

توسعه و اصلاح مدل حرارتی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با پین خارج از مرکز

امیر غیاثوند^{۱*}، سوران حسنی فرد^۲، محمد زهساز^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱	جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد است. یکی از عوامل تأثیرگذار در خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال نهایی، هندسه ابزار می‌باشد که با طراحی صحیح آن می‌توان در نهایت به اتصالی با کیفیت بهینه دست یافت. از جمله اصلاحات و موارد مناسب برای بهبود خواص مکانیکی اتصال نهایی، خارج از مرکز کردن پین ابزار نسبت به شانه ابزار است. خارج از مرکز کردن پین موجب خواهد شد حرارت ایجاد شده در ناحیه بزرگ تری توزیع گردد و حجم ماده تغییر شکل یافته توسط پین ابزار افزایش یابد. در پژوهش حاضر با استفاده از روابط تحلیلی، به توسعه مدلی حرارتی برای ابزار با پین خارج از مرکز پرداخته شده است، مدل اصلاح شده، تابعی از ضریب اصطکاک و تنش تسلیم وابسته به دماست و در آن، تأثیر پارامترهای هندسی ابزار بر میزان حرارت تولیدی در فرایند، مورد نظر قرار گرفته است. پس از توسعه روابط، برای صحت‌سنجی مدل از شبیه‌سازی سه بعدی به واسطه پکیج اجزای محدود ABAQUS و کدنویسی شار حرارتی به زبان فرترن در قالب دو سابروتین USDFLD و DFLUX استفاده شده و نتایج توزیع دما از مدل توسعه داده شده با نتایج تجربی و تحلیلی مدل‌های پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است. براساس نتایج به دست آمده مدل حرارتی توسعه داده شده با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی توزیع حرارت و دمای ماکزیمم در فرایند FSW با ابزار دارای پین خارج از مرکز می‌باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳	
واژگان کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مدل حرارتی، هندسه ابزار، پین خارج از مرکز، شبیه‌سازی اجزای محدود.	

۱- مقدمه

کمتر و کیفیت مکانیکی بهتر اتصال است. پارامترهای تأثیرگذار در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دو دسته کلی پارامترهای فرایند و هندسه ابزار تقسیم‌بندی می‌شوند. تغییر در هر کدام از عوامل این دو دسته، سبب تغییر قابل توجهی در کیفیت اتصال نهایی خواهد شد. یکی از مشکلات و چالش‌های فرایند FSW در هنگام جوشکاری آلیاژهای آلومینیومی، تجمع حرارت بزرگ در ناحیه زیر شانه ابزار و ناحیه عبوری پین ابزار است که این توزیع و تمرکز حرارتی بسیار بزرگ موجب شکل‌گیری ذوب محلی در برخی از مناطق جوش می‌گردد و در نهایت سبب افت کیفیت مکانیکی اتصال در آن نواحی خواهد شد. از این رو

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یکی از روش‌های جوشکاری در دمایی پایین‌تر از دمای ذوب ماده است که اصطلاحاً به این روش‌ها اتصال حالت جامد اطلاق می‌شود [۱]. پس از گذشته چند دهه از ابداع این تکنیک، امروزه استفاده از آن در صنایع مختلف به منظور اتصال قطعات هم جنس و غیرهم جنس، نظیر آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای منیزیم، آلیاژهای تیتانیوم، فولادها و پلیمرها به طور روزافزون رواج یافته است [۲]. در مقایسه با سایر تکنیک‌های جوشکاری، FSW دارای مزایایی همچون تنش پسماند کمتر، ریزساختار مناسب‌تر، انرژی ورودی مورد نیاز

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Amir.Ghiasvand@Tabrizu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۳. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۱. Friction Stir Welding

