

# مطالعه پارامتری فرآیند جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی در نمونه‌هایی از جنس AISI 1008 با روش اجزای محدود

عباس فدائی\*  
عطا خباز اقدم

استادیار، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشکده مهندسی  
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشکده مهندسی

## چکیده

در تحقیق حاضر با مطالعه پارامتری به روش اجزای محدود در ورق های نازک با جوش نقطه‌ای مقاومتی از جنس فولاد AISI 1008، اثرات تغییر کمیت‌های مختلف بر اندازه و شکل دکمه جوش نشان داده شده‌اند. صحت سنجی قسمتی از نتایج تحلیل اجزای محدود با مطالعه تجربی و قسمتی دیگر به صورت مقایسه با پژوهش های منتشر شده انجام گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که شدت جریان الکتریکی مهمترین کمیت در نحوه تشکیل دکمه جوش می باشد. همچنین افزایش قطر الکتروود یا ضخامت ورق باعث افزایش ناحیه متأثر از گرما می شود، لذا مدت زمان و یا شدت جریان بیشتری برای جوشکاری لازم خواهد بود. به علاوه کاهش جریان و زمان جوشکاری باعث کوچک شدن دکمه جوش و بالا رفتن گرادیان دمایی در ناحیه متأثر از گرما شده و در نتیجه تنش های پسماند کششی را در این ناحیه افزایش می دهد.

واژه‌های کلیدی: مطالعه پارامتری، جوشکاری نقطه ای مقاومتی، شکل دکمه جوش، اندازه دکمه جوش، روش اجزای محدود.

## Parametric Study of Resistance Spot Welding Process in the AISI 1008 Weldments Using Finite Element Method

A. Fadaei Assistant Professor, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Engineering Faculty  
A. Khabaz Agdam M.Sc., Student, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Engineering Faculty

## Abstract

In the present research, the effects of the shape and size nugget variations in the AISI 1008 resistance spot weldment were showed by the parametric study using the finite element method. The verification of some of the finite element results was done by comparison with the experimental study results and other was compared with the published researchs. The results show that the electrical current is the most important parameter in the formation of the nugget. The heat affected zone was grown by increasing the electrode diameter and the sheet thickness; as a result the time and the electrical current should be increased for welding. In addition, the nugget size was reduced and the temperature gradient in the heat affected zone was raised by decreasing the electrical current and the welding time, as a result the tension residual stresses in the heat affected zone were increased.

**Keywords:** Parametric study, Resistance spot welding, Nugget shape, Nugget size, Finite element method.

## ۱- مقدمه

جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی روشی موثر برای اتصال دو یا چند ورق نازک به یکدیگر می‌باشد که به دلیل گرمایی ایجاد شده با عبور جریان الکتریکی از قطعات، توام با فشار اعمال شده توسط الکترودها انجام می‌گیرد. این روش نسبت به سایر روش‌های جوش کاری سریع‌تر و آسان‌تر بوده و از قابلیت اتوماسیون برخوردار است. از جوش کاری مقاومتی در صنایع خودروسازی برای اتصال قطعات شاسی و بدنه خودرو که از ورق‌های نازک ساخته شده‌اند، استفاده می‌شود.

جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی، یک فرآیند پیچیده از تاثیر متقابل میدان‌های الکتریکی، گرمایی و مکانیکی است، که مطالعه آن حتی با استفاده از روش اجزای محدود نیز کاری دشوار می‌باشد. کمیت‌های متعددی حاصل از اثر این میدان‌ها بر این فرآیند اثر می‌گذارند. در زمینه مطالعه پارامتری جوش کاری نقطه‌ای پژوهش‌های نسبتاً محدودی انجام گرفته‌اند، که به اهم آنها ظرف ده سال اخیر اشاره می‌شود. دنگ و همکارانش [۱] رفتار مکانیکی دو ورق ناودانی شکل که با جوش نقطه‌ای به یکدیگر متصل شده و تحت تأثیر شرایط بارگذاری کششی - برشی قرار دارند را بررسی کردند. آنها اثر ضخامت ورق‌ها و قطر دکمه جوش بر میدان تنش در جوش نقطه‌ای و نیز اثر آن بر عملکرد ساختاری قطعات جوش کاری شده تحت حالات گسیختگی استاتیکی را با استفاده از تحلیل سه بعدی اجزای محدود استخراج کردند. فولواچ و همکارانش [۲] شرایط تماس الکتریکی - گرمایی در جوش مقاومتی را با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار داده و نتایجی برای اندازه ناحیه متأثر از گرما و شکل دکمه جوش استخراج کردند. ژینگ و همکارانش [۳] با ارائه یک مدل دو بعدی تقارن محوری رفتار مکانیکی و گرمایی فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی را با استفاده از نرم افزار Ansys تحلیل کردند. استخراج توزیع فشار در سطوح تماس ورق - ورق و ورق - الکتروده، توزیع تنش و کرنش در قطعه جوش کاری شده و تغییر شکل ورق و الکتروده در طی جوش کاری از نتایج کار این محققین بودند. ژینگ و همکارانش [۴] با ارائه یک مدل دوبعدی تقارن محوری به صورت تحلیل اجزای محدود گرمایی - الاستیک - پلاستیک، رفتار مکانیکی جوش نقطه‌ای مقاومتی را بررسی کردند. در تحلیل ارائه شده خواص ماده وابسته به دما در نظر گرفته شدند. آنها توزیع تنش و کرنش در قطعات جوش کاری شده و تغییرات آن در طی فرآیند را تعیین کردند. عیسی زاده و همکارانش [۵] با شبیه سازی اجزای محدود، اثر کمیت‌های مختلف مثل زمان جوش کاری را بر شکل و اندازه دکمه جوش که در رفتار خستگی جوش حائز اهمیت زیادی است، بررسی کردند. آنها نتایج تحلیل عددی را با مطالعات

تجربی منتشر شده مقایسه و انطباق خوبی بین آنها نشان دادند. لی و همکارانش [۶] برای ویژگی‌های گرمایی در جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی سه ورق، یک تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار Ansys ارائه دادند. تشکیل دکمه جوش و اثر شرایط تماس بر اندازه و شکل آن از نتایج تحلیل ارائه شده بودند. دانسته و همکارانش [۷] با ارائه مدل اجزای محدود برای شبیه سازی جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی در قطعه‌ای فولادی، شرایط شکست جوش را مطالعه کردند. در این پژوهش با بررسی رفتار مکانیکی اتصال و با ارزیابی انتگرال  $\dot{J}$  در شکاف بین دو ورق در محل دکمه جوش، شکست نیمه‌ترد و نرم در دکمه جوش مطالعه شد.

در تحقیق حاضر با مطالعه پارامتریک به روش اجزای محدود در ورق‌های نازک با جوش نقطه‌ای مقاومتی از جنس فولاد AISI 1008، اثرات تغییر کمیت‌های مختلف بر اندازه و شکل دکمه جوش نشان داده شده‌اند.

