

## شبیه‌سازی عددی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی گالوانیزه با استفاده از روش آنالیز المان محدود

فاطمه میرزائی<sup>۱</sup>، فرهاد کلاهان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد، f\_mirzaei84@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، kolahan@um.ac.ir

### چکیده

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از مهم‌ترین فرآیندهای اتصال ورق‌های فلزی است که کاربرد زیادی در صنایع مختلف از قبیل خودروسازی، هواپیمایی و لوازم خانگی دارد. در این نوع جوشکاری، اندازه و شکل دکه جوش یکی از عوامل بسیار مهم و موثر بر کیفیت و خواص مکانیکی اتصال، همچون استحکام کششی-برشی و استحکام خستگی است. هندسه دکه جوش خود تحت تأثیر پارامترهای جوشکاری از جمله شدت جریان و زمان اعمال جریانات. در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود، تشکیل دکه جوش در جوشکاری ورق‌های فولادی گالوانیزه BH و F مورد استفاده در بدنه خودرو، مدلسازی و تحلیل شده است. به منظور شبیه‌سازی فرآیند یک مدل اجزاء محدود کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی در محیط نرم‌افزار ANSYS و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی APDL به کار گرفته شده است. جهت افزایش دقت، خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی مواد به صورت غیرخطی و وابسته به دما تعریف شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش جریان و زمان جوشکاری، اندازه دکه جوش افزایش می‌یابد. در این میان نقش شدت جریان در ابعاد و هندسه دکه جوش بسیار چشم‌گیرتر بوده است. نتایج مدل نرم‌افزاری انطباق مناسبی را با مطالعات تجربی در این زمینه دارد.

### واژه‌های کلیدی

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، آنالیز المان محدود، هندسه دکه جوش، فولاد گالوانیزه

### مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به‌خاطر هزینه پایین و بهره‌وری بالا در صنایع مختلف از جمله خودروسازی برای اتصال ورق‌های فلزی نازک به‌طور گسترده به کار می‌رود. شکل ۱ شمای کلی این فرآیند را نشان می‌دهد. این روش جوشکاری شامل چهار مرحله فشردن، جوشکاری، نگهداری و سرد شدن می‌باشد. در مرحله فشردن، ورق‌ها

تحت فشار یک جفت الکترود با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند. در مرحله جوشکاری، همزمان با اعمال نیرویک جریان الکتریکی بالا در مدت

زمان خیلی کوتاه از قطعه کار بین الکترودها عبور می‌کند. به علت مقاومت تماسی بین سطوح تماسی و اثر حرارتی ژول، در قطعه کار دکه جوش تشکیل می‌شود. نگهداری سومین مرحله از فرآیند جوشکاری است که در آن جریان قطع می‌شود ولی نیرو هنوز برای نگهداری و سرد شدن جوش اعمال می‌شود. در آخرین مرحله الکترود از قطعه کار جدا می‌شود و دمای قطعه به دمای محیط می‌رسد. به منظور برقراری پیوستگی جریان الکتریکی، فراهم کردن فشار مورد نیاز برای تشکیل دکه جوش و جلوگیری از بیرون‌زدگی مذاب<sup>۲</sup>، نیرو قبل، در حین و بعد از اعمال جریان الکتریکی به کار می‌رود.

یکی از مشخصه‌های مهم کیفی در جوشکاری نقطه‌ای استحکام کششی-برشی اتصالات جوشکاری شده است. این مشخصه بنوبه خود تحت تأثیر پارامترهای فرآیند شامل شدت جریان، زمان جوشکاری و نیرو می‌باشد. بنابراین مطالعه تأثیر پارامترهای تنظیمی بر استحکام اتصالات در جوشکاری نقطه‌ای از اهمیت بسزایی برخوردار است. در اغلب موارد هندسه و ابعاد دکه جوش که رابطه مستقیم با استحکام اتصال دارد، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این میان شبیه‌سازی عددی به عنوان یک ابزار مفید با هزینه نسبتاً پایین به‌طور گسترده برای بررسی این فرآیند به کار می‌رود.