محققان به دنبال راه کارهایی هستند که بتوان به وسیله آن توزیع حرارت را در منطقه ای وسیع تر و با تمرکز حرارتی کمتر اعمال کرد تا گرادیان توزیع دما در طول مناطق جوش با توزیعی مناسب تر و یکنواخت تر همراه باشد و امکان ایجاد عیوب فرایند به حداقل رسد [۲]. از جمله اصلاحات برای حل مشکل بیان شده، خارج از مرکز کردن پین ابزار نسبت به شانه ابزار است. با در نظر گرفتن مقدار اندکی خارج از مرکزی پین نسبت به شانه ابزار، حرارت ایجاد شده در فرایند در ناحیه بزرگ تری توزیع می شود و موجب خواهد شد حجم ماده تغییر شکل یافته توسط پین ابزار افزایش یابد. این توزیع حرارت یکنواخت تر و افزایش حجم جریان پلاستیک در یک حجم پین ثابت، سبب افزایش تغییرات ریزساختاری و دانه بندی مناسب تر در نواحی جوش می شود و در نهایت منجر به خواص مکانیکی مناسب تر اتصال خواهد شد [۲-۵].

هرچند در دو دهه اخیر، فرایند FSW به تکنیکی پرکاربرد در صنایع مختلف تبدیل شده است، همچنان نبود مدلی کارآمد برای محاسبه تحلیلی حرارت تولیدی توسط بخش های مختلف ابزار و برآورد توزیع حرارت در قطعه کار به عنوان نقیصه و چالشی کلیدی در زمینه استفاده از این تکنیک محسوب می شود. سطح مقطع جوش در فرایند FSW به سه بخش کلی منطقه اغتشاش^۱، منطقه تحت تأثیر کار مکانیکی و حرارتی^۲ و منطقه متأثر از حرارت^۳ تقسیم می شود [۵-۷]. شرایط توزیع حرارت و کرنش های پلاستیک متفاوت در این سه منطقه موجب می شود این سه بخش دارای تفاوت های عمده ای در زمینه خواص ریزساختاری و مکانیکی شوند [۸-۱۱]. بنا به دلایل ذکر شده، مدل سازی توزیع حرارت اعمالی در مناطق مختلف جوش، منجر به پیش بینی دقیق تری از توزیع دما در قطعه و خواص اتصال نهایی خواهد شد و در نهایت منجر به ایجاد اتصالی با کیفیت مناسب می گردد [۱۲-۱۴]. به دلیل نبود مدل تحلیلی کارآمد و همچنین هزینه بر و محدود بودن شرایط آزمایشگاهی، همچنان نیاز به بررسی و پژوهش در زمینه توسعه و ایجاد مدل ها و روابطی تحلیلی جدید برای پیش بینی شرایط حرارتی در فرایند FSW احساس می شود. محققان بسیاری به مطالعه و مدل سازی

تحلیلی و عددی شرایط تولید حرارت در فرایند FSW پرداخته اند. چائو و همکارانش [۱۵] از یک مدل سه بعدی المان محدود استفاده کردند که در آن فرض شده بود تمام حرارت تولیدی صرفاً در اثر اصطکاک بین سطوح ابزار و قطعه کار به وجود می آید و توزیع این حرارت در سطح به شکل شعاعی است. آن ها با استفاده از یک مدل حرارتی که در آن ضریب اصطکاک، ثابت فرض شده بود، به پیش بینی توزیع دمای قطعه کار پرداختند. فریگارد و همکارانش [۱۶] مدلی حرارتی بر اساس استفاده از یک ضریب اصطکاک ثابت ارائه و آن را توسط روش تفاضل محدود به شکل سه بعدی تحلیل کردند. برای تعیین مقدار تولید حرارت آن ها از مدل متداول تولید حرارت بر اساس اصطکاک استفاده کردند و ضریب اصطکاک ثابت برابر با ۰/۴ را انتخاب نمودند تا تولید حرارت ناشی از کار پلاستیک نیز در نظر گرفته شود. چن و همکارانش [۱۷] به بررسی و ایجاد یک مدل سه بعدی اجزای محدود برای برآورد و پیش بینی تولید حرارت و میدان دمایی ایجاد شده در قطعه کار FSW پرداختند. در پژوهش صورت گرفته، حرارت ایجاد شده توسط شانه به عنوان تنها عامل مورد بررسی در نظر گرفته شد و از حرارت تولیدی توسط پین ابزار و میزان حرارت جذب شده توسط ابزار صرف نظر گردید. سونگ و همکارانش [۱۸] مدلی بر اساس منبع حرارتی متحرک برای پیش بینی دمای ایجاد شده در قطعه کار طراحی کردند. در پژوهش آن ها هر دو منبع حرارت تولید شده توسط دیواره پین و شانه ابزار در نظر گرفته شد و در معادلات توسعه داده شده، مقدار ضریب اصطکاک و تنش تسلیم برشی، ثابت در نظر گرفته شدند. اشمیت و همکارانش [۱۹] به ارائه یک مدل تحلیلی برای بررسی حرارت به وجود آمده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AA2024 پرداختند. در مدل ارائه شده با استفاده از شرایط برهم کنش چسبندگی^۴ و لغزشی^۵، مدل سازی شرایط اصطکاکی میان ابزار و قطعه کار صورت پذیرفت. آن ها شرایط برهم کنش میان ابزار و قطعه کار را به سه صورت چسبندگی کامل، لغزشی کامل و چسبندگی/لغزش جزئی در نظر گرفتند. بر اساس کار صورت گرفته توسط آن ها مدل اصطکاکی در سه ناحیه متفاوت میان ابزار و قطعه کار طبقه بندی و تقسیم