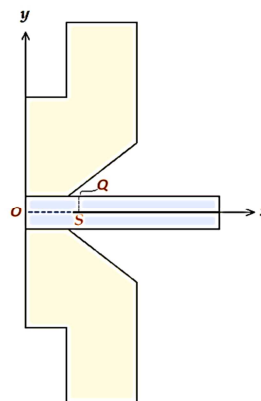
## ۲- مدل سازی اجزای محدود

در مدل سازی فرآیند جوش کاری مقاومتی، جریان الکتریکی باعث ایجاد گرما شده و گرمایی موجب تغییرات متالورژیکی می‌شود که آن هم به نوبه خود بر حوزه‌های گرمایی و مکانیکی تأثیر می‌گذارد. همچنین حوزه‌های گرمایی و مکانیکی نیز خود بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. برای انجام تحلیل عددی پیچیده‌ای مانند جوش کاری مقاومتی که دارای طبیعت غیرخطی و سیستم‌های کوپل شده می‌باشد، باید روش تحلیل و زیربرنامه‌های جدیدی در نظر گرفته شوند تا تحلیل این فرآیند به صورت اتوماتیک یا دستی قابل انجام باشد. یکی از روش‌های ممکن آن است که از زیربرنامه‌هایی برای ارتباط بخش‌های مختلف نرم‌افزار و انتقال مشخصه‌های کلیدی از یکی به دیگری به صورت متغییر در فواصل زمانی خاص استفاده شود.

در این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود، نسخه ۱۲ برای شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری مقاومتی استفاده شده است. تحلیل‌های میدان الکتریکی - گرمایی و گرمایی - مکانیکی توسط زبان برنامه نویسی APDL به یکدیگر مرتبط شده و مسئله به صورت غیرمستقیم حل گردیده است. تمام مراحل فرآیند جوش کاری مقاومتی تا مرحله خنک‌شدن قطعه کار تا دمای محیط به صورت کامل و در دو حوزه انتقال گرما و تحلیل تنش شبیه‌سازی شده است.

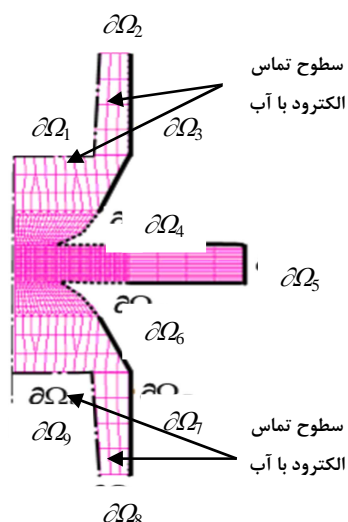
که  $\varphi$  پتانسیل الکتریکی،  $\mu$  رسانایی الکتریکی یا عکس مقاومت الکتریکی،  $r$  فاصله شعاعی از مرکز دکمه جوش و  $Z$  موقعیت در راستای عمود بر دکمه جوش را نشان می‌دهند. در جوش مقاومتی نقطه‌ای دو نوع شرایط مرزی الکتریکی وجود دارد:

الف- پتانسیل الکتریکی روی سطح پایینی الکتروود زیرین، یعنی مرز  $\partial\Omega_8$  در شکل ۳ صفر است.  
ب- گرادیان پتانسیل الکتریکی در سطوح در تماس با هوا و آب، یعنی مرزها  $\partial\Omega_1, \partial\Omega_3, \partial\Omega_4, \partial\Omega_6, \partial\Omega_7$  و  $\partial\Omega_9$  در شکل (۳) صفر هستند [۱۰].



شکل ۱- مدل تقارن محوری الکتروود و ورق

خواص مکانیکی، الکتریکی و گرمایی ورق فولادی از جنس AISI 1008 و الکتروود مسی به شدت وابسته به دما بوده و طبق استاندارد ASM [۸] و ISO5821 [۹] انتخاب و در مدل‌سازی اجزای محدود وارد شده‌اند. مدل مورد نظر برای شبیه‌سازی فرآیند جوش مقاومتی نقطه‌ای شامل دو الکتروود و دو ورق است. شکل هندسی، بارگذاری‌ها و شرایط مرزی نسبت به محور عمودی متقارن هستند، لذا برای شبیه‌سازی از شرایط تقارن محوری استفاده شده‌است. مدل تقارن محوری در شکل ۱ نشان داده شده‌است. در این تحقیق از الکتروود نوع B به قطر ۶ میلیمتر با نوک تخت بر اساس استاندارد ISO5821 استفاده شده‌است. شکل ۲ نحوه شبکه‌بندی الکتروودها و ورق را نشان می‌دهد. در ناحیه تماسی که تحت تمرکز تنش و گرما می‌باشد از شبکه‌بندی ریزتری نسبت به بقیه نواحی استفاده شد.



شکل ۳- مرزهای مدل [۱۰]

## ۲-۲- تحلیل گرمایی

برای بدست آوردن توزیع دما در مدل هندسی باید معادله گرمایی گذرا به صورت هم‌زمان با معادله اختلاف پتانسیل لاپلاس معادله (۱) حل شود:

$$k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

که  $q_v$  آهنگ گرمایی تولید شده به ازای واحد حجم،  $\rho$  و  $C$  به ترتیب چگالی و گرمایی ویژه هستند.

شرایط مرزی گرمایی به قرار زیر هستند:

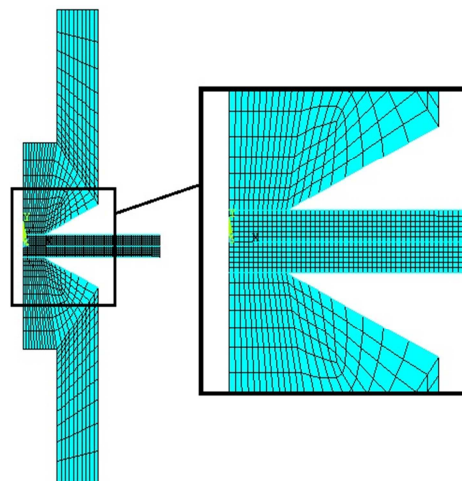
الف- جدار داخلی الکتروود در تماس با آب به ضریب جابجایی  $h_w$  و دمای  $T_w$  قرار دارند و مقدار انتقال گرما به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_w = h_w (T_{BC1} - T_w) \quad (3)$$

که  $T_{BC1}$  دمای مرزهای  $\partial\Omega_1$  و  $\partial\Omega_9$  در شکل ۳ هستند.

ب- مقدار انتقال گرما از الکتروودها و ورق‌ها در تماس با هوا به ضریب جابجایی  $h_a$  و دمای  $T_a$  برابر است با:

$$q_a = h_a (T_{BC2} - T_a) \quad (4)$$

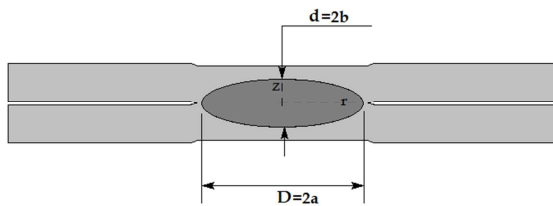


شکل ۲- شبکه‌بندی در مدل هندسی

## ۲-۱- تحلیل الکتریکی

پتانسیل الکتریکی باید در معادله لاپلاس که بیان کننده حالت پایدار الکتریکی است صدق کند:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (1)$$



شکل ۴- سطح مقطع بیضوی شکل دکمه جوش

که  $T_{BC2}$  دمای مرزهای  $\partial\Omega_3, \partial\Omega_4, \partial\Omega_6$  و  $\partial\Omega_7$  در شکل ۳ است.

