدادی پژوهش در حوزه مدل‌سازی پروسه جوشکاری نقطه‌ای صورت گرفته است. ونگ و همکاران [۱] مقاومت نقطه جوش آلومینیوم را با تدوین مدل شبیه‌سازی شده کاملاً جفت شده بررسی کردند. آن‌ها ضخامت

ترکیب بین فلزی را محاسبه کردند که نقش اساسی در فشار جوش دارد. براساس تاریخچه حرارتی، سطح تماس آلومینیوم به صورت سهمی سینتیکی در حالت رشد می‌باشد. ژنگ و همکاران [۲] از مدل بهینه‌ای برای مورفولوژی الکتروژت مقاومت جوش عالی در اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم و فولاد گالوانیزه بهره برده‌اند. آن‌ها ساختار بزرگ، ساختار کوچک و ویژگی مکانیکی اتصالات جوش داده شده با الکترودهای بهینه را بررسی کردند. شین و لیون [۳] مطالعه‌ی پارامتریک جوش نقطه‌ای التراسونیک ورق‌های آلیاژ ۵۰۵۲-۵-۳ انجام دادند. آن‌ها کیفیت جوش اتصالات را براساس استحکام جوش بدست آمده با تست برش لبه و الگوی شکافت که متعاقباً به دست آمده بود، مشخص کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد الگوی شکست مخلوط برش مشخص کننده بار شکست می‌باشد. پالین و همکاران [۴] پارامترهای پروسه جوش اصطکاکی نقطه‌ای را در اتصالات نا هم‌جنس AA6181-T4 و Ti6Al4V بهینه کردند. آن‌ها متوجه شدند که سرعت چرخشی ابزار اصلی‌ترین پارامتر تأثیرگذار در مقاومت شکست، همراه با اثر متقابل زمان سکون می‌باشد. تحقیق پاراشانس کومار و همکاران [۵] پروسه انتخاب پارامتر مناسب برای نقطه جوش مقاوم با آنالیز حرارتی سی.آر.سی. آ. ورق‌های ۲ میلی‌متر می‌باشد. مارتین و

2 A5052-H3

3 Closed Rolled Closed Analing (CRCA)

1 Resistance Spot Welding (RSW)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.pashazadeh@urmia.ac.ir

نقطه جوش و آنالیزهای ساختارهای پیچیده و بزرگتر با تعداد زیادی از نقطه جوش‌های مقاومتی می‌باشد. بعلاوه پدیده انحراف جریان نیز بر اندازه ناگت جوش تاثیر می‌گذارد. بطور کلی چگالی بیش از حد جریان بر اندازه ناگت تاثیر مثبت می‌گذارد. تعداد جوش‌های موجود از قبل می‌توانند سایز ناگت جوش را در جوش‌کاری‌های بعدی با توجه به پدیده منحرف کردن تحت تاثیر قرار دهند.

در این مقاله، ابزار آنالیز المان محدود انسیس برای مدل سازی و شبیه سازی فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی استفاده شد. برای افزایش دقت، خواص مواد وابسته به دما و انتقال فاز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌است. همچنین رسانایی حرارتی<sup>۴</sup> و رسانایی الکتریکی<sup>۵</sup> وابسته به دما در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای اصلی شامل شعاع تماس، فشار اتصال، و توزیع دما بررسی شده‌اند. همچنین گسترش دکمه جوش در طول پروسه بررسی شده‌است و محاسبات عددی اندازه دکمه جوش تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. با این نتایج، تنظیمات بهینه‌ای برای جریان، زمان و فشار ماشین جوش برای مواد مختلف به دست می‌آید تا کیفیت مطلوب جوش کاری حاصل گردد.

## ۲- تئوری تحلیل

### ۲-۱- تئوری تحلیل الکتریکی

معادله اصلی برای تجزیه و تحلیل میدان الکتریکی بصورت معادله لاپلاس شامل پتانسیل الکتریکی  $\phi$ ، و  $\rho$  مقاومت ویژه می‌باشد [۱۴].

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla \phi \right) = 0 \quad (1)$$

چگالی جریان  $J$  و حرارت تولیدی  $q$  در واحد حجم به شکل زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$J = -\frac{1}{\rho} \nabla \phi$$

$$q = \frac{1}{\rho} (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) \quad (2)$$

از انجایی که مسئله متقارن محوری می‌باشد، معادله لاپلاس به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial z} \left( r \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

جای که  $r$  و  $z$  مختصات شعاعی و محوری می‌باشند. بعلاوه در معادله کلی فوق، شرایط مرزی باید تعیین شوند. شرایط مرزی برای آنالیز میدان الکتریکی پروسه مقاومت نقطه جوش به صورت زیر می‌باشد [۱۴]:  
سطح ورق/الکتروود در تماس با هوا می‌باشد.

همکاران [۶] از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی پتانسیل مقاومت اتصال جوش نقطه‌ای فولاد آستنیتی ضد زنگ آ.آ.اس.آی ۳۰ استفاده کردند. رفتار چین خوردگی<sup>۱</sup> جوش نقطه‌ای مقاومتی اتصالات با سه پارامتر جوش نقطه‌ای مقاومتی پیش‌بینی شده‌است. سادوسکی و همکاران [۷] از جوش نقطه‌ای و اتصالات چسبی استفاده کردند. تمام پروسه شکل‌گیری یکپارچه‌ی نمونه‌ها بصورت آزمایشی با استفاده از دو سیستم هم‌بستگی دیجیتال برای نشان دادن پیشرفت اثر تغییر شکل شکست نهایی بود. آن‌ها نشان دادند اولین شکست در لایه چسبی اتفاق افتاده، خیلی پایین تر از فشار حداکثری در نمونه آزمایش بوده‌است و دومین آسیب در اتصالات فعال شده در کنار نقطه جوش نزدیک به فشار حداکثری اتفاق افتاد. راتولیسون و همکاران [۸] مقاومت نقطه جوش نمونه ورق‌های فولاد پوشش داده شده با روی را با استفاده از الکتروودهای گرد بررسی کردند. آن‌ها شرایط لازم برای بالابردن دقت مقاومت نقطه جوش و مطالعه محاسباتی ورق‌های فولادی پوشش داده شده با روی با الکتروود گرد را مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [۹] به بررسی تاثیر شکل مخروطی سر الکتروود بر گرما و انتقال حجم در مقاومت نقطه جوش پرداختند. نتایج نشان دهنده‌ی تاثیر شکل مخروطی بر تغییرات وارینس کیفیت جوش، و عملکرد بهتر الکتروود بود. شکل مخروطی کوچک‌تر، شدت جریان چگالی بیشتر در لبه کناری، در نتیجه مایع سیال قوی‌تر و محل دمایی یکسان در تکه فلز جوش خورده را ایجاد کرده‌است که تاثیر مثبتی بر کیفیت جوش دارد. ونگ و همکاران [۱۰] مطالعه عددی و آزمایشی بر تاثیر جوش لیزر داشتند. آن‌ها روش منحصر بفرد جوش نقطه‌ای جامد را ارائه دادند که از امواج القا شده‌ی شوک لیزری استفاده می‌کند. پاشازاده و همکاران [۱۱] مدل سازی و بهینه‌سازی پارامترهای پروسه مقاومت جوش نقطه را با استفاده از شبکه‌های عصبی<sup>۲</sup> و الگوریتم ژنتیکی<sup>۳</sup> چند هدفی<sup>۳</sup> انجام دادند. حامدی و همکاران [۱۲] سه پارامتر مهم را در جوش بدنه‌ی اجزای ورق خودرو بهینه کردند که عبارتند از: جریان جوش، زمان جوش و فشار تفنگ. هاشمی و همکاران [۱۳] مدل مکانیکی، حرارتی، الکتریکی کوپل شده را با استفاده از آنالیز اجزای محدود ارائه کردند.