خان<sup>۳</sup> و همکاران [۱] فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های آلومینیومی را شبیه‌سازی کردند. ایشان تأثیر نیروی اعمالی را بر توزیع فشار تماسی بررسی کردند، و نشان دادند که هندسه دکه

گالوانیزه<sup>۲</sup> و BH<sup>۱</sup>، مدلسازی شده و تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی هندسه دکمه جوش بررسی شده است. فولاد گالوانیزه BH و IF، به دلیل شکل پذیری خوب و خواص مکانیکی مناسب، کاربرد گسترده‌ای در ساخت بدنه خودرو دارد. برای شبیه‌سازی این فرآیند، یک مدل کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار ANSYS ایجاد شده است. در تحلیل‌های انجام شده، تأثیر جریان جوشکاری و زمان جوشکاری بر روی هندسه و ابعاد دکمه جوش مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشی، مدل المان محدود اعتبارسنجی شده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: ماکروساختار سطح مقطع عرضی یک نمونه جوشکاری شده

### آزمایشات تجربی

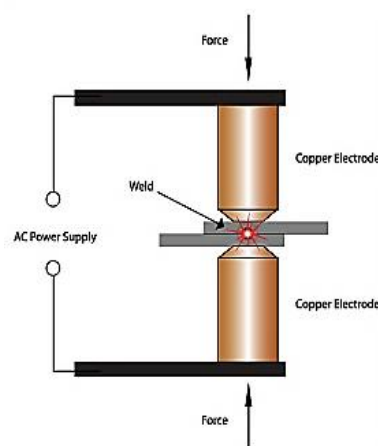
در این تحقیق، از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای اتصال دو ورق فولادی گالوانیزه BH و IF، پرکاربرد در صنایع خودرو سازی با ضخامت ۰/۶۷ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی ورق‌های فولادی مورد بررسی در جداول ۱ و ۲ داده شده است. به منظور صحت‌گذاری مدل نرم‌افزاری، تعدادی نمونه با استفاده از یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با فرکانس ۵۰ Hz جوشکاری گردید. جوشکاری با استفاده از یک الکتروود مسی با قطر ۶ میلی‌متر، نیروی الکتروود ۲۰۰۰ نیوتن و زمان نگهداری ۱۲ سیکل انجام شده است. بعد از جوشکاری، نمونه‌ها برای بررسی متالوگرافی و اندازه‌گیری ابعاد دکمه جوش آماده شده‌اند. شکل ۲ ماکروساختار سطح مقطع عرضی یک نمونه جوشکاری شده با جریان جوشکاری ۱۰ کیلوآمپر و زمان جوشکاری ۱۲ سیکل را نشان می‌دهد.

### معادلات حاکم

در این مطالعه، به علت متقارن بودن هندسه و بارگذاری ورق‌ها و الکتروود، از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن محوری در محیط ANSYS برای شبیه‌سازی استفاده شده است (شکل ۳). معادلات حاکم برای تحلیل‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی در سیستم مختصات استوانه‌ای دو بعدی تعریف شده‌اند. معادله دیفرانسیل حاکم برای توزیع میدان الکتریکی به صورت زیر بیان می‌شود:

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

Interstitial Free  
Bake Hardenable



شکل ۱: فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای

جوش متأثر از شکل الکتروود می‌باشد. فولواچ<sup>۱</sup> و همکاران [۲] مدلی را با در نظر گرفتن مقاومت‌های تماسی الکتریکی و حرارتی بر مبنای روش المان محدود طراحی کردند، و توانستند فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای را شبیه‌سازی نمایند. نتایج شبیه‌سازی ایشان که بر روی شکل دکمه جوش و اندازه منطقه متأثر از حرارت صورت گرفت، مطابقت خوبی را با نتایج عملی نشان داد. هو<sup>۲</sup> و همکاران [۳] یک مدل کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی دو بعدی متقارن را بر مبنای روش اجزاء محدود برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد معمولی در نرم‌افزار ANSYS ارائه نمودند. هدف از ارائه این تحقیق نشان دادن توزیع تنش و کرنش در فرآیند در طی سیکل‌های مختلف جوشکاری بوده است. ما<sup>۳</sup> و مورا کاوا<sup>۴</sup> [۴] فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورق از جنس فولاد استحکام بالا را شبیه‌سازی کردند. آنها اندازه دکمه جوش را برای زمان و جریان‌های جوشکاری مختلف به دست آوردند و نتایج تحلیل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که توافق خوبی بین نتایج مشاهده شد. عیسی‌زاده و همکاران [۵] فرآیند تشکیل دکمه جوش را در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فولادی AISI1008 با استفاده از مدل المان محدود در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی کردند و تأثیر پارامترهای مختلف جوشکاری بر روی توزیع دمای سطح تماس ورق‌ها بررسی کردند. شن<sup>۵</sup> و همکاران [۶] فرآیند جوشکاری نقطه‌ای سه ورق فلزی با ضخامت و جنس‌های متفاوت فولاد گالوانیزه SAE1004 و فولاد دوفازی DP600 را با استفاده از یک مدل کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی در نرم‌افزار ANSYS مدلسازی و شبیه‌سازی کردند. آنها نشان دادند که ترتیب قرار گرفتن ورق‌های فولادی بر اندازه دکمه جوش تشکیل شده موثر می‌باشد.