پ- در سطوح تماسی بین ورق‌ها نیز فرض می‌شود که گرمایی ایجادشده توسط معادله ژول در یکی از سطوح، توسط شار گرمایی به سطح دیگر انتقال می‌یابد. شرایط محیطی در فرآیند جوش کاری مقاومتی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- شرایط محیطی جوش کاری [۴]

دمای محیط (هوا)	$25^{\circ}C$
ضریب جابجایی هوا	$21 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}C$
دمای آب	$25^{\circ}C$
ضریب جابجایی آب	$300 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}C$

### ۲-۲- تحلیل مکانیکی

معادلات حاکم بر تغییر شکل از تابع نما انرژی پتانسیل به صورت زیر، استخراج می‌شوند:

$$\Pi = \iiint \sigma \varepsilon dV - \iint FvdS \quad (5)$$

که در آن  $\Pi$  تابع‌نمای انرژی پتانسیل،  $V$  جابجایی کلی،  $\varepsilon$  تانسور کرنش و  $\sigma$  تانسور تنش هستند. در معادله (۵) جمله اول سمت راست معادله انرژی پتانسیل ناشی از تغییر شکل و جمله دوم مربوط به شرایط مرزی مرتبط با نیروهای سطحی می‌باشند.

شرایط مرزی مکانیکی شامل اعمال نیرو بر روی گره‌های الکتروود فوقانی  $F_i = F_0$  در مرز  $\partial\Omega_2$  در شکل ۳، و مقید کردن جابجایی در راستای  $z$ ، برای گره‌های الکتروود زیرین یعنی مرز  $\partial\Omega_8$  در شکل ۳ هستند.

### ۳- نتایج تحلیل الکتریکی - گرمایی

شکل و هندسه دکمه جوش مهم‌ترین خروجی تحلیل الکتریکی- گرمایی است. با توجه به شکل بیضوی دکمه جوش، دو مشخصه ابعادی شامل قطر دکمه جوش  $D=2a$  و عمق نفوذ  $d=2b$  برای توصیف شکل دکمه جوش استفاده شدند. شکل ۴ هندسه دکمه جوش را نشان می‌دهد. ناحیه دکمه جوش در واقع همان ناحیه‌ای است که دما در آنجا به دمای ذوب فولاد یعنی حدود  $1530^{\circ}C$  درجه سانتیگراد رسیده و سپس سرد و به دمای محیط برگشته است.

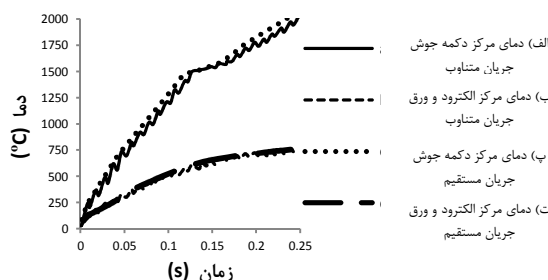
با توجه به وجود کمیت‌های متعدد و اثر متقابل آنها بر یکدیگر، برای تعیین رابطه مناسب بین این کمیت‌ها، آنها دو به دو به صورت زیر با هم مقایسه شدند:

- ۱- ابتدا نحوه تشکیل دکمه جوش برحسب تغییرات شدت جریان و با گذشت زمان بررسی گردید، در حالی که بقیه کمیت‌های موثر ثابت در نظر گرفته شدند.
- ۲- در مرحله بعد با تغییر قطر الکتروود، نحوه پیدایش و رشد دکمه جوش بررسی شد. در این مرحله نیز شدت جریان و فشار الکتروود ثابت فرض شدند.
- ۳- دو تحلیل فوق‌الذکر برای ورق‌هایی با ضخامت‌های ۱، ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر انجام گرفت، که جزء پرکاربردترین ورق‌ها هستند. مقایسه بین این ضخامت‌ها جهت بررسی شرایط جوش کاری در ضخامت‌های مختلف انجام گرفت.

### ۳-۱- اثر زمان

بر اساس معادله ژول، رابطه زمان با میزان گرمای تولید شده خطی است. با افزایش گرما، میزان دما افزایش یافته و دکمه جوش رشد می‌کند. در ادامه، نحوه تشکیل دکمه جوش نسبت به زمان، در جریان‌ها و قطرهای مختلف الکتروود با تغییر دما بررسی می‌شوند. در شکل ۵ نحوه تشکیل دکمه جوش در شرایطی که قطر الکتروود ۶ میلی‌متر، ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، شدت جریان ۹۵۰۰ آمپر و نیروی الکتروود ۲۵۰۰ نیوتن می‌باشند، طی جوش کاری نشان داده شده است. شکل ۶ تغییرات دما در راستای شعاعی، مسیر OS در شکل ۱، نسبت به مرکز دکمه جوش، در طی سیکل‌های ۸ تا ۱۲ (زمان هر سیکل ۰٫۰۲ ثانیه) را نشان می‌دهد. با استفاده از این شکل، شعاع دکمه جوش در سیکل‌های زمانی مختلف تعیین می‌شود. دمای ذوب ورق حدود  $1530^{\circ}C$  سانتیگراد فرض شده است، لذا به عنوان مثال شعاع دکمه جوش در سیکل ۱۲ ام تقریباً  $2.29$  میلی‌متر می‌باشد.

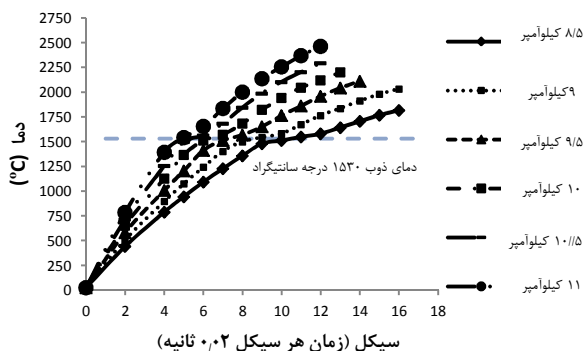
روش ریشه دوم میانگین مجذورات با تقریب مناسبی برای شبیه‌سازی جریان متناوب در تحلیل اجزای محدود می‌توان استفاده کرد.