همانگونه که اشاره شد، فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی فرایندی پیچیده‌ای است که شامل فعل و انفعالات موجود مابین میدان‌های الکتریکی، حرارتی، مکانیکی، متالورژیکی، و حتی رفتارهای سطوح می‌باشد. هرچند که مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است، ولی اطلاعات کافی و دقیق در مورد فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی به دلیل پیچیدگی ذاتی آن وجود ندارد. آنالیزهای دقیق‌تری در مورد ویژگی‌های مکانیکی فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی نیاز می‌باشد. لذا هدف این پژوهش بررسی رفتار ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی در طول فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی شامل فشار، گرما، مراحل رشد

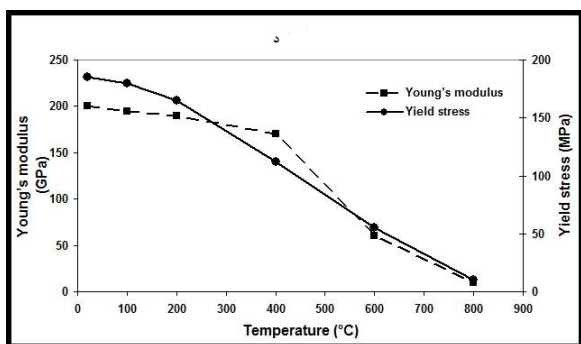
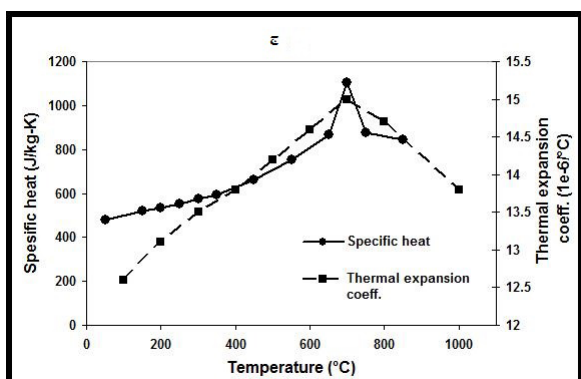
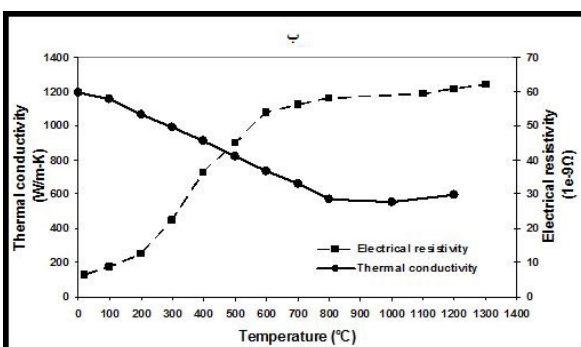
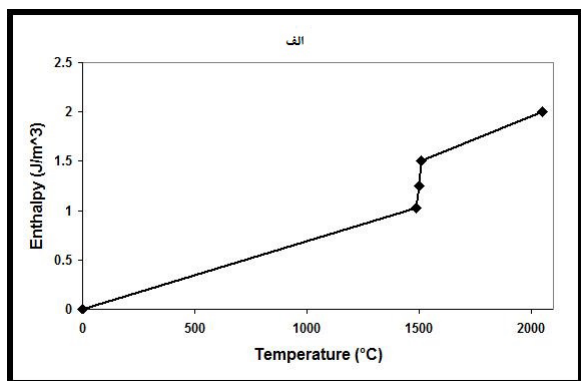
1 Pitting Corrosion Behaviour (PCB)

2 Neural Networks (NN)

3 Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)

4 Thermal Contact Conductivity (TCC)

5 Electrical Contact Conductivity (ECC)



شکل ۱: وابستگی خواص مواد آ.آ.اس. آی ۱۰۰۸، (الف) تغییرات درجه حرارت و آنتالپی با دما، (ب) تغییرات هدایت حرارتی و مقاومت الکتریکی با دما، (ج) تغییرات گرمای ویژه و ضریب انبساط حرارتی با دما، (د) تغییرات مدول الاستیک و تنش تسلیم با دما [۴]

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

بر روی سطح بالایی الکتروود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} ds = I(t) \quad (5)$$

انتگرال برای سطح مقطع الکتروودها اعمال می‌شود. سمت راست معادله نشانگر مجموع جریان جوشکاری می‌باشد.

### ۲-۲- آنالیز انتقال حرارت

در معادله کلی هدایت گذرا در سیستم دوبعدی استوانه‌ای با تبدیل داخلی، گرما به شکل زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rK \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left( rK \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{Q} \quad (6)$$

جایی که  $r$  و  $z$  مختصات شعاعی و محوری و  $\rho$ ،  $c$  و  $K$  چگالی، حرارت ویژه و رسانایی گرمایی مواد می‌باشند. خواص مواد بصورت وابسته به دما در نظر گرفته شده‌اند. عبارت به تبدیل دمای داخلی در واحد حجم اشاره دارد. این عبارت اشاره به گرمای ژول بدلیل مقاومت در صفحه الکتریکی دارد.