⁴.sticking

⁵.sliding

¹.Stir Zone

².Thermo Mechanical Affected Zone

³.Heat Affected Zone

به دماست و در آن تأثیر همه پارامترهای ذکر شده بر میزان حرارت تولیدی، مورد نظر قرار گرفته و در روابط اصلاح شده اعمال گردیده است. جهت صحت‌سنجی مدل از شبیه‌سازی سه‌بعدی به‌واسطهٔ پکیج اجزای محدود ABAQUS و کدنویسی به زبان فرترن در قالب دو سابروتین USDFLD، DFLUX استفاده شده و نتایج توزیع دما از مدل توسعه‌داده‌شده با نتایج تجربی برای ابزار دارای پین خارج از مرکز، مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- توسعهٔ مدل حرارتی

عامل اصلی و شکل‌دهنده اتصال قطعات در فرایند FSW میزان حرارت تولیدی و نحوهٔ توزیع آن است. حرارت ایجادشده توسط اصطکاک و جریان‌های پلاستیک بزرگ مادهٔ ایجاد می‌شود، بر اساس مطالعات و مدل‌های توسعه‌داده‌شده، محققان بر این باورند که بخش اعظم و عمدهٔ حرارت تولیدشده در فرایند FSW متعلق به حرارت تولیدی بر اثر اصطکاک ایجادشده میان سطوح ابزار و قطعه کار است و سهم حرارت ایجادشده توسط کارپلاستیک به‌طور عمده صرف تغییر در ریزساختار مناطق مختلف جوش می‌شود و بخش اعظم انرژی حاصل از تغییرشکل پلاستیک مواد به شکل انرژی در ریزساختار ناحیهٔ اتصال ذخیره می‌گردد [۲۳ و ۲۴]. از این رو در مدل حاضر، حرارت تولیدی فرایند فقط به عامل اصطکاک و برهم‌کنش میان سطوح درگیر نسبت داده شده و از سهم حرارت تولیدی توسط جریان پلاستیک مواد صرف‌نظر شده است. ابزار در فرایند FSW سه مرحلهٔ متفاوت را از نظر برهم‌کنش اصطکاکی تجربه می‌کند: مرحلهٔ نفوذ، مرحلهٔ جوشکاری و مرحلهٔ خروج از قطعه کار [۲]. پس از مرحلهٔ نفوذ ابزار در قطعه کار، سه منطقهٔ تماسی متفاوت به وجود می‌آید که هرکدام از این مناطق، بخشی از حرارت تولیدشده را ایجاد می‌کند. منطقهٔ نخست که با نماد انرژی حرارتی Q_1 معرفی می‌شود، متعلق به انرژی حرارتی ایجادشده در اثر تماس و اصطکاک سطح شانه ابزار با سطح فوقانی قطعه کار پس از نفوذ کامل ابزار است. منطقهٔ دوم، سطح انرژی Q_2 را ایجاد می‌کند که دلیل ایجاد این منبع انرژی، اصطکاک و تماس دوباره پین ابزار با مادهٔ احاطه‌کنندهٔ پین می‌باشد. منطقهٔ سوم، متعلق به انرژی حرارتی Q_3 است که این منبع حرارتی در اثر تماس سطح تحتانی پین و قطعه کار ایجاد می‌شود [۲].