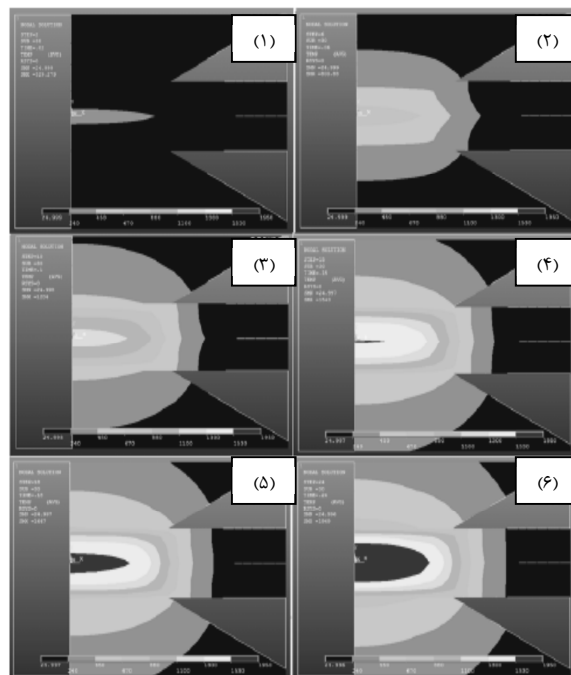
شکل ۷- نحوه افزایش دما در دو نقطه از مدل به ازای جریان‌های مستقیم و متناوب - الف و پ دمای مرکز دکمه جوش - ب و ت مرکز ناحیه تماس الکتروود و ورق

### ۲-۲-۳- اثر مقدار جریان الکتریکی

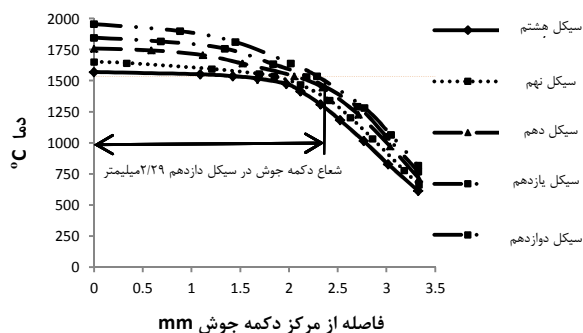
برای مشاهده اثر تغییر مقدار جریان بر نحوه تشکیل دکمه جوش از الکتروود با قطر ۶ میلی‌متر و ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. جریان نیز از ۸٫۵ تا ۱۱ کیلوآمپر و با گام ۰٫۵ کیلوآمپر تغییر داده شده است. با این شرایط، شکل ۸ نحوه افزایش دمای مرکز دکمه جوش را نشان می‌دهد. در ابتدا دمای ورق‌ها همان دمای محیط است که برابر با ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. با اعمال جریان الکتریکی، در تمام نمودارها، دمای مرکز تماس ورق- ورق به سرعت افزایش می‌یابد. دما در آغاز جوش کاری با سرعت زیاد افزایش پیدا کرده ولی در دمای نزدیک به دمای ذوب ورق فولادی (۱۵۳۰ درجه سانتیگراد) به دلیل شروع ذوب، دما برای مدت زمان کوتاهی طی فرایند ذوب ثابت مانده و با اتمام ذوب دوباره شروع به افزایش می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت افزایش دمای مرکز دکمه جوش برای شدت جریان‌های بالا بیشتر است. به عنوان نمونه جوانه زدن دکمه جوش در جریان‌های ۹ و ۱۱ کیلو آمپر به ترتیب در سیکل‌های ۶ ام و ۱۱ ام رخ می‌دهد.



شکل ۸- نحوه افزایش دمای مرکز دکمه جوش در جریان‌های مختلف



شکل ۵- نحوه تشکیل دکمه جوش



شکل ۶- تغییرات دما در راستای شعاعی از مرکز دکمه جوش در طی سیکل‌های زمانی ۸ تا ۱۲

### ۲-۳- اثر جریان الکتریکی

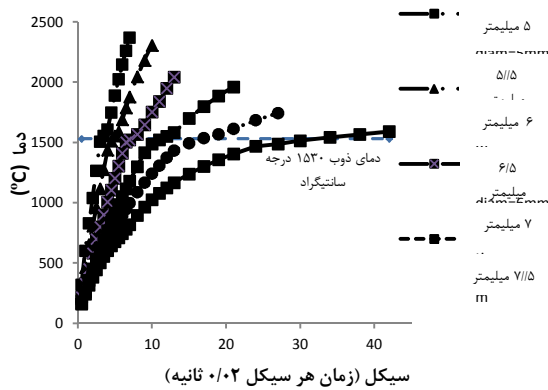
در تحقیق حاضر اثر جریان در دو بخش بررسی شده است. در ابتدا اثر نوع جریان شامل متناوب و مستقیم، و سپس مقدار جریان جستجو شده‌اند.

#### ۱-۲-۳- اثر نوع جریان الکتریکی

در شکل ۷ نحوه افزایش دما در مرکز دکمه جوش و مرکز تماس الکتروود - ورق برای جریان متناوب با دامنه ۱۳/۴۴ کیلوآمپر و فرکانس ۵۰ هرتز، که با استفاده از روش ریشه دوم میانگین مجذورات، معادل جریان مستقیم با مقدار ۹٫۵ کیلوآمپر است با هم مقایسه شده‌اند. کمیت‌های موثر جوش کاری نیز برای این شبیه‌سازی، ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، قطر الکتروود ۶ میلی‌متر و نیروی فشاری موثر بر الکتروود ۲٫۵ کیلو نیوتن می‌باشند. مشاهده می‌شود که از معادل‌سازی به

### ۳-۳- اثر قطر نوک الکتروود

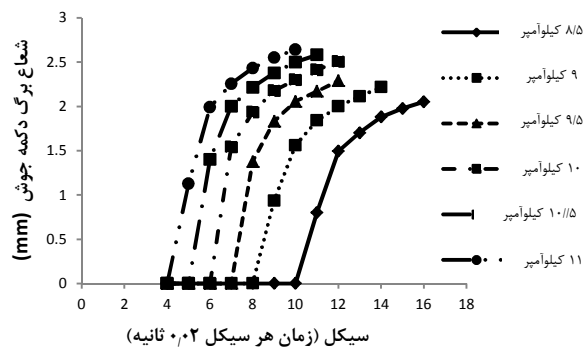
با افزایش قطر نوک الکتروود میزان شعاع در سطح تماسی بین الکتروود و ورق‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه تغییرات چشم‌گیری در شکل دکمه جوش و مدت زمان لازم برای ایجاد اتصال مطلوب رخ می‌دهد. کمیت حداکثر دما، یعنی دمای مرکز دکمه جوش یک کمیت مناسب برای درک بهتر شرایط تشکیل دکمه جوش در حین جوش کاری است. به این دلیل شکل ۱۱ دمای مرکز دکمه جوش برای یک قطر نوک الکتروود مشخص و در طی سیکل جوش کاری را نشان می‌دهد. برای انجام یک مقایسه مناسب بقیه کمیت‌ها شامل ضخامت ورق (۱ میلی‌متر)، مقدار و نحوه اعمال جریان الکتریکی (جریان مستقیم با شدت ۹۵۰۰ آمپر) ثابت فرض شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر نوک الکتروود تشکیل دکمه جوش به تأخیر می‌افتد. دلیل این امر افزایش شعاع ناحیه تماس بین دو ورق با افزایش قطر الکتروود بوده که در نتیجه گرمای تولید شده در سطح وسیع‌تری پخش خواهد شد، لذا آهنگ افزایش دما با افزایش قطر الکتروود کندتر می‌شود.