در حالی که مرز الکتروود در تماس با آب خنک کننده برای همسان سازی دما در نظر گرفته شده‌است، به همین دلیل شرایط مرزی در این قسمت گنجانده شده‌است و روابط حاکم به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:

$$T = T_{s1} \quad (7)$$

$$q = -K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) \quad (8)$$

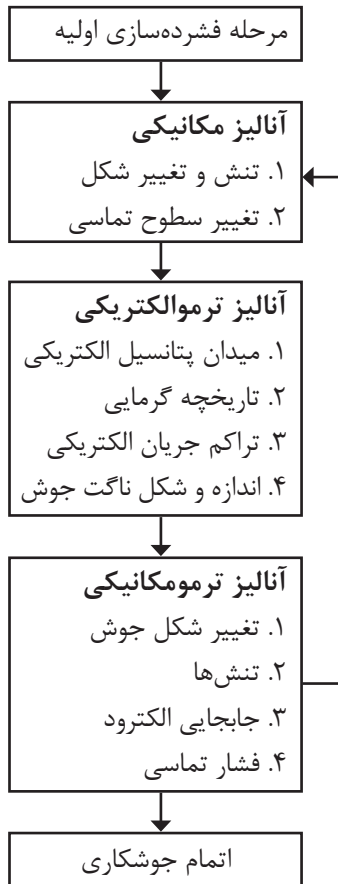
$T_0$  دمای محیط مجاور بوده و  $\alpha$  ثابت انتقال گرما می‌باشد.

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

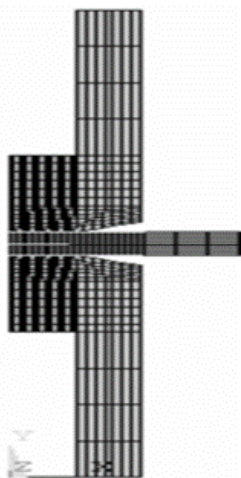
### ۳- خواص مواد و شرایط جوش

فولاد استفاده شده در این پژوهش آ.آ.اس. آی ۱۰۰۸ می‌باشد و الکتروود مسی بکار گرفته شده‌است. ضخامت ورق‌ها ۷ میلی‌متر می‌باشد. قطر بزرگ الکتروود ۱۳ میلی‌متر و قطر کوچک آن ۴/۲ میلی‌متر و زاویه سر آن ۱۵° درجه می‌باشد. برای نشان دادن دقیق فعل و انفعالات حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و متالورژیکی ایجاد شده در پروسه، مدل شامل مواد وابسته به دما و تماس حرارتی/ مکانیکی/ الکتریکی در تمامی خطوط اتصال‌ها می‌باشد [۱۶]. شکل ۱ نشان دهنده خواص مواد ورق‌های فولادی است. جدول ۱ نشان دهنده خواص مس می‌باشد. چگالی ورق فولاد  $7800 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده‌است. دمای تبدیل مایع و جامد در نظر گرفته شده برای فولاد عبارتند از ۱۵۲۱ و ۱۴۸۲ درجه سانتی‌گراد و دمای نهم آن برای تغییر فاز جامد به مایع و بالعکس  $10^5 \times 2/72$  در نظر گرفته شده‌است. ثوابت جوشکاری استفاده شده در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

این دما باید به عنوان داده ورودی برای پیش‌بینی تغییر شکل قطعات، تنش‌های حرارتی، رشد ناگت و دیگر فاکتورهای ساختار در طول جوش کاری نقطه‌ای می‌باشد. شکل ۲ نشانگر نمودار بلوکی برای اجزای محدود می‌باشد. شکل ۳ نشان دهنده مدل هندسی برای مش‌بندی می‌باشد.



شکل ۲: روش محاسباتی اجزاء محدود<sup>۱</sup> [۱۳]



شکل ۳: مدل مش‌بندی شده در نرم‌افزار انسیس

#### جدول ۱: خواص فیزیکی الکتروود مسی [۱۶]

| مقدار | پارامترهای مورد استفاده                                    |
|-------|--|
| ۳۸۳   | گرمای ویژه (J/kg-h)  |
| ۱۶/۵  | ضریب انبساط حرارتی ( $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) |
| ۳۸۶   | هدایت حرارتی (W/m-K)                                       |
| ۱۷    | مقاومت الکتریکی ( $1 \times 10^{-9} \Omega$ )              |
| ۸۹۰۰  | چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )                                  |
| ۸۳    | تنش تسلیم (MPa)  |
| ۱۲۴   | مدول یانگ (GPa)  |

#### جدول ۲: پارامترهای جوش استفاده شده در این پژوهش [۱۶]

| مقدار | پارامترهای مورد استفاده                          |
|-------|--|
| ۳۰۰   | ضریب انبساط آب ( $W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )  |
| ۲۱    | ضریب انبساط هوا ( $W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) |
| ۲۵    | دمای آب درون الکتروود ( $^\circ\text{C}$ )       |
| ۲۵    | دمای محیط ( $^\circ\text{C}$ )                   |
| ۱۵۰   | زاویه مخروطی الکتروود                            |
| ۴/۲   | قطر مقطع الکتروود (mm)                           |
| ۰/۷   | ضخامت ورق (mm)                                   |

پارامترهای جوشکاری استفاده شده در این مطالعه عبارتند از: جریان جوشکاری ۵۰ هرتز با موج سینوسی و جریان ۷/۵kA کیلوآمپر، زمان جوشکاری ۱۶ سیکل (۳۲ s)، فشار الکتروود ۲۰۰۰ نیوتن، زمان نگه داری پنج سیکل (۰/۱ s)

#### ۴- تدوین مدل عددی

بعد از آنالیز تئوری پروسه جوشکاری، مدل عددی برای حل مساله کوپلینگ استفاده شده است. کوپلینگ الکتروحرارتی مکانیکی نقطه جوش پدیده پیچیده‌ای است که براساس فاکتورهای دمایی، مکانیکی، حرارتی، متالورژیکی می‌باشد. این فاکتورها تاثیر بسزایی در شکل‌گیری ناگت (دکمه جوش) جوشکاری و شکل نهایی آن دارند. نرم‌افزار انسیس برای تحقیق انتخاب شده است [۱۷]، زیرا از فرمول‌ها و مدل‌های ریاضی بر پایه محاسبات اجزای محدود استفاده می‌کند و می‌تواند آنالیز حرارتی، و حرارتی الکتریکی را اجرا کند. رویکرد مدل کوپلینگ برگشتی اجزای محدود برای تعامل با معادلات الکتریکی، حرارتی و مکانیکی انتخاب شده است. هدف پژوهش انجام شده در این مقاله، گسترش مدل پروسه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی می‌باشد که تاکید بر اندازه ناگت (دکمه جوش) و تاریخچه حرارتی منطقه جوشکاری شده در موقعیت جوش نقطه‌ای مقاومتی را دارد.