شکل و اندازه دکمه جوش مهمترین پارامتر در تعیین کیفیت و استحکام اتصالات جوش نقطه‌ای می‌باشد. از این‌رو، در این مقاله پدیده تشکیل دکمه جوش در جوشکاری ورق‌های فولادی

Feulvarch  
Hou  
Ma  
Murakawa  
Shen

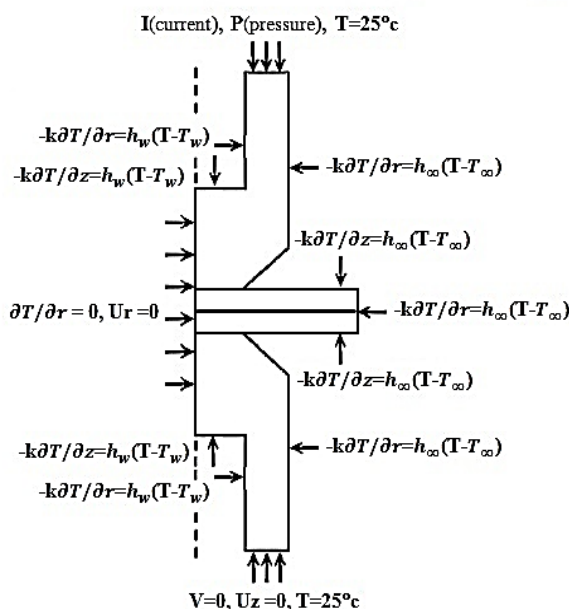
جدول ۲: ترکیب شیمیایی ورق فولادی گالوانیزه BH

| C      | Si    | S     | P     | Mn    | Ni    | Cr    |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.002  | 0.005 | 0.006 | 0.018 | 0.162 | 0.022 | 0.021 |
| Mo     | V     | Cu    | Al    | Nb    | Zn    | Ti    |
| 0.0006 | 0.001 | 0.015 | 0.044 | 0.005 | 0.008 | 0.005 |

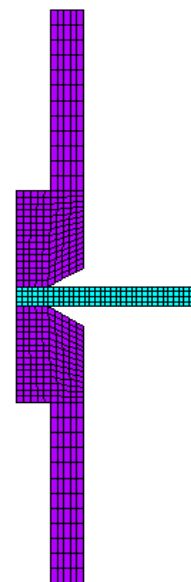
پارامترهای  $\Gamma$  و  $Z$  مختصات شعاعی و محوری،  $\mu$  رسانایی الکتریکی مواد و  $\rho$  پتانسیل الکتریکی هستند.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی ورق فولادی گالوانیزه IF

| C     | Si    | S     | P     | Mn    | Ni    | Cr    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.003 | 0.006 | 0.005 | 0.018 | 0.173 | 0.011 | 0.031 |
| Mo    | V     | Cu    | Al    | Nb    | Zn    | Ti    |
| 0.001 | 0.002 | 0.017 | 0.035 | 0.001 | 0.004 | 0.05  |



(ب)



(الف)

شکل ۳: (الف) مدل المان محدود دو بعدی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای، (ب) شرایط مرزی مکانیکی، الکتریکی و حرارتی

$[d\sigma]$  تانسور تنش،  $[C^{th}]$  ماتریس سفتی حرارتی و  $dT$  افزایش دما است.

برای تحلیل ساختاری، معادله تعادل تنش به صورت زیر است:

$$\sigma_{ij} + b_i = 0 \quad (5)$$

در این رابطه  $b_i$  نیروی حجمی و  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش است.