شکل ۱۱- تغییرات دمای مرکز دکمه جوش نسبت به زمان در قطرهای مختلف برای نوک الکتروودها

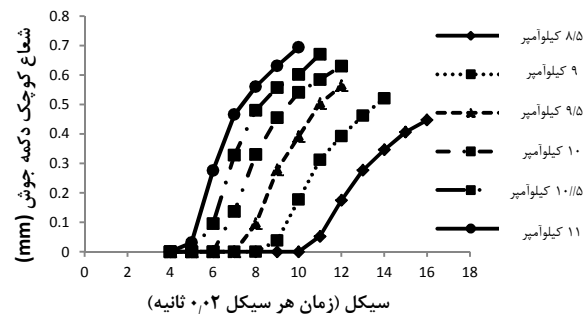
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تغییرات شعاع بزرگ و کوچک بیضی‌گون دکمه جوش برحسب قطرهای مختلف برای نوک الکتروود را نشان می‌دهند. از این دو شکل می‌توان استنباط کرد که در قطرهای کوچک نوک الکتروود، دکمه جوش سریع‌تر تشکیل می‌شود، یا به عبارت دیگر آهنگ افزایش دما در قطرهای کوچک نوک الکتروود بیشتر است.

شکل ۹ نحوه تغییرات اندازه شعاع بزرگ بیضی‌گون دکمه جوش را طی زمان جوش کاری نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش جریان الکتریکی، دکمه جوش سریع‌تر تشکیل می‌گردد. همچنین شعاع بزرگ بیضی‌گون دکمه جوش در ابتدا با سرعت بیشتری رشد می‌کند و بعد آهنگ رشد آن کاهش می‌یابد. دلیل این امر به مقاومت الکتریکی در ورق‌ها بر می‌گردد. این مقاومت‌ها شامل مقاومت الکتریکی خود ورق‌ها و مقاومت الکتریکی تماسی بین آنها می‌باشند. در ابتدای سیکل جوش کاری مقدار مقاومت الکتریکی تماسی خیلی بیشتر است، لذا دکمه جوش به سرعت در راستای شعاعی رشد می‌کند. اما بعد از آنکه دو ورق به هم جوش خورده و با هم آمیخته می‌شوند، این کمیت صفر شده و رشد دکمه جوش فقط به دلیل مقاومت الکتریکی خود ورق‌ها خواهد بود.

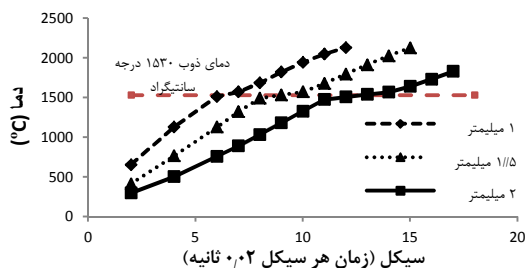


شکل ۹- تغییرات شعاع بزرگ بیضی‌گون دکمه جوش در شدت جریان‌های مختلف

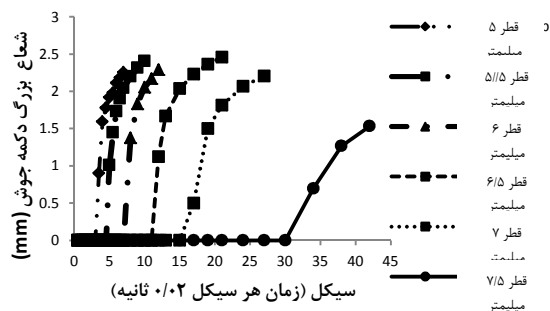
شکل ۱۰ نحوه تغییرات اندازه شعاع کوچک بیضی‌گون دکمه جوش یا همان ارتفاع دکمه جوش را طی زمان جوش کاری در شدت جریان‌های مختلف نشان می‌دهد. بر خلاف شکل ۹ آهنگ رشد دکمه جوش به ازاء هر شدت جریان در تقریباً ثابت است.



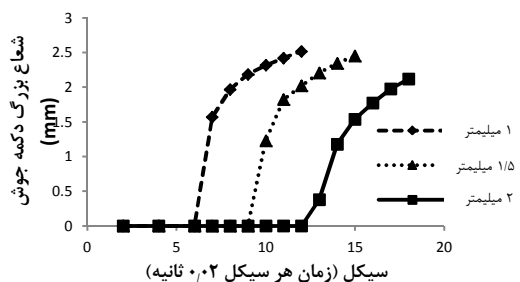
شکل ۱۰- تغییرات شعاع کوچک بیضی‌گون دکمه جوش در شدت جریان‌های مختلف



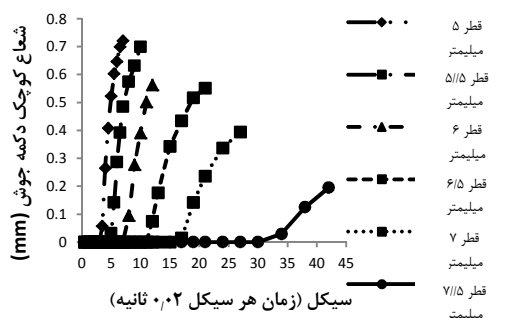
شکل ۱۴- دمای مرکز دکمه جوش در طی جوش کاری



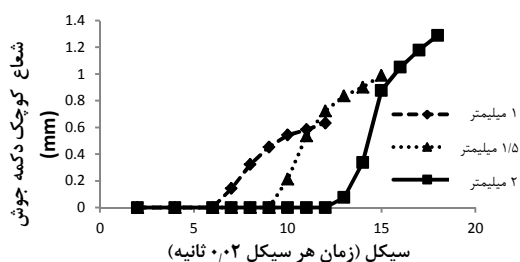
شکل ۱۲- تغییرات شعاع بزرگ بیضی گون دکمه جوش در قطرهای مختلف برای نوک الکتروود



شکل ۱۵- تغییرات شعاع بزرگ بیضی گون دکمه جوش در قطرهای مختلف برای نوک الکتروود



شکل ۱۳- تغییرات شعاع کوچک بیضی گون دکمه جوش در قطرهای مختلف برای نوک الکتروود



شکل ۱۶- تغییرات شعاع کوچک بیضی گون دکمه جوش در قطرهای مختلف برای نوک الکتروود

### ۳-۴- اثر ضخامت ورق

برای بررسی اثر تغییر ضخامت ورق بر شکل و نیز هندسه دکمه جوش کمیت‌های جوش کاری شامل شدت جریان ۱۰ کیلوآمپر، نیروی الکتروود ۲٫۵ کیلونیوتن و قطر الکتروود ۶ میلیمتر در شبیه‌سازی انتخاب شدند.