## ۵- کار آزمایشگاهی

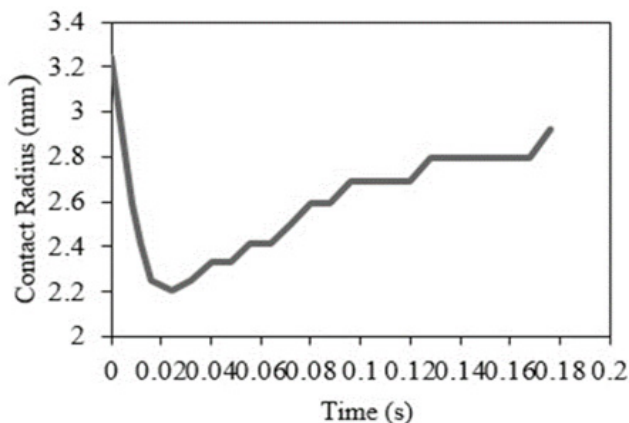
تقلیل پیدا می‌کند. تعادل بین نیروی الکتروود استفاده شده و نیروی حاصل از افزایش حرارتی ناهمگن، نشان دهنده اندازه محل اتصال می‌باشد. بعد از آن، همانگونه که دما افزایش می‌یابد قطعات شروع به صاف شدن می‌کنند و در نتیجه شعاع اتصال به تدریج تا پایان مراحل جوش کاری با سرعت کمتر ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۴: عملیات جوشکاری و اندازه‌گیری نیروی اعمالی



شکل ۵: دستگاه تست جوش به همراه تجهیزات



(الف)

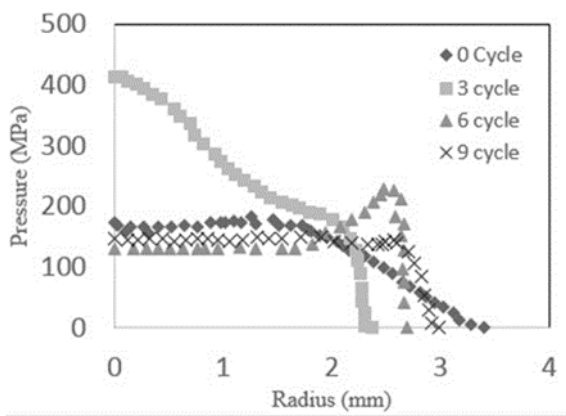
مواد استفاده شده در این آزمایش ورق فولاد تجاری آ.آ.اس. آی ۱۰۰۸ می‌باشد. نمونه‌ها به موازات مسیر نورد ورق‌ها برش داده شده‌اند. سطح ورق‌ها با استون تمیزکاری و قبل از جوشکاری شسته و خشک شده‌است. در قسمت سطحی و وسط ورق دایره‌ای کوچک برای افزایش دقت و هم راستایی سرالکتروود در طول جوشکاری به همراه فیکسچر طراحی شده ایجاد شده‌است. فیکسچر استفاده شده یک فیکسچر ساده بوده که فقط به منظور ثابت نگه داشتن قطعه کار در بین تفنگ جوش به کار می‌رود. قبل از شروع آزمایش، جریان جوش، فشار الکتروود و زمان جوشکاری تنظیم شده‌است. جریان جوشکاری ۵۰ هرتز با موج سینوسی و جریان ۷/۵ کیلوآمپر، زمان جوشکاری ۱۶ سیکل (۰/۳۲s)، فشار الکتروود ۲۰۰۰ نیوتن، زمان نگه‌داری پنج سیکل (۰/۱s) می‌باشد. بعد از انجام فرایند و تولید نمونه‌هایی با تعداد نقطه جوش‌های زیاد، ابعاد ناگت (دکمه جوش) اندازه‌گیری شده و با داده‌های عددی به دست آمده مقایسه شده‌است. نمونه‌هایی از فرایند جوش و محاسبه نیروی الکتروود در شکل ۴ و در شکل ۵ آورده شده‌است. در شکل ۵ دستگاه تست جوش به همراه تجهیزات آن نشان داده شده‌است. استفاده از این دستگاه باعث می‌شود که اختلاف بین پارامترهای تنظیمی و پارامترهای حین انجام کار به دست آید و دقت کار عملی بالا رود. این دستگاه برای اندازه‌گیری نیروی اعمالی حین فرایند جوش استفاده می‌شود که به طور کامل نیروی وارد شده با فشار اعمالی از قبل تعیین شده در الکتروود را مقایسه می‌کند و مقادیر لازم را در اختیار ما قرار می‌دهد.

## ۶- نتایج و بحث

زمانی که مدل عددی ایجاد شد، شبیه‌سازی‌ها برای بدست آوردن اطلاعات از تحلیل مکانیکی، تحلیل حرارتی الکتریکی و تحلیل مکانیکی حرارتی صورت پذیرفت. این نتایج شامل فشار اتصال، شعاع محل اتصال در خطوط اتصال الکتروود/ورق<sup>۱</sup> و ورق/ورق<sup>۲</sup>، دماهای ثبت شده در فرایند و گسترش ناگت (دکمه جوش) بود.

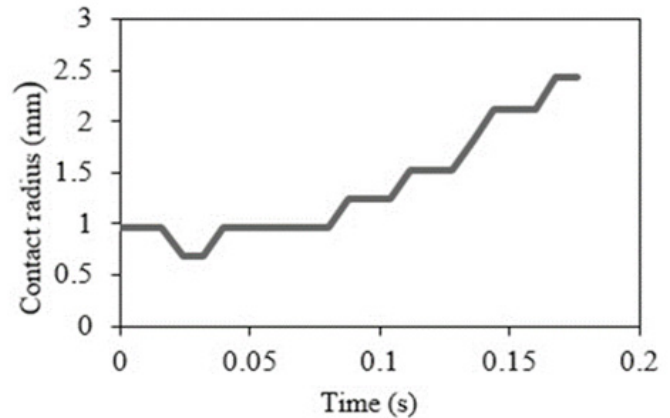
شکل ۶ نشان‌دهنده تغییرات شعاع اتصال در هر دو خطوط اتصال الکتروود/ورق و ورق/ورق می‌باشد. شعاع اتصال اولیه در خط اتصال ورق/ورق بزرگتر از شعاع سر الکتروود بوده است و علت آن وجود منطقه بزرگتر از سایز شعاع الکتروود برای اتصال نیروی الکتروود می‌باشد. بعد از زمان کوتاه حرارت‌دهی، افزایش دما در قطعات صورت گرفته‌است و در نتیجه شعاع اتصال به سرعت به کم‌ترین سایز خود