شد و در هر سه ناحیه، تنش تسلیم برشی و ضریب اصطکاک، ثابت فرض گردید. ریاحی و همکارانش [۲۰] به بررسی توزیع حرارت و برآورد دما در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیومی AA6061 پرداختند. در پژوهش انجام‌شده، دو منبع حرارتی تولیدی توسط کف پین و شانه ابزار به‌عنوان منابع ایجادکنندهٔ اصلی حرارت در نظر گرفته شد. گاداخ و همکارانش [۲۱] به ارائهٔ یک مدل تحلیلی برای برآورد حرارت در فرایند FSW با استفاده از یک پین مخروطی کوتاه‌شده پرداختند و تأثیرات زاویهٔ مخروطی پین بر دمای بیشینهٔ فرایند را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش صورت‌گرفته توسط آن‌ها ضریب اصطکاک به‌صورت ثابت فرض گردید و از مدل لغزش کامل برای سه ناحیهٔ متفاوت حرارتی استفاده شد. ائا و همکارانش [۲۲] به ارائهٔ یک مدل حرارتی در زمینهٔ پیش‌بینی دمای ماکزیمم فرایند در حالت استفاده از ابزار با پین خارج از مرکز پرداختند. در مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها در سه ناحیه تولید حرارت وجود برهم‌کنش لغزشی میان ابزار و قطعه کار فرض گردید و بر پایهٔ این فرض، تنش برشی به‌صورت وابسته به فشار واردشده از طرف ابزار در نظر گرفته شد. در مدل ارائه‌شده، ضریب اصطکاک در طول فرایند ثابت فرض گردید و از وابستگی آن به دمای لحظه‌ای فرایند صرف‌نظر شد.

مدل‌های نسبتاً متعددی در زمینهٔ مدل‌سازی منبع انتقال حرارت و پیش‌بینی توزیع دما در فرایند FSW توسط محققان توسعه داده شده است؛ اما در زمینهٔ ابزار دارای پین خارج از مرکز، فقط یک مدل حرارتی ارائه شده که مدل مذکور نیز دارای فرض‌های ساده‌کننده‌ای است. مدل‌های حرارتی موجود به‌طور عمده در پیش‌بینی توزیع دما در فرایند FSW به‌طور کامل موفق نیستند که دلیل عمدهٔ آن عدم توجه به همهٔ عوامل دخیل در فرایند و ثابت فرض کردن برخی پارامترهای مؤثر در فرایند است. در بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته مواردی همچون تأثیر تغییر ضریب اصطکاک با تغییر دما، تغییرات تنش تسلیم برشی با تغییر دما، عمق نفوذ، تأثیر نیروی اعمالی از طرف ابزار و مدل‌سازی همهٔ منابع حرارتی دخیل در فرایند به‌طور کامل و هم‌زمان مورد توجه قرار نگرفته است؛ از این رو در پژوهش حاضر با استفاده از روابطی تحلیلی به اصلاح مدلی حرارتی برای ابزار با پین خارج از مرکز پرداخته شده است. مدل اصلاحی، وابسته به ضریب اصطکاک و تنش تسلیم، وابسته

$$dQ = \omega r \tau_{Shear} dA \quad (5)$$

که در این رابطه، dQ دیفرانسیل حرارت تولیدی هر بخش، ω سرعت دورانی ابزار، r شعاع مؤثر در هر کدام از سه منطقه مختلف، τ_{Shear} تنش برشی ناشی از تماس ابزار و قطعه کار و dA دیفرانسیل سطح برهم کنش تماسی در هریک از سه منطقه مختلف تولید حرارت است. با استفاده از رابطه (۵) حرارت تولیدی منبع Q_1 بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$Q_1 = \int_0^{2\pi} \int_{R_{Pin}}^{R_{Shoulder}} \omega \tau_{Shear} r^2 (1 + \tan \alpha) dr d\theta \quad (6)$$