شکل ۱۴ دمای مرکز دکمه جوش را در طی جوش کاری و برای سه ضخامت ۱، ۱٫۵ و ۲ میلیمتر نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در ضخامت‌های کمتر رشد دکمه جوش سریع‌تر اتفاق می‌افتد، که به دلیل افزایش حجم ناحیه متأثر از گرما با افزایش ضخامت ورق می‌باشد. این امر موجب می‌شود به گرمای بیشتری برای تشکیل دکمه جوش نیاز بوده و لذا زمان جوش کاری را افزایش می‌دهد.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب تغییرات شعاع بزرگ و کوچک بیضی‌گون دکمه جوش برای ضخامت‌های مختلف ورق را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که جوانه زدن دکمه جوش با افزایش ضخامت ورق به تعویق می‌افتد.

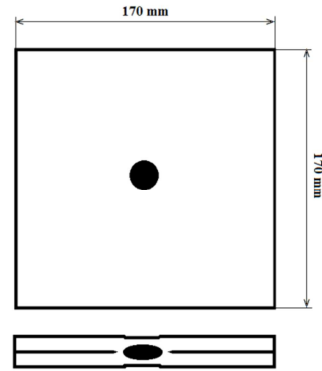
### ۳-۵- صحت سنجی نتایج

برای بررسی صحت نتایج تحلیل الکتریکی- گرمایی، هندسه دکمه جوش در سه نمونه آزمایش تعیین و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. نمونه‌ها از ورق فولادی AISI1008 به ضخامت ۱ میلیمتر ساخته شدند. مشخصات ابعادی نمونه آزمایشی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. این ابعاد با فرض اندازه بسیار بزرگ در مقایسه با قطر دکمه جوش انتخاب شده‌اند، به طوری که در هنگام جوشکاری دمای لبه‌های آزاد ورق نزدیک به دمای محیط باشد.

ترکیب شیمیایی ورق استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها که با انجام آزمون تعیین شده و ترکیب شیمیایی استاندارد برای فولاد AISI1008 [۱۱]، در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

**جدول ۴- مقایسه شعاع بزرگ دکمه جوش در نمونه**

شبه‌سازی شده و نمونه آزمایشی			
شماره نمونه	۱	۲	۳
قطر الکتروود mm	۵	۶	۷
شدت جریان kA	۹,۰	۹,۵	۱۱,۰
نیروی الکتروود kN	۲,۵	۲,۵	۲,۵
سیکل‌های جوشکاری	۸	۱۲	۱۸
شعاع دکمه جوش mm	۲,۱۳	۲,۲۹	۲,۶۹
از شبه‌سازی اجزای محدود			
شعاع دکمه جوش mm	۲,۲۱	۲,۵۰	۲,۸۷
در نمونه‌های آزمایشی			
درصد خطا	۳,۶	۸,۴	۶,۳



**شکل ۱۷- مشخصات ابعادی نمونه آزمایشی**

خواص مکانیکی برای ورق‌های مورد استفاده، بر اساس استاندارد [۱۲] با آزمون کشش ساده تعیین و همراه با مقادیر متناظر استاندارد در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

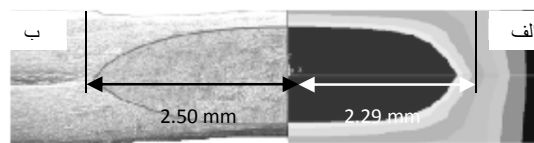
**جدول ۲- ترکیب شیمیایی نمونه و ترکیب استاندارد برای**

AISI1008

Al	P	Si	Mn	C <	Fe	
-	0.06	0.01	0.40	0.08	پایه	استاندارد
	0	0	0	0	ه	د
0.04	0.06	0.05	0.31	0.05	پایه	نمونه
2	3	0	9	0	ه	

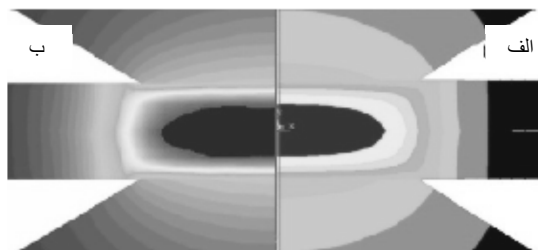
**جدول ۳- خواص مکانیکی ورق‌ها**

نمونه	استاندارد	خواص
274	240	تنش تسلیم MPa
400	370	استحکام کششی MPa
31	29	درصد ازدیاد طول



**شکل ۱۸- هندسه دکمه جوش، الف- شبه‌سازی اجزای محدود، و ب- نمونه آزمایشی شماره ۲**

شکل ۱۹ نیز مقایسه ای دیگر بین شبه‌سازی انجام شده در این مقاله با کار ژانگ [۱۰] که با نرم افزار اجزای محدود سورپاس<sup>۱</sup> انجام گرفته است، جهت صحت‌سنجی نتایج را نشان می‌دهد. در هر دو شبه‌سازی قطر الکتروود ۶ میلی‌متر، ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، شدت جریان ۹۵۰۰ آمپر و نیروی موثر بر الکتروود ۲۵۰۰ نیوتن فرض شده‌اند. مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین این دو شبه‌سازی وجود دارد، به طوری که اختلاف اندازه شعاع بزرگ دکمه جوش در این دو شبه‌سازی در حدود شش درصد می‌باشد.



**شکل ۱۹- هندسه دکمه جوش، الف- شبه‌سازی حاضر، و ب- شبه‌سازی ژانگ [۱۰]**

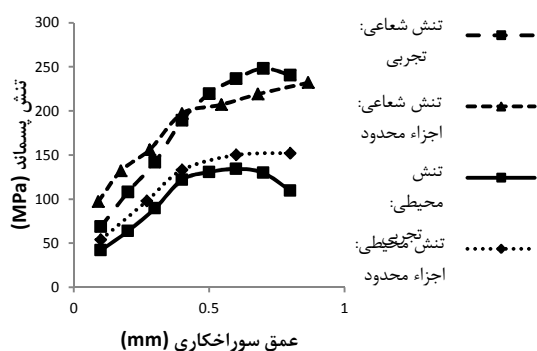
#### ۴- تحلیل مکانیکی

در این قسمت به توضیح و بررسی خروجی‌های مکانیکی حاصل از شبه‌سازی، شامل تنش‌ها و کرنش‌ها پرداخته شده

از دستگاه نقطه جوش خودکار مجهز به پیستون پنوماتیکی و برد کنترلی، برای تنظیم آمپراژ و زمان جوشکاری با ظرفیت ۱۲۷ kVA برای ساخت نمونه‌های آزمایشی استفاده شد. سپس نمونه‌ها به کمک دستگاه وایرکات در راستای طولی برش زده شده و طبق دستورالعمل مرجع [۱۳] سطوح برش به کمک سمباده صیقلی گردیده و اچ شدند. برای اچ کردن از محلول ۲ درصد اسید نیتریک استفاده شد. در آخر از سطح مقطع جوش توسط میکروسکوپ تصویربرداری گردید. کمیت‌های جوش کاری برای ساخت نمونه‌های آزمایشی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۸ هندسه دکمه جوش برای نمونه شماره ۲ حاصل از شبه‌سازی و آزمایش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج صحت و دقت نسبی مناسب در شبه‌سازی را نشان می‌دهد.