- 1 Electrode/Sheet (E/S)
- 2 Sheet/Sheet (S/S)



شکل ۷: فشار اتصال در فصل مشترک قطعه کار/ قطعه کار

شکل ۷: فشار اتصال در فصل مشترک قطعه کار/ قطعه کار



(ب)

شکل ۶: شعاع تماس مختلف در طول جوشکاری، (الف) در سطوح مشترک

قطعه کار، (ب) فصل مشترک الکتروود و قطعه کار

ماکزیمم فشار ۲۴۶ مگاپاسکال در سیکل شش و در محلی خارج از مرکز اتفاق می‌افتد. در سیکل نهایی فشارورق/ ورق ثابت مانده و بصورت ناگهانی به صفر تنزل پیدا می‌کند. مهم‌ترین نکته شکل ۷ ثابت ماندن فشار اتصال در سطح در طول عملیات جوش کاری به جز مراحل اولیه سیکل سوم می‌باشد.

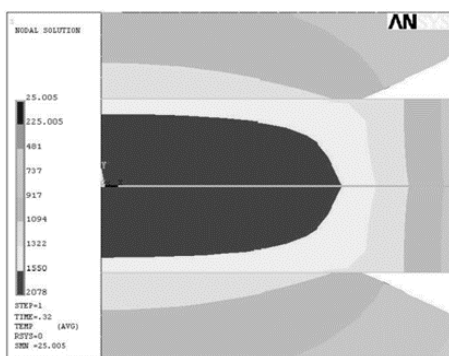
توزیع فشار اتصال در خط اتصال الکتروود/ ورق در شکل ۸ نشان داده شده‌است، که تفاوت بسیاری با فشار اتصال در سطح اتصال دارد. همانگونه که مشهود است، فشار در وسط افزایش یافته است، اما به صورت ناگهانی در کناره الکتروود کاهش می‌یابد. در طول مرحله فشار، فشار در مرکز ۱۲۵ مگاپاسکال و حداکثر فشار در کناره‌ها ۳۲۸ مگاپاسکال می‌باشد. الگوی فشار اتصال در سیکل سه کاملاً از مراحل دیگر جوش کاری، بدلیل کاهش ناهموار شعاع فشار متفاوت است. پس فشار در مرکز کاهش و در کناره‌ها به سرعت افزایش می‌یابد. بعد از چند سیکل، الگوی توزیع همانند مرحله فشار کم و یک دست در مرکز، و فشار زیاد در کناره‌ها می‌شود. فشار اتصال تا آخرین مرحله نگه‌داشتن بدین صورت ادامه پیدا می‌کند. پوشش الکتروود جوش نقطه‌ای مقاومتی در کناره‌ها می‌تواند باعث متمرکز شدن تنش شود که در توزیع فشار اتصال الکتروود/ ورق موجود است.

سیکل سه مطابق اولین دوره جوش کاری می‌باشد (بعد از به کار انداختن جریان و قبل از مرحله فشار). از آنجایی که دما به سرعت افزایش می‌یابد، مواد حول محور گسترش می‌یابند. در حالی که در لبه‌ها هنوز دما کم بوده و مواد تغییری نیافته‌اند. این پدیده باعث خم شدن ظاهری اجزا در کناره‌ها که باعث کاهش مساحت اتصال شده و نیز منجر به افزایش فشار متراکم می‌شود.

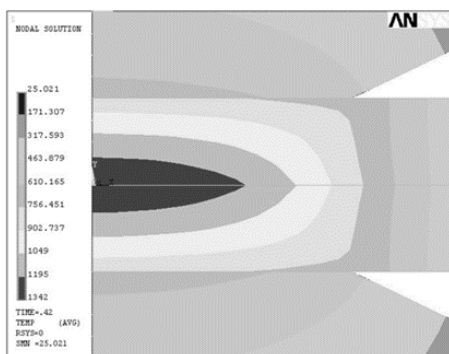
تغییرات شعاع در خط اتصال الکتروود/ ورق در شکل ب-۶ نشان داده شده‌است. کاملاً مشخص است که شعاع خط اتصال افزایش می‌یابد، به جز مراحل اولیه جریان جوش که کاهش یافته است. مقایسه شکل الف و شکل ب-۶ نشان دهنده آن است که در شرایط جوش کاری مشابه، شعاع اتصال خط اتصال ورق/ ورق از الکتروود/ ورق کوچکتر می‌باشد. اما در انتهای جوش کاری مقدار آن‌ها تقریباً یکسان است.

توزیع فشار اتصال در خط اتصال ورق/ ورق و الکتروود/ ورق از جنبه‌های مهم فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی می‌باشند. فشار اتصال در نرم افزار المان محدود شبیه‌سازی شده‌است. توزیع مقاومت اتصال الگوی چگالی جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهد، که بر موضع حرارتی با گرمایش ژول تاثیر می‌گذارد. در حالی که محل تحت تاثیر دما، رفتار مکانیکی متالورژیکی قطعات بهم جوش خورده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. توزیع فشار اتصال الکتروود/ قطعه تاثیر مهمی در پوشش الکتروود دارد.

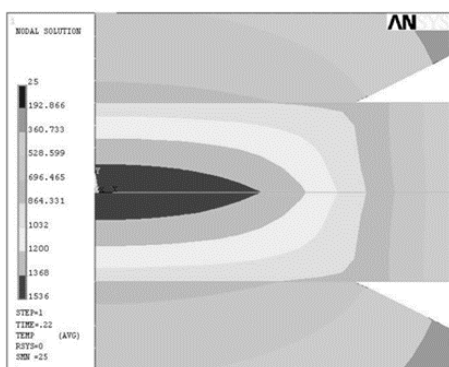
شکل ۷ نشان دهنده تغییر فشار اتصال ورق/ ورق در برابر فاصله شعاعی از مرکز جوش می‌باشد. در طول سیکل فشرده شدن (سیکل صفر)، فشار اتصال ثابت می‌ماند، اما در لبه اتصال کاهش می‌یابد. در این مرحله فشار در ناحیه میانی ۱۷۱ مگاپاسکال و در کناره ۹۷ مگاپاسکال می‌باشد. با ادامه یافتن جوش کاری، فشار در ناحیه مرکزی به سرعت افزایش پیدا می‌کند، که منجر به کاهش سریع شعاع اتصال می‌شود. در سیکل سه حداکثر فشار در ناحیه اتصال به ۴۰۰ مگاپاسکال می‌رسد. در سیکل شش فشار در کناره‌ها به سرعت افزایش یافته و حتی بیشتر از مرکز می‌شود و سپس به سرعت کاهش می‌یابد.