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{Shear} (R_{Shoulder}^3 - R_{Pin}^3) (1 + \tan \alpha)$$

که در این روابط، شعاع $R_{Shoulder}$ شعاع شانه ابزار و R_{Pin} شعاع پین ابزار است. برای منبع حرارتی Q_2 ایجادشده ناشی از تماس اصطکاکی دیواره پین نیز خواهیم داشت:

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_{Pin}} \omega \tau_{Shear} R_{Pin}^2 dz d\theta \quad (7)$$

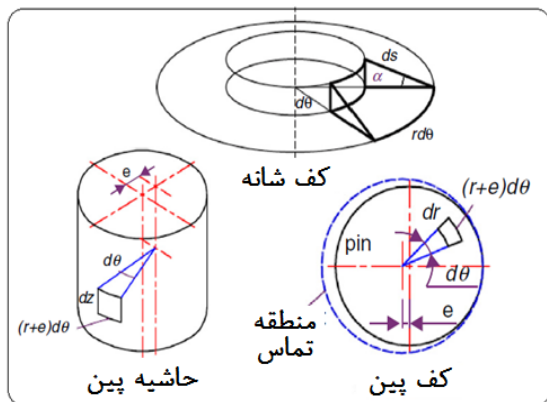
$$Q_2 = 2\pi \omega \tau_{Shear} R_{Pin}^2 H_{Pin}$$

که در آن، H_{Pin} ارتفاع پین ابزار است. همچنین برای ناحیه کف پین و منبع حرارت Q_3 روابط حرارت تولیدی بدین صورت خواهد بود:

$$Q_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{Pin}} \omega \tau_{Shear} r^2 dr d\theta \quad (8)$$

$$Q_3 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{Shear} R_{Pin}^3$$

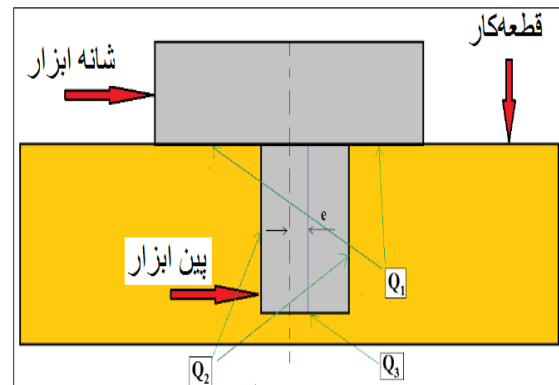
چنانچه از ابزار با خارج از مرکزی برابر با e استفاده شود، سطوح مؤثر اصطکاکی در سه منطقه حرارتی دچار تغییر می‌شوند. شماتیک سه منطقه محاسباتی ابزار با پین خارج از مرکز در شکل (۳) نمایش داده شده است. با بازنویسی روابط (۵) تا (۸) برای ابزار دارای پین خارج از



شکل ۳- مناطق سه‌گانه تولید حرارت ابزار خارج از مرکز

مرکز و حل انتگرال‌های ارائه شده در روابط مزبور، روابط مربوط به تولید حرارت برای سه ناحیه تماسی ابزار و قطعه

شکل (۱) شماتیک این سه منطقه تولید حرارت را برای یک ابزار با خارج از مرکزی پین به اندازه e نمایش داده است.