### شرایط مرزی

در تحلیل عددی، به منظور دستیابی به نتایج صحیح باید شرایط مرزی و خواص مواد به درستی تعریف شوند. شرایط مرزی مکانیکی، الکتریکی و حرارتی به کار رفته در مدل اجزاء محدود، در شکل ۳ نشان داده شده است. شرایط مرزی برای حل معادلات حاکم به صورت زیر بیان می‌شود:

#### • شرایط مرزی مکانیکی

در جوشکاری نقطه‌ای نیروی فشاری بین دو الکترود باعث تماس دو ورق می‌گردد. در شبیه‌سازی نیرو در سطح فوقانی الکترود بالایی اعمال می‌شود. نیرو در سیکل فشردن به طور خطی افزایش می‌یابد و در سیکل‌های جوشکاری و نگهداری ثابت نگه داشته می‌شود. جابجایی شعاعی در امتداد محور تقارن مرکزمدل مقید شده است. جابجایی در سطح تحتانی الکترود پایینی صفر قرار داده می‌شود.

معادله حاکم برای محاسبه حرارت تولید شده توسط

جریان الکتریکی با استفاده از قانون ژول به صورت زیر می‌باشد:

$$Q = RI^2 t \quad (2)$$

$Q$  حرارت،  $I$  جریان الکتریکی،  $R$  مقاومت الکتریکی ماده و  $t$  زمان عبور جریان است.

معادله دیفرانسیل حاکم برای تحلیل انتقال حرارت گذرا با در

نظر گرفتن حرارت ناشی از مقاومت الکتریکی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (3)$$

پارامترهای  $\rho$ ،  $k$ ،  $c$  و  $T$  به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی مواد، دما و زمان هستند. همچنین  $\dot{q}$  نرخ تولید حرارت داخلی بر واحد حجم در داخل مرز نواحی تحلیل می‌باشد.

برای آنالیز تنش و کرنش، معادله حاکم بر اساس تئوری

الاستیک-پلاستیک-حرارتی به صورت زیر می‌باشد:

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}] \quad (4)$$

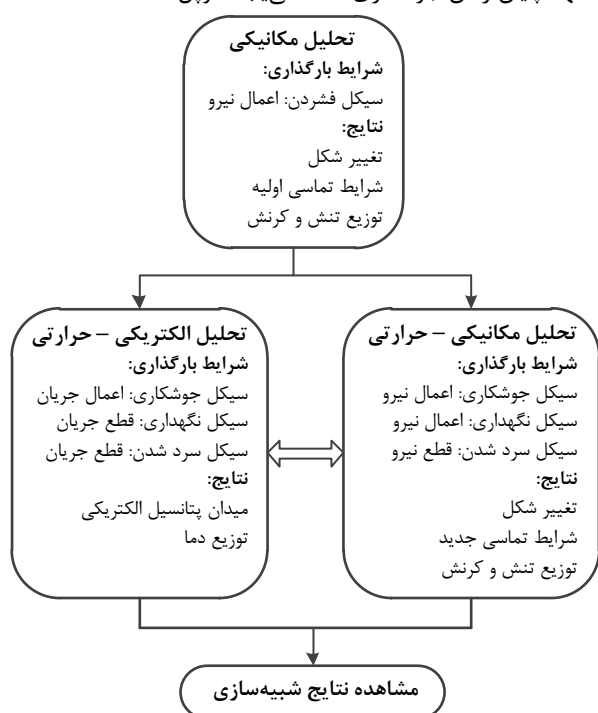
که

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p]$$

$[D^{ep}]$  ماتریس سفتی الاستیک-پلاستیک،  $[D^e]$  ماتریس سفتی

الاستیک،  $[D^p]$  ماتریس سفتی پلاستیک،  $[d\varepsilon]$  تانسور کرنش،

میشود، در حالیکه سیکل جوشکاری در چند مرحله بارگذاری انجام می گیرد. شبیه سازی فرآیند با تحلیل سیکل فشردن شروع می شود، که نیرو به الکترودها اعمال می شود. نتایج تحلیل مکانیکی در مرحله فشردن شامل تنش، جابجایی، تغییر شکل و تغییرات سطح تماسی و فشار تماسی است، که به عنوان ورودیدر آنالیز الکتریکی- حرارتیبه- کار می روند. در تحلیل کوپل الکتریکی- حرارتی تبعید از اعمال شرایط مرزی الکتریکیو حرارتی به مدل، توزیع دما در اولین مرحله به دست می آید و به عنوان بار حرارتی گره ای در تحلیل مکانیکی- حرارتی به کار می رود. توزیع فشار تماسی، مساحت تماسی و تغییر شکل، نتایج تحلیل مکانیکی- حرارتی هستند که به تحلیل الکتریکی- حرارتی فرستاده می شوند، تا شرایط تماسی تغییر یابد و حرارت تولید شده توسط اعمال جریان الکتریکی در این مرحله محاسبه شود. این حلقه ها تا پایان زمان جوشکاری ادامه می یابد. کوپل



شکل ۴: دیاگرام مدل سازی المان محدود فرآیند جوشکاری نقطه ای

بین دو تحلیل در هر مرحله بارگذاری مدت زمان ۰/۰۲ ثانیه (یک سیکل) انجام می شود. خروجی مدل در نهایت هندسه دکمه جوش است که با توجه به دمای ذوب ورق تعیین می شود.