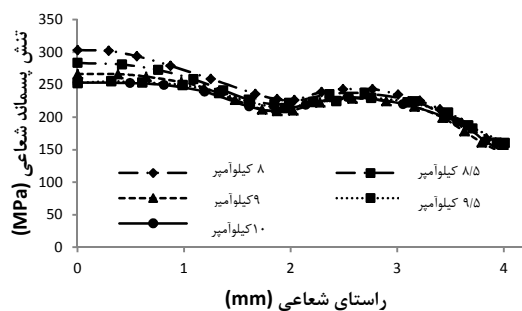
<sup>1</sup> SURPASS



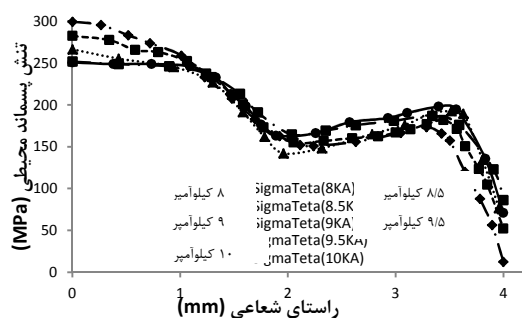


شکل ۲۰- تنش‌های شعاعی و محیطی حاصل از روش سوراخ‌کاری و شبیه‌سازی المان محدود

۴-۱- اثر جریان الکتریکی بر تنش‌های پسماند شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به ترتیب نحوه تغییرات تنش‌های پسماند شعاعی و محیطی در راستای شعاعی، مسیر OS در شکل ۱، را به ازای تغییرات جریان الکتریکی نشان می‌دهند. کمیت‌های موثر جوش‌کاری در این دو شکل، قطر الکتروود ۶ میلی‌متر و تعداد سیکل جوش‌کاری ۱۰ و نیروی فشاری موثر بر الکتروود ۲/۵ کیلونیوتن می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش جریان جوش‌کاری به صورت کلی تنش‌های پسماند در دکمه جوش و ناحیه متأثر از گرما کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش جریان، گردادیان دمایی در ناحیه متأثر از گرما کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱- تغییرات تنش‌های پسماند شعاعی به ازای جریان‌های مختلف



شکل ۲۲- تغییرات تنش‌های پسماند محیطی به ازای جریان‌های مختلف

است. تنش‌های پسماند در ورق‌های جوش‌کاری شده مهم‌ترین خروجی این مرحله از تحلیل می‌باشد.

در این شبیه‌سازی ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و قطر الکتروود ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. بار وارده بر الکتروودها نیز ۲۵۰۰ نیوتن فرض شده است. با حرکت از محور تقارن به سمت لبه الکتروود، فشار تماس بین الکتروود و ورق افزایش می‌یابد، تا جایی که در لبه الکتروود به مقدار حداکثر خود می‌رسد. البته بعد از لبه الکتروود به دلیل عدم وجود تماس، فشار تماسی نیز صفر خواهد شد. در مورد تماس بین دو ورق نیز به همین ترتیب با فاصله گرفتن از محور تقارن، فشار تماسی افزایش می‌یابد تا این که دو ورق از هم فاصله گرفته و مقدار آن به صفر برسد.

در انتهای مرحله جوش‌کاری از آنجا که انبساط در ناحیه دکمه جوش با دمای بالا توسط نواحی اطراف خود که سردتر از آن می‌باشند محدود می‌شود، همچنین با توجه به فشار اعمالی از سوی الکتروودها، ناحیه متأثر از گرما تحت اثر تنش‌های فشاری قرار می‌گیرد.

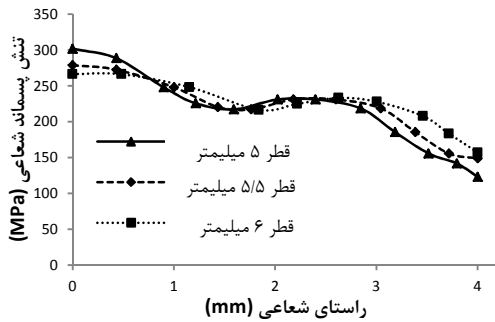
در مرحله نگهداری به دلیل تماس سطوح ناحیه جوش شده با الکتروود و انتقال گرمای رسانشی از طریق الکترودهایی که با جریان آب خنک‌کاری می‌شوند، آهنگ سرمایش این سطوح بالاتر از بقیه نواحی است. انقباض در این سطح به وسیله فلز گرم اطراف آن محدود شده و لذا منجر به ایجاد تنش‌های کششی در ناحیه خارج از دکمه جوش بیضی‌گون می‌شود. این در حالی است که ناحیه دکمه جوش هنوز تحت تأثیر تنش‌های فشاری قرار دارند.

کل ناحیه جوش با خنک‌شدن قطعه جوش‌کاری شده منقبض می‌شود. بنابراین تحت تأثیر فلز سرد اطراف، الگوی توزیع تنش‌های پسماند کششی غالب می‌شود.

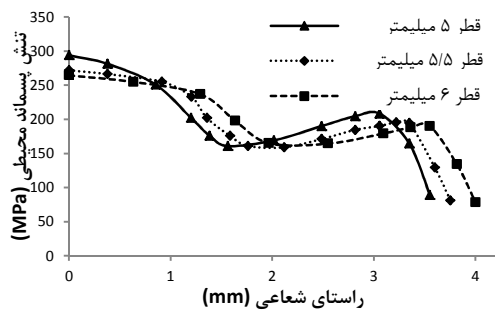
برای صحت‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی ها، از نتایج تجربی حاصل از روش سوراخ‌کاری بهره گرفته شده است. روش سوراخ‌کاری یک روش نیمه‌مخرب است. از این روش به صورت عمده برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در راستای ضخامت استفاده می‌شود. کرنش‌سنج به فاصله ۳/۳ میلی‌متر از مرکز دکمه جوش (یعنی ناحیه متأثر از گرما) چسبانده شده و فرآیند سوراخ‌کاری و اندازه‌گیری تنش در راستای عمق نمونه، مسیر QS در شکل ۱، و در فواصل ۰/۱ میلی‌متر با ۸ گام انجام گرفت و در شکل ۲۰ تنش‌های محیطی و شعاعی حاصل از روش سوراخ‌کاری و شبیه‌سازی المان محدود با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی مطابقت نسبتاً قابل قبولی با نتایج آزمایش را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- اثر زمان جوش کاری بر تنش های پسماند

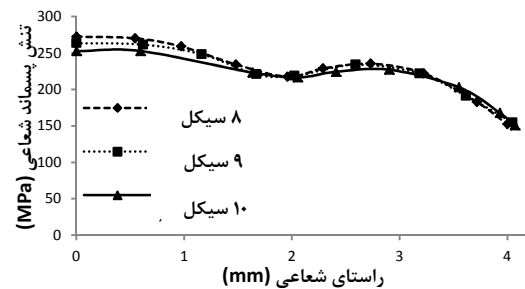
شکل های ۲۳ و ۲۴ به ترتیب تنش های پسماند شعاعی و محیطی به ازای ۸ و ۹ و ۱۰ سیکل جوش کاری را نشان می دهند. کمیت های موثر جوش کاری در این دو شکل، قطر الکتروود ۶ میلی متر و جریان ۹٫۵ کیلو آمپر و نیروی فشاری موثر بر الکتروود ۲٫۵ کیلو نیوتن می باشند. با توجه به شکل ها می توان پی برد که اندازه تنش های پسماند با تعداد سیکل جوش کاری رابطه معکوس دارد. دلیل این پدیده نیز کاهش گرادیان دمایی ایجاد شده در ناحیه متأثر از گرما در اثر بالا رفتن زمان جوش کاری است.