شکل ۱- منابع تولید حرارت در فرایند FSW

با توجه به فرض صورت گرفته مبنی بر عدم در نظر گرفتن حرارت ایجادشده ناشی از کار پلاستیک، انرژی حرارتی ورودی کل فرایند را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد که این انرژی حرارتی ورودی از دو عامل پین و شانه ابزار نشئت می‌گیرد و می‌توان سهم هر عامل را به ترتیب به صورت روابط (۲) تا (۴) در نظر گرفت.

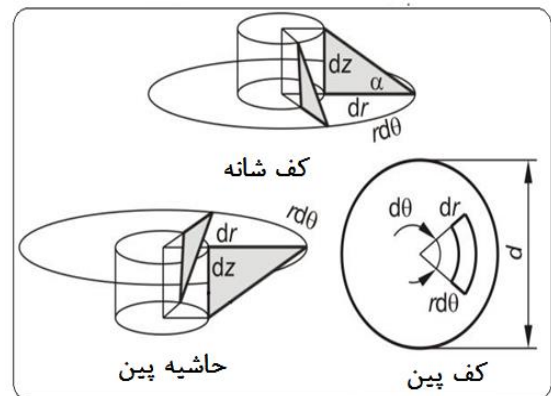
$$Q_{FSW} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

$$Q_{FSW} = Q_{Shoulder} + Q_{Pin} \quad (2)$$

$$Q_{Shoulder} = Q_1 \quad (3)$$

$$Q_{Pin} = Q_2 + Q_3 \quad (4)$$

بر اساس روابط مدل اشمیت، برای یک ابزار بدون خارج از مرکزی پین با شانه مخروطی با زاویه α و یک پین استوانه‌ای ساده، حرارت بر اثر تماس و برهم کنش در سطوحی سه‌گانه ایجاد خواهد شد که شماتیک محاسباتی این سطوح در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲- شماتیک مناطق سه‌گانه تولید حرارت [۱۹]

بر اساس مدل اشمیت برای محاسبه حرارت تولیدی هر سه منطقه، از رابطه اصلی زیر استفاده می‌شود:

برابر با مقداری ثابت و به صورت تابعی از سه پارامتر ضریب اصطکاک μ ، مساحت کل A_{Total} (مجموع مساحت شانه و کف پین) و نیروی عملی به ابزار در راستای ضخامت قطعه کار F_z بیان شده است. براساس فرض شرایط لغزش کامل در طول فرایند FSW، حرارت تولیدی کل به صورت رابطه (۱۷) به دست خواهد آمد.

$$\tau_{Shear} = \mu \frac{F_z}{A_{Total}} \quad (15)$$

$$A_{Total} = \pi R_{Shoulder}^2 \quad (16)$$

$$Q_{FSW (Sliding)} = \frac{2}{3} \omega \mu \frac{F_z}{R_{Shoulder}^2} [(R_{Shoulder}^3 - R_{Pin}^3) (1 + \tan \alpha) + ((R_{Pin} - e)^3 - e^3) + 3(R_{Pin} + e)^2 H_{Pin}] \quad (17)$$

از جمله مشکلاتی که در مدل‌های حرارتی فرایند FSW وجود داشته، عدم توجه به تغییرات تنش تسلیم برشی و ضریب اصطکاک براساس تغییر در دمای فرایند (دمای لحظه‌ای و محلی فرایند) است. در بیشتر مدل‌های مورد استفاده تاکنون شرایط اصطکاکی یا به صورت لغزشی مطلق یا چسبندگی مطلق در نظر گرفته شده است، حال آنکه با توجه به ماهیت فرایند و تغییرات و برهم‌کنش‌های متفاوت در مناطق سه‌گانه اصطکاکی می‌باید از مدلی ترکیبی و وابسته به زمان و موقعیت مکانی سطوح برهم‌کنش ابزار و قطعه کار استفاده کرد. با توجه به آزمایش‌ها و مطالعات صورت گرفته، شرایط اصطکاکی در منطقه اصطکاکی Q_1 و Q_2 به دلیل تمرکز حرارت موجود در این بخش و سطح دمای بالا و نزدیک به دمای ذوب ماده به صورت چسبندگی مطلق است و در منطقه Q_3 که متعلق به منطقه تماسی کف پین و قطعه کار می‌باشد، به دلیل فاصله زیاد از شانه عامل اصلی تولید حرارت است و دمای پایین‌تر این منطقه به صورت لغزشی می‌باشد [۲]. از طرف دیگر، در فرایند FSW میزان تنش تسلیم و ضریب اصطکاک، وابستگی شدیدی به تغییرات دما دارند و این دو پارامتر نیز باید به صورت میدانی و وابسته به دما تعریف شوند. از این رو به منظور رفع نقایص عنوان شده، در مدل حاضر از مدلی ترکیبی از لغزش و چسبندگی با وابستگی ضریب اصطکاک و تنش تسلیم به دمای لحظه‌ای و محلی فرایند استفاده شده است. براساس توضیحات ارائه شده، روابط مربوط به تنش برشی با فرض وابستگی دو پارامتر تنش تسلیم و ضریب اصطکاک به دمای محلی و لحظه‌ای فرایند T برای مناطق مختلف حرارتی، بدین صورت