### نتایج و بحث

در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای، جریان جوشکاری و زمان جوشکاری بیشترین تأثیر را بر روی اندازه و هندسه دکمه جوش دارند، از این رو به بررسی تأثیر این پارامترها بر روی توزیع دما و اندازه دکمه جوش پرداخته شده است. به منظور بررسی دقت مدل نرم افزاری، نتایج تحلیل ها با نتایج آزمایشات عملی مقایسه گردید.

### شرایط مرزی الکتریکی

از آنجایی که در این تحقیق یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه ای با جریان متناوب با فرکانس ۵۰ Hz استفاده شده است، در شبیه سازی عددی جریان الکتریکی سینوسی در سطح فوقانی الکترودها لایه اعمال می شود. پتانسیل الکتریکی سطح تحتانی الکترودها پائین صفر قرار داده می شود. مقدار جذر میانگین مربع<sup>۱</sup> جریان به صورت زیر به دست می آید:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin 2\pi f t)^2 d(2\pi f t)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

در رابطه فوق  $I_{rms}$  جذر میانگین مربع جریان جوشکاری،  $I_m$  ماکزیمم جریان جوشکاری،  $I$  مقدار واقعی جریان و  $f$  فرکانس است. بنابراین

جریان جوشکاری اعمال شده به الکترودها به صورت زیر می باشد:

$$I = I_m \sin(2\pi f t) = \sqrt{2} I_{rms} \sin(2\pi f t) \quad (7)$$

### شرایط مرزی حرارتی

در سطوح جانبی الکترودها و ورق ها که در تماس با هوای محیط قرار دارند، شرایط مرزی انتقال حرارت همرفتی به صورت زیر است:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\infty} (T - T_{\infty}) \quad (8)$$

در سطوح داخلی الکترودها که در تماس با آب قرار دارند، شرایط مرزی انتقال حرارت در این حالت نیز همرفتی است:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_w (T - T_w) \quad (9)$$

به طوریکه  $q$ ،  $h_{\infty}$ ،  $T_{\infty}$ ،  $T_w$  و  $\frac{\partial T}{\partial n}$  به ترتیب، حرارت تولیدی بر واحد حجم در سطوح مرزی، ضریب همرفت هوا  $21 \text{ kW/m}^2$ ، ضریب همرفت آب  $30 \text{ kW/m}^2$ ، دمای هوا  $25^\circ\text{C}$  و دمای آب  $25^\circ\text{C}$  و گرادیان در امتداد عمود بر سطح است.

با توجه به اینکه به دلیل تقارن محوری الکترودها و ورق تنها نیمی از هندسه برای مدل سازی در نظر گرفته شده است، در نتیجه انتقال حرارت شعاعی از محور تقارن مرکزی الکترودها و ورق صفر است.

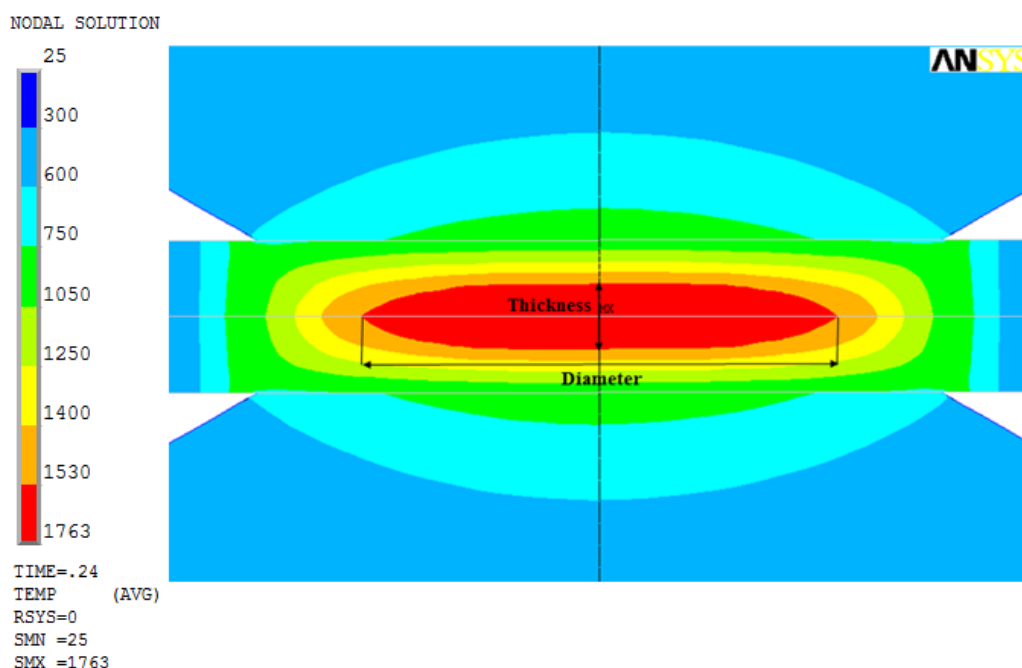
$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