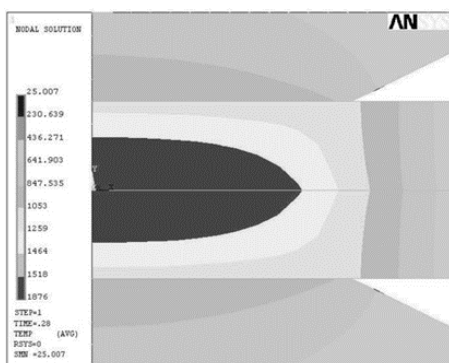
(الف)



(ب)

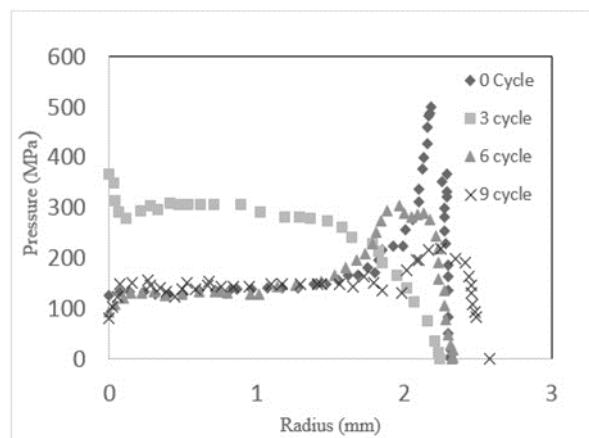


(ج)



(د)

**شکل ۹:** پروفیل درجه حرارت و رشد، (الف) توزیع دما در نازل در زمان شروع، (ب) توزیع دما در انتهای سیکل ۱۴، (ج) توزیع درجه حرارت در زمان تعویض جریان، (د) توزیع دما در انتهای شبیه‌سازی



**شکل ۸:** فشار اتصال در سطح مشترک الکتروود/قطعه کار

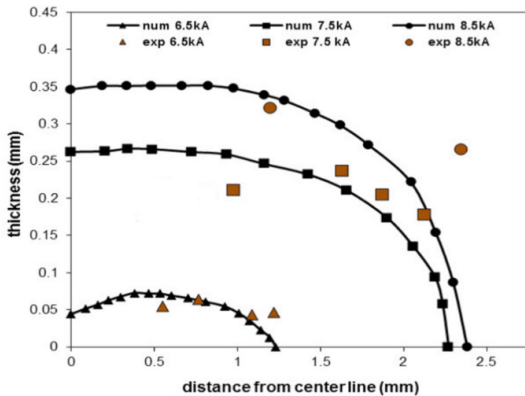
**شکل ۸:** فشار اتصال در سطح مشترک الکتروود/قطعه کار

این پدیده به دلیل افت حرارت القا شده کشیدگی نام دارد که در شکل ۶ نیز قابل مشاهده می‌باشد. این وضعیت چندین سیکل ادامه می‌یابد و با گذر زمان و ادامه فرایند توزیع یکپارچه فشار از وسط به کناره‌ها منجر به کاهش تراکم فشار می‌شود.

ناگت جوش (دکمه جوش) یکی از پارامترهای مهم برای فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی می‌باشد. شکل ۹ نشان‌دهنده توزیع دمای قطعات بهم جوش خورده در چهار مرحله متفاوت در طول فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی است. شکل ۹ نتایج نشان‌دهنده نیمه مدل بدست آمده بعد از تحلیل می‌باشد. بیشترین دما در طول مدت فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی در مرکز سطوح اتصال می‌باشد، هر چند که دمای سطح اتصال بیشتر از ورق و الکتروود می‌باشد. اگر دمای ذوب ورق آ.آ.اس. آ.آ.اس. آ.آ.اس. ۱۰۰۸ را  $1530^{\circ}\text{C}$  در نظر بگیریم، محل جوش کاری قرمز می‌باشد. شکل ناگت (دکمه جوش) بیضی بوده و با افزایش دما، ناگت شروع به رشد سریع در هردو جهت عمودی و افقی می‌کند و اندازه اصلی آن در آخر فرایند بعد از سرد شدن به دلیل تغییر شکل جوش در ناحیه جوش، فشار الکتروود و اعوجاج مواد به دست می‌آید. با در نظر گرفتن دمای  $1530^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد بعنوان نقطه ذوب فولاد آ.آ.اس. آ.آ.اس. آ.آ.اس. ۱۰۰۸ نقطه جوش رنگ قرمز به خود می‌گیرد و نشان می‌دهد که بیشترین دما همیشه در مرکز قطعه است. بیشترین دمایی که در آن ناگت جوش شروع به تغییر و فرم گرفتن می‌کند  $1536^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد بوده که در سیکل ۱۱ می‌باشد.

توزیع دمایی در شکل ۹-الف نشان داده شده است. شکل ناگت جوش شبیه بیضی مسطح بوده که با افزایش دما در جهت‌های عمودی و افقی بزرگ می‌شود. شکل ۹-ب نشان‌دهنده توزیع دما در سیکل ۱۴ می‌باشد. بیشترین دما در این مرحله  $1876^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد بوده و بیشترین دما در وسط فلز  $2078^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد که در آخرین دوره جریان اتفاق می‌افتد و در شکل ۹ نشان داده شده است.

جوشکاری زده می‌شود، جریان از یک سر الکتروود وارد شده و وقتی به پوشش نارسانایی برخورد می‌کند به دنبال نزدیک‌ترین مسیر رسانا بوده که در بالای ورق و در نوک الکتروود دیگر می‌باشد. در نتیجه آن جریان جزئی به سمت جوش قبلی کشیده می‌شود. این امر می‌تواند کاهش چشمگیری در اندازه ناگت جوش ایجاد نماید. تاثیرات انحراف جریان با افزایش فاصله بین ناگت جوش در تست سوم کاهش یافته است. شکل ۱۳ گرمای اتلافی متناسب با چگالی جریان را نشان می‌دهد.