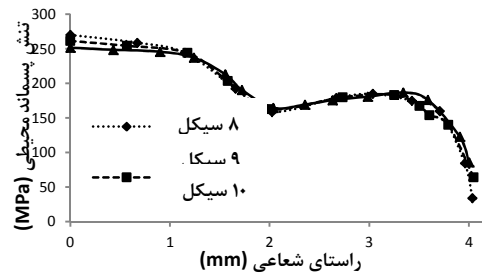
شکل ۲۵- تغییرات تنش های پسماند شعاعی به ازای قطر الکتروودهای مختلف



شکل ۲۶- تغییرات تنش های پسماند محیطی به ازای قطر الکتروودهای مختلف



شکل ۲۳- تغییرات تنش های پسماند شعاعی به ازای سیکل های جوش کاری متفاوت



شکل ۲۴- تغییرات تنش های پسماند محیطی به ازای سیکل های جوش کاری متفاوت

#### ۴-۳- اثر قطر الکتروود بر تنش های پسماند

در شکل های ۲۵ و ۲۶ نیز به ترتیب تنش های پسماند شعاعی و محیطی برای جوش کاری های انجام گرفته با قطر الکتروودهای ۵ و ۵٫۵ و ۶ میلی متر نشان داده شده اند. کمیت های موثر جوش کاری در این دو شکل، شدت جریان ۹٫۵ کیلو آمپر، تعداد سیکل جوش کاری ۱۰ و نیروی فشاری موثر بر الکتروود ۲٫۵ کیلو نیوتن می باشند. با کاهش قطر الکتروود، ناحیه متأثر از گرما نیز کاهش یافته، بنابراین تنش های پسماند نیز به سمت مرکز دکمه جوش متمرکز می شوند.

#### ۵- نتایج تحقیق

در تحقیق حاضر، با مطالعه پارامتریک در نمونه هایی از جنس AISI 1008 که به صورت لبه روی هم جوش نقطه ای شده بودند، با استفاده از روش اجزای محدود مشخصات جوش کاری بررسی گردیدند. بر اساس مطالعه انجام شده می توان نتیجه گرفت:

- شدت جریان الکتریکی مهم ترین کمیت در نحوه تشکیل دکمه جوش می باشد.
- افزایش دما در ورق ها و الکتروودها برای جریان AC، مشابهت قابل قبولی با جریان DC حاصل از روش ریشه متوسط مجذورات دارد.
- افزایش قطر الکتروود یا ضخامت ورق باعث افزایش ناحیه متأثر از گرما می شود، لذا مدت زمان و یا شدت جریان بیشتری برای جوش کاری لازم خواهد بود.
- در مرحله جوش کاری تمامی تنش های ناحیه متأثر از گرما فشاری هستند که این به دلیل تحت فشار قرار گرفتن ناحیه با دمای بالا توسط نواحی اطراف و همچنین الکتروود می باشد.
- با قطع شدن جریان تا انتهای مرحله نگهداری الکتروود، تماس الکتروود با ورق باعث انتقال گرمای زیادی به ناحیه تماس ورق- الکتروود شده که همین

- [8] "Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials", Metals Handbook, vol.2, ed. 10, ASM, 1990.
- [9] "Metric-ISO 5821 standard cap electrodes", www.nsrw.com.
- [10] Zhang W., "Design and implementation of software for resistance welding process simulations", Society of Automotive Engineers, Technical Paper 01-0978, pp. 105-113, 2003.
- [11] Dickinson D.W., "Welding in the automotive industry", Committee of Sheet Steel Industries, Report AISI SG 81-5, 1981.
- [12] "Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet materials", American Welding Society, AWS/SAE D8.9:02, 2002.
- [13] Long X., "Finite element analysis of residual stress generation during spot welding and its affect on fatigue behavior of spot welded joint", PhD thesis, The Faculty of the Graduate School, University of Missouri-Columbia, 2005.

موضوع باعث ایجاد گرادیان تنش بالایی در این ناحیه می‌گردد.

- با قطع تماس الکتروود با ورق، ناحیه تماس ورق-الکتروود با دمای بالا در دمای محیط خنک و منقبض می‌شود. در نتیجه تمامی تنش‌های فشاری جای خود را به تنش‌های کششی خواهند داد.
- کاهش جریان و زمان جوش‌کاری باعث کوچک شدن دکمه جوش و بالا رفتن گرادیان دمایی در ناحیه متأثر از گرما می‌شود و در نتیجه تنش‌های پسماند کششی را در این ناحیه افزایش می‌دهد.
- با کاهش قطر الکتروود، تنش‌های پسماند به سمت مرکز دکمه جوش متمرکز می‌شوند.

### مراجع

- [1] Deng X., Chen W., and Shi G., "Three-dimensional finite element analysis of the mechanical behavior of spot welds", Finite Elements in Analysis and Design, vol. 35, pp. 17-39, 2000.
- [2] Feulvarch E., Robin V., and Bergheau J.M., "Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contact conditions", Journal of Materials Processing Technology, vol. 153-154, pp. 436-441, 2004.
- [3] Zhigang H., Yuanxun W., Chunzhi L., and Chuanyao L., "A multi-coupled finite element analysis of resistance spot welding process", Acta Mechanica Solida Sinica, vol. 19, no. 1, pp. 86-94, 2006.
- [3] Zhigang H., Yuanxun W., Chunzhi L., and Chuanyao L., "A multi-coupled finite element analysis of resistance spot welding process", Acta Mechanica Solida Sinica, vol. 19, no. 1, pp. 86-94, 2006.
- [4] Zhigang H., Kim I.S., Wang Y., Li C., and Chen C., "Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process", Journal of Materials Processing Technology, vol. 185, pp. 160-165, 2007.
- [5] Eisazadeh H., Hamed M., and Halvae A., "New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method", Materials and Design, vol. 31, pp. 149-157, 2010.
- [6] Lei Z., Kang H.T., and Liu Y., "Finite element analysis for transient thermal characteristics of resistance spot welding process with three sheets assemblies", Procedia Engineering, vol. 16, pp. 622 - 631, 2011.
- [7] Dancette S., Fabregue D., Estevez R., Massardier V., Dupuy T., and Bouzekri M., "A finite element model for the prediction of advanced high strength steel spot welds fracture", Engineering Fracture Mechanics, vol. 87, pp. 48-61, 2012.