### تحلیل عددی

در این مطالعه، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای به عنوان یک مسئله کوپل مکانیکی- الکتریکی- حرارتی با استفاده از روش المان محدود در نرم افزار ANSYS تحلیل شده است. برای مدل سازی الکترودها و ورق های فولادی از المان های متقارن محوری استفاده شده است. در تحلیل مکانیکی المان Plane42 و در تحلیل کوپل الکتریکی- حرارتی المان Plane67 به کار می رود. برای سطوح تماس ورق- ورق و الکترودها- ورق از المان های تماسی Targe169 و Conta171 استفاده می- شود.

فلوچارت تحلیل فرآیند جوشکاری نقطه ای در شکل ۴ نشان داده شده است. سیکل فشردن به عنوان یک مرحله بارگذاری تعریف

حداکثر خطای نسبی محاسبه شده کمتر از ۱۳٪ است، که مطابقت خوبی را بین نتایج محاسبه شده و نتایج تجربی نشان می‌دهد. شکل ۶ توزیع دما را برای شرایط جوشکاری داده شده در سه موقعیت مرکز دکمه جوش، مرکز سطح تماس الکتروود و ورق و لبه الکتروود نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود همواره بیشترین دما در دکمه جوش در مرکز سطح تماس ورق‌هاست. همچنین دمای سطح تماس ورق‌ها به علت بزرگتر بودن مقاومت تماسی، بیشتر از دمای سطح تماس ورق-الکتروود است.

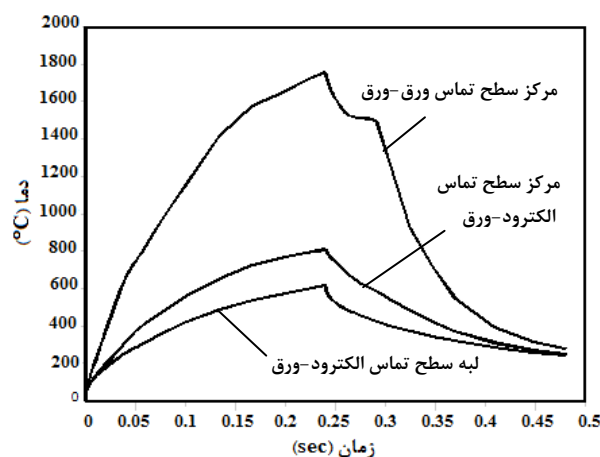


شکل ۵: توزیع دما و اندازه دکمه جوش در پایان زمان جوشکاری

میکند. دلیل این روند این است که با افزایش زمان جوشکاری، اندازه دکمه جوش و ناحیه تماس در سطح تماس ورق‌ها بزرگ می‌شود، در نتیجه چگالی جریان عبوری و مقاومت تماسی کاهش می‌یابند. دلیل دیگر برای کاهش نرخ رشد دکمه جوش با افزایش زمان جوشکاری این است که افزایش زمان باعث اتلاف حرارت بیشتر از ناحیه ذوب از طریق هدایت و همرفت می‌شود، به طوریکه تأثیر زمان جوشکاری را بر رشد دکمه جوش ناشی از تولید حرارت کاهش می‌دهد.