کار در حالت استفاده از ابزار با پین خارج از مرکز به اندازه e منجر خواهد شد. برای بخش حرارتی تولید شده در ناحیه شانه، Q_1 خواهیم داشت:

$$Q_1 = \int_0^{2\pi} \int_{R_{Pin}+e}^{R_{Shoulder}} \omega \tau_{Shear} r^2 (1 + \tan \alpha) dr d\theta \quad (9)$$

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{Shear} (R_{Shoulder}^3 - (R_{Pin} + e)^3) (1 + \tan \alpha)$$

برای ناحیه Q_2 نیز این روابط بدین صورت بازنویسی می‌شود:

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_{Pin}} \omega \tau_{Shear} (R_{Pin} + e)^2 dz d\theta \quad (10)$$

$$Q_2 = 2\pi \omega \tau_{Shear} (R_{Pin} + e)^2 H_{Pin}$$

همچنین برای ناحیه کف پین و منبع حرارتی Q_3 رابطه برابر خواهد بود با:

$$Q_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{Pin}} \omega \tau_{Shear} (r + e)^2 dr d\theta \quad (11)$$

$$Q_3 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{Shear} [(R_{Pin} + e)^3 - e^3]$$

بر اساس روابط (۹) تا (۱۱) حرارتی تولیدی کل فرایند FSW برای ابزار با پین خارج از مرکز برابر خواهد بود با:

$$Q_{FSW} = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{Shear} [(R_{Shoulder}^3 - R_{Pin}^3) (1 + \tan \alpha) + ((R_{Pin} - e)^3 - e^3) + 3(R_{Pin} + e)^2 H_{Pin}] \quad (12)$$

کلیه پارامترهای این معادله غیر از τ_{Shear} پارامترهای ثابت مسئله در طول سیکل فرایند هستند. براساس مدل‌های حرارتی موجود، به طور عمده برای محاسبه τ_{Shear} در فرایند FSW از سه رویکرد متفاوت استفاده شده است. در برخی مدل‌های ارائه شده، از فرضی مبنی بر شرایط و برهم‌کنش اصطکاکی به صورت چسبندگی کامل در همه فصل مشترک های ابزار و قطعه کار استفاده شده است و پارامتر τ_{Shear} را ثابت و تابعی از تنش تسلیم ماده برابر با رابطه (۱۳) در نظر گرفته‌اند و بر این اساس، حرارت ورودی کل به صورت رابطه (۱۴) محاسبه گردیده است.

$$\tau_{Shear} = \frac{\sigma_{Yield}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

$$Q_{FSW} = \frac{2}{3} \pi \omega \frac{\sigma_{Yield}}{\sqrt{3}} [(R_{Shoulder}^3 - R_{Pin}^3) (1 + \tan \alpha) + ((R_{Pin} - e)^3 - e^3) + 3(R_{Pin} + e)^2 H_{Pin}] \quad (14)$$