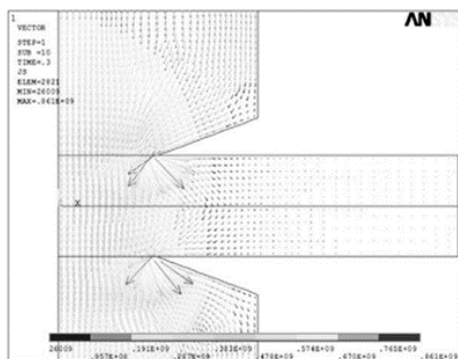


شکل ۱۰: اندازه‌گیری تجربی و محاسبات عددی سایز ناگت در جریان‌های مختلف جوشکاری

جدول ۳: داده‌های تجربی و عددی به دست آمده در اعتبار سنجی

جدول ۴: داده‌های تجربی و عددی به دست آمده در اعتبار سنجی

| جریان جوش (kA) | ضخامت جوش (mm) |       | ارتفاع جوش (mm) |       |
|----------------|----------------|-------|-----------------|-------|
|                | عددی           | تجربی | عددی            | تجربی |
| ۶/۵            | ۰/۶            | ۰/۷۵  | ۰/۰۶            | ۰/۰۷  |
| ۷/۵            | ۰/۹۵           | ۱     | ۰/۲۶            | ۰/۲۱  |
| ۸/۵            | ۱/۲۳           | ۱/۲۵  | ۰/۳۴            | ۰/۳۳  |



شکل ۱۱: شماتیکی از حرکت جریان الکتریکی (جریان ضربه‌ای در نظر گرفته نشده است).

شکل ۱۱: شماتیکی از حرکت جریان الکتریکی (جریان ضربه‌ای در نظر گرفته نشده است).

در زمان نگهداری، جریان روی صفر تنظیم می‌شود، نیروهای انتقال حرارت و فشار، تنها بارهای اضافی در مدل حرارتی گرمایی هستند و اندازه اصلی ناگت در انتهای پیروسه بعد از سرد شدن به دلیل تغییر شکل جوش در ناحیه جوش، فشار الکتروود و اعوجاج مواد به دست می‌آید. دما در انتهای مدل سازی (۰/۴۲s) در شکل ۹-۹-۱ نشان داده شده است. در حالی که نقطه ذوب فولاد آ.آ.اس. آی ۱۰۰۸ در حدود ۱۵۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، حداکثر دما در آخرین مرحله قبل از خاموش کردن جریان ۲۰۷۸ درجه سانتی‌گراد است. در حقیقت دما در طی فرایند از نقطه ذوب قطعه کار عبور می‌کند.

کیفیت جوش به اندازه ناگت بستگی دارد [۱۸]. بنابراین با تغییر شرایط مرزی دمای جوش متغیر بوده و بر کیفیت و اندازه ناگت جوش تاثیر می‌گذارد. ناگت جوش به میزان ۷۵٪ از ضخامت قطعه گسترش می‌یابد و این داده مرجع مناسبی برای فرایند می‌باشد. توزیع دما برای بدست آوردن سایز ناگت جوش بعد از جوش کاری محاسبه شده است. با در نظر گرفتن دمای ۱۵۳۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان نقطه ذوب فولاد آ.آ.اس. آی ۱۰۰۸ اندازه دکمه جوش محاسبه می‌شود. در شکل ۱۰ نتایج مدل المان محدود با داده‌های آزمایشی مقایسه شده و تطابق قابل قبول داده‌های عددی با نتایج تجربی مشاهده شده است. در جدول ۳ نتایج تجربی و عددی که برای اعتبارسنجی استفاده شده آورده شده است.

در فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی کیفیت جوش به اندازه ناگت جوش وابسته است. لذا، این پژوهش بر اساس تاثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد و شکل هندسی ناگت جوش صورت پذیرفته است. این پارامترها عبارتند از: جریان جوش، نیروی الکتروود، زمان جوش. بنابراین ابعاد ناگت جوش (دکمه جوش) در مقایسه با راهنماهای جوش نقطه‌ای مقاومتی استاندارد موجود و با استفاده از پارامترهای جوشکاری مختلف می‌تواند پیش‌بینی و محاسبه شود. سپس از پارامترهای بهینه و مطلوب برای اندازه و شکل ناگت جوش می‌توان استفاده کرد.

پدیده انحراف جریان نیز بر اندازه ناگت جوش تاثیر می‌گذارد. بطور کلی چگالی بیش از حد جریان بر اندازه ناگت تاثیر مثبت می‌گذارد. جوش‌های موجود از قبل می‌توانند سایز ناگت جوش را در جوش کاری بعدی با توجه به منحرف کردن زمانی که خیلی نزدیک به هم هستند تحت تاثیر قرار دهند. بنابراین منحنی جابجایی جریان انحرافی (شانینگ) الکتروود می‌تواند به منظور بررسی کیفیت جوش مورد توجه قرار گیرد [۱۹]. برای بررسی تاثیرات انحراف جریان، تست‌هایی شبیه‌سازی و طراحی شده است. شکل ۱۱ نشان دهنده توزیع چگالی جریان در تست اول است، در حالی که ناگت جوش در فاصله‌ای بسیار دور قرار دارد و جریان مجبور به گذر از مابین سطح اتصال نزدیک به سر الکتروود می‌باشد در نتیجه جریان در این منطقه بسیار متراکم بوده و انحرافی مشاهده نمی‌شود. تاثیرات انحراف جریان در شکل ۱۲ در تست دوم و در نزدیکی جوش‌ها نشان داده شده است. زمانی که دکمه راه‌اندازی



اما فشار در لبه اتصال کاهش می‌یابد. در این مرحله فشار در ناحیه میانی ۱۷۱ مگاپاسکال و در کناره ۹۷ مگاپاسکال می‌باشد. با ادامه فرایند، فشار در ناحیه مرکزی به سرعت افزایش پیدا می‌کند، که منجر به کاهش سریع شعاع اتصال می‌شود. این روند به همین صورت ادامه می‌یابد تا در سیکل شش، فشار در کناره‌ها به سرعت افزایش یافته و حتی بیشتر از مرکز می‌شود و سپس به سرعت کاهش می‌یابد.

• فشار اتصال در سطح اتصال در تمامی طول فرایند، به جز سیکل اولیه، ثابت است.

• توزیع فشار اتصال در فصل مشترک الکتروود/ورق نشانگر تمرکز تنش در لبه‌های الکتروود می‌باشد که باعث سایش پوشش سر الکتروود می‌شود.

• همخوانی مطلوبی مابین داده‌های محاسبه شده‌ی عددی و نتایج تجربی وجود دارد که نشانگر صحت مدل تدوین شده می‌باشد.