شکل ۸ تأثیر جریان جوشکاری را بر قطر وضخامت دکمه جوش، در زمان جوشکاری ۱۲ سیکل، نشان می‌دهد. دکمه جوش در جریان بیشتر از ۹ کیلوآمپر تشکیل می‌شود و اولین پدیده بیرونزدگی مذاب در جریان بیشتر از ۱۲ کیلوآمپر رخ می‌دهد. هنگامی که

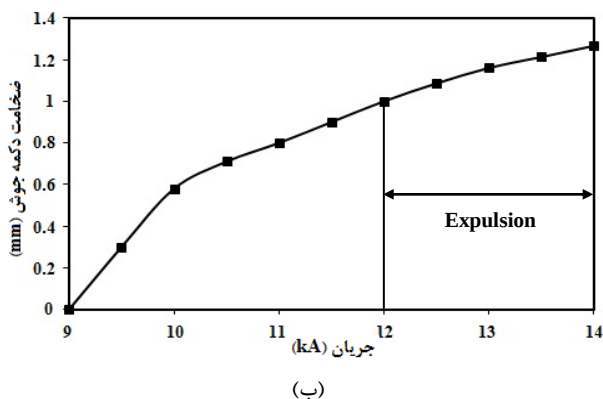
شکل ۵ توزیع دما را در انتهای سیکل جوشکاری، برای شدت جریان ۱۰ کیلوآمپر و زمان ۱۲ سیکل، نشان می‌دهد. دکمه جوش ناحیه‌ای است که دمای آن به بالاتر از نقطه ذوب ورق‌ها رسیده باشد. با فرض  $1530^{\circ}\text{C}$  به عنوان دمای ذوب فولاد، ناحیه جوش به رنگ قرمز مشاهده می‌شود. قطر و ضخامت دکمه جوش اندازه‌گیری شده از آزمایش عملی به ترتیب ۴/۷ و ۰/۵۸ میلی‌متر بوده است، و مقدار محاسبه شده از تحلیل المان محدود ۴/۱ و ۰/۶ میلی‌متر است.



شکل ۶: توزیع دما در سه موقعیت مختلف در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای

شکل ۷ تأثیر زمان جوشکاری را بر قطر و ضخامت دکمه جوش، برای جریان جوشکاری ۱۲ کیلوآمپر، نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، تشکیل دکمه جوش از زمان چهار سیکل شروع شده و در سه سیکل بعدی رشد دکمه جوش به شدت افزایش می‌یابد، و پس از آن نرخ افزایش اندازه دکمه جوش کاهش پیدا





شکل ۸: تأثیر جریان جوشکاری بر قطر و ضخامت دکمه جوش

| جریان ۱۰ (kA)    |            | جریان ۱۱ (kA)    |            |
|------------------|------------|------------------|------------|
| زمان ۱۰ (cycles) |            | زمان ۱۰ (cycles) |            |
| قطر (mm)         | ضخامت (mm) | قطر (mm)         | ضخامت (mm) |
| ۳/۶              | ۰/۴۶       | ۴/۷              | ۰/۷        |
|                  |            | (۳۰٪ ↑)          | (۵۲٪ ↑)    |

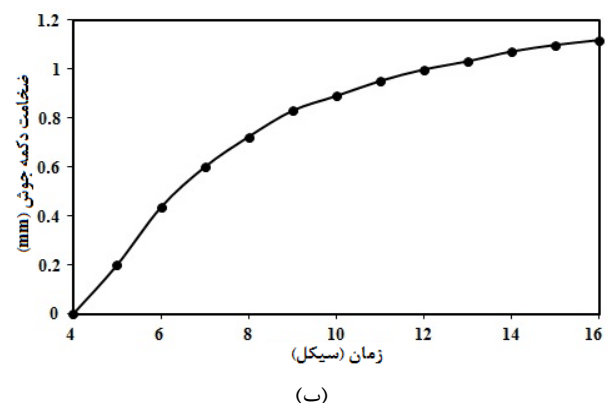
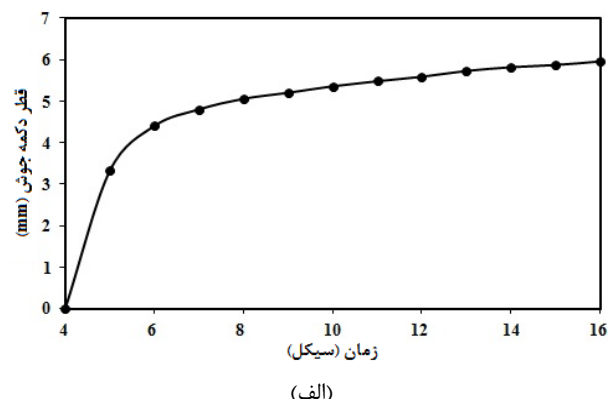
  

| جریان ۱۰ (kA)    |            | جریان ۱۲ (kA)    |            |
|------------------|------------|------------------|------------|
| زمان ۱۲ (cycles) |            | زمان ۱۲ (cycles) |            |
| قطر (mm)         | ضخامت (mm) | قطر (mm)         | ضخامت (mm) |
| ۴/۱              | ۰/۶        |                  |            |
|                  |            | (۱۴٪ ↑)          | (۳۰٪ ↑)    |