که در این روابط، σ_{Yield} تنش تسلیم ماده قطعه کار است. در برخی دیگر از مدل‌های حرارتی ارائه شده (مانند مدل انا [۱۷]) از فرض چسبندگی کامل صرف نظر گردیده و بر وجود برهم‌کنش لغزشی مطلق در سطوح تماس مناطق سه گانه اصطکاکی ابزار و قطعه کار فرض شده است و τ_{Shear}

محاسبه خواهد شد:

$$\tau_{Shear}(Q_1) = \frac{\sigma_{yield}(T)}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$\tau_{Shear}(Q_2) = \frac{\sigma_{yield}(T)}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

$$\tau_{Shear}(Q_3) = \mu(T) \frac{F_z}{A_{Pin}} \quad (20)$$

رفع معایب ذکر شده در مدل حاضر، از بین روابط سه منبع حرارتی، منبع Q_1 به عنوان عامل ایجاد یک شار حرارتی سطحی به سطح قطعه کار در نظر گرفته خواهد شد که مکان هندسی توزیع این شار سطحی به صورت مساحت محصور میان شانه و پین ابزار است که به ترتیب این نواحی دارای شعاع‌هایی برابر با شعاع شانه و شعاع پین ابزار همراه با مقدار خارج از مرکزی e هستند. دو منبع دیگر Q_2 و Q_3 که منابع حرارتی ایجاد شده توسط پین ابزار هستند، به صورت عامل ایجاد کننده یک شار حجمی در حجم محصور شده پین ابزار به کار برده خواهند شد. با استفاده از این روابط، تأثیر هندسه و حجم اشغال شده توسط پین ابزار و خارج از مرکزی آن نیز بر حرارت تولیدی در فرایند FSW به عنوان یک عامل تأثیرگذار لحاظ خواهد شد و امکان مطالعه تأثیر هندسه‌ها و خارج از مرکزی‌های متفاوت پین بر میزان حرارت ورودی و توزیع دما در ناحیه جوش برای حالات متفاوت به وجود خواهد آمد. براساس توضیحات ارائه شده، روابط نهایی دو منبع حرارتی برای اعمال دو شار حرارتی حجمی و سطحی بر قطعه کار به صورت روابط (۲۴) و (۲۵) خواهد شد.

$$Q_{Pin} = 2\pi\lambda\omega\mu(T) \left[\frac{\sigma_{Yield}(T)}{\sqrt{3}\mu(T)} (R_{Pin} + e)^2 + \frac{F_z}{A_{Pin} H_{Pin}} ((R_{Pin} + e)^3 - e^3) \right] \quad (24)$$

$$Q_{Shoulder} = \frac{2}{3} \pi\lambda\omega \frac{\sigma_{Yield}(T)}{\sqrt{3}} (R_{Shoulder}^3 - (R_{Pin} + e)^3) (1 + \tan \alpha) \quad (25)$$

به غیر از دو پارامتر σ_{Yield} و μ که وابسته به دمای لحظه‌ای فرایند هستند، سایر پارامترهای موجود در روابط (۲۴) و (۲۵) ثابت‌اند. با استفاده از این دو رابطه و وابسته کردن دو پارامتر تنش تسلیم و ضریب اصطکاک به دما در حین شبیه‌سازی، می‌توان شرایطی در قرابت بالاتر با شرایط واقعی فرایند ایجاد کرد که در نهایت منجر به ایجاد نتایجی با دقت و صحت بالاتر خواهد شد.

۳- مدل اجزای محدود

به منظور بررسی صحت و دقت مدل توسعه داده شده برای ابزار با پین خارج از مرکز، از شبیه‌سازی عددی فرایند با استفاده از پکیج اجزای محدود ABAQUS بهره گرفته شد [۲۰]. از مقایسه نتایج عددی ماکزیمم دمای فرایند در

که در این روابط، پارامتر A_{Pin} معرف مساحت سطح مقطع پین ابزار است. براساس ماهیت فرایند و مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته توسط محققان، از مجموع حرارت تولیدی در اثر اصطکاک میان ابزار و قطعه کار در طول فرایند، بخشی توسط قطعه کار جذب و