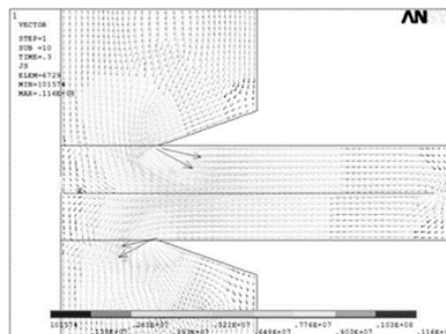
• پدیده انحراف جریان نیز بر اندازه ناگت جوش تاثیر می‌گذارد. بطور کلی چگالی بیش از حد جریان بر اندازه ناگت تاثیر مثبت می‌گذارد. جوش‌های موجود از قبل می‌توانند سایز ناگت جوش را در جوش‌کاری‌های بعدی، با توجه به پدیده انحراف جریان، تحت تاثیر قرار دهند.

• در فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی کیفیت جوش به اندازه ناگت جوش وابسته است. جریان جوش، نیروی الکتروود، زمان جوش پارامترهایی هستند که بر ابعاد ناگت تاثیر می‌گذارند، بنابراین این پارامترها باید تحت کنترل باشند.

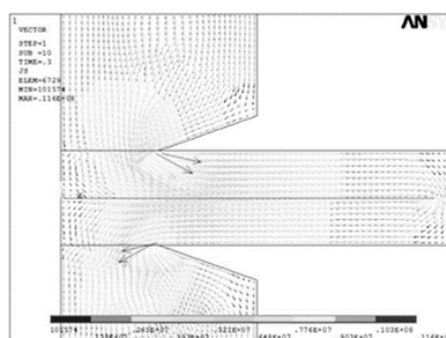
• با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات مشخص می‌شود که افزایش تعداد سیکل‌های کاری باعث افزایش درجه حرارت ناحیه تماس شده و تاثیر آن بیشتر از تاثیر زمان و نیرو بر روی اندازه حوضچه جوش است، به‌طوری‌که شکل این ناگت به صورت شبه بیضی مسطح بوده که با افزایش دما در جهت‌های عمودی و افقی بزرگ می‌شود.

## مراجع

- [1] J. Wang, H.-P. Wang, F. Lu, B.E. Carlson, D.R. Sigler, Analysis of Al-steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89 (2015) 1061-1072.
- [2] W. Zhang, D. Sun, L. Han, Y. Li, Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel, *Materials & Design*, 85 (2015) 461-470.
- [3] H.-S. Shin, M. de Leon, Parametric study in similar ultrasonic spot welding of A5052-H32 alloy sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 224 (2015) 222-232.
- [4] A. Plaine, A. Gonzalez, U. Suhuddin, J. Dos Santos, N.



شکل ۱۲: شماتیکی از حرکت جریان الکتریکی (فاصله بین دو نازل ۱۲ میلی‌متر می‌باشد).



شکل ۱۳: شماتیکی از حرکت جریان الکتریکی (جریان ضربه‌ای در نظر گرفته نشده است و فاصله بین دو نازل ۱۷ میلی‌متر می‌باشد).

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از نرم افزار المان محدود انسیس برای مدل‌سازی دو بعدی جهت بررسی پارامترهای اصلی فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی استفاده شده‌است. ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی در طول فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی شامل فشار، گرما، مراحل رشد نقطه جوش و همچنین شعاع محل اتصال، فشار اتصال، توزیع دما و تغییر شکل الکتروود به طور کامل بررسی شده‌اند. همچنین گسترش ناگت جوش در طول فرایند، بررسی و مطابقت خوبی بین نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از آزمون تجربی مشاهده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که:

- شعاع اولیه اتصال در سطح اتصال، بزرگتر از شعاع سر الکتروود بوده‌است، اما بعد از مدت کوتاهی حرارت‌دهی، شعاع اتصال به سرعت کاهش یافته و به کم‌ترین اندازه‌ی خود می‌رسد، و سپس تا آخر فرایند به بزرگ‌تر شدن خود با سرعت به مراتب پایین‌تر ادامه می‌دهد.
- در طول سیکل فشرده شدن (سیکل صفر)، فشار اتصال ثابت می‌ماند،

- [11] H. Pashazadeh, Y. Gheisari, M. Hamed, Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(3) (2016) 549-559.
- [12] M. Hamed, M. Shariatpanahi, A. Mansourzadeh, Optimizing spot welding parameters in a sheet metal assembly by neural networks and genetic algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(7) (2007) 1175-1184.
- [13] R. Hashemi, H. Pashazadeh, M. Hamed, An incrementally coupled thermo-electro-mechanical model for resistance spot welding, *Materials and Manufacturing Processes*, 27(12) (2012) 1442-1449.
- [14] M. Fatehi, M. Kaviani, Adiabatic reverse combustion in a packed bed, *Combustion and Flame*, 99(1) (1994) 1-17.
- [15] A. Kraus, A. Bar-Cohen, *Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment*, McGraw-Hill, New York, 1983, p. 35.
- [16] A.H. Volume, 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM international, (1990) 889-896.
- [17] ANSYS. <http://www.ansys.com>.
- [18] R.W. Manual, the Resistance Welder Manufacturers' Association, *Caps*, 1(2) (1946) 7.
- [19] B. Xing, Y. Xiao, Q.H. Qin, Characteristics of shunting effect in resistance spot welding in mild steel based on electrode displacement, *Measurement*, 115 (2018) 233-242.
- Alcântara, The optimization of friction spot welding process parameters in AA6181-T4 and Ti6Al4V dissimilar joints, *Materials & Design*, 83 (2015) 36-41.
- [5] V. Prashanthkumar, N. Venkataram, N. Mahesh, Process Parameter Selection for Resistance Spot Welding through Thermal Analysis of 2mm CRCA Sheets, *Procedia Materials Science*, 5 (2014) 369-378.
- [6] Ó. Martín, P. De Tiedra, M. López, Artificial neural networks for pitting potential prediction of resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel, *Corrosion Science*, 52(7) (2010) 2397-2402.
- [7] T. Sadowski, P. Golewski, M. Kneć, Experimental investigation and numerical modelling of spot welding–adhesive joints response, *Composite structures*, 112 (2014) 66-77.
- [8] R. Raelison, A. Fuentes, C. Pouvreau, P. Rogeon, P. Carre, F. Dechalotte, Modeling and numerical simulation of the resistance spot welding of zinc coated steel sheets using rounded tip electrode: Analysis of required conditions, *Applied Mathematical Modelling*, 38(9) (2014) 2505-2521.
- [9] Y. Li, Z. Wei, Y. Li, Q. Shen, Z. Lin, Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65 (2013) 400-408.
- [10] X. Wang, Y. Gu, T. Qiu, Y. Ma, D. Zhang, H. Liu, An experimental and numerical study of laser impact spot welding, *Materials & Design* (1980-2015), 65 (2015) 1143-1152.