شکل ۹: مقایسه بین تأثیر زمان و جریان جوشکاری بر رشد دکمه جوش

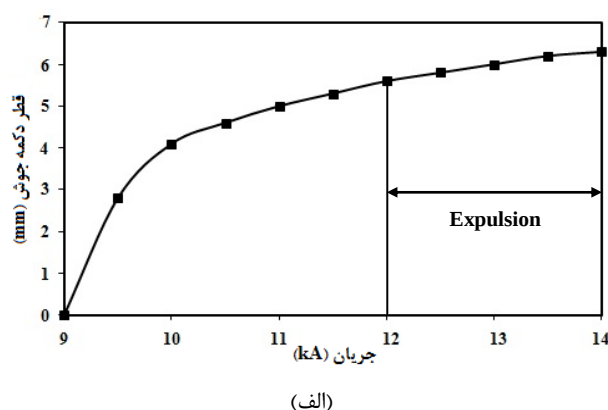
### نتیجه گیری

در این مقاله، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دو ورق فولادی کم کربن گالوانیزه IF و BH، پر کاربرد در صنعت خودروسازی مدلسازی شده است. به منظور بررسی توزیع دما و تشکیل دکمه جوش، از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمایشات تجربی مبین دقت خوب مدل المان محدود در پیش‌بینی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای است. کیفیت و استحکام اتصالات جوشکاری شده، تحت تأثیر هندسه و ابعاد دکمه جوش می‌باشد. از این رو به مطالعه تأثیر پارامترهای مهم جریان جوشکاری و زمان جوشکاری بر روی اندازه دکمه جوش پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش زمان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد ولی نرخ رشد دکمه جوش کاهش پیدا می‌کند که علت آن کاهش مقاومت تماسی و اتلاف حرارتی است. همچنین با افزایش جریان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد تا اینکه بیرون زدگی مذاب رخ می‌دهد. با توجه به اینکه تأثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش بیشتر از زمان جوشکاری است، برای دستیابی به اندازه دکمه جوش مناسب، افزایش جریان به جای افزایش زمان توصیه می‌شود.



شکل ۷: تأثیر زمان جوشکاری بر قطر و ضخامت دکمه جوش

جریان افزایش می‌یابد نرخ رشد دکمه جوش کاهش می‌یابد، با این حال اندازه دکمه جوش همچنان افزایش پیدا می‌کند تا اینکه بیرون زدگی مذاب رخ می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود کاهش نرخ رشد دکمه جوش با افزایش جریان نسبت به افزایش زمان کمتر است. به عبارت دیگر، نرخ رشد دکمه جوش بیشتر تحت تأثیر جریان جوشکاری است. شکل ۹ مقایسه بین تأثیر زمان و جریان جوشکاری را بر ابعاد دکمه جوش به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تأثیر جریان جوشکاری بر روی افزایش دما در مقایسه با زمان جوشکاری بیشتر است.



# مراجع

- [4] Ma, N., Murakawa, H.,2010. "Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets". Journal of Materials Processing Technology210, 2045-2052.
- [5] Eisazadeh, H., Hamed, M., Halvae, A.,2010. "New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method". Materials and Design31, 149-157.
- [6] Shen, J., Zhang, Y.,Lai, X., Wang, P.C., 2011. "Modeling of resistance spot welding of multiple stacks of steel sheets". Materials and Design32, 550-560.
- [1] Khan, J.A., Xu, L., Chao, Y., 2000. "Numerical simulation of resistance spot welding process". Numerical Heat Transfer, Part A 37 (5), 425-446.
- [2] Feulvarch, E.,Robin, V., Bergheau, J.M., 2004. "Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contact conditions". Journal of Materials Processing Technology 153-154, 436-441.
- [3] Hou, Z., Kim, I.S., Wang, Y., Li, C., Chen, C., 2007."Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process".Journal of Materials Processing Technology185, 160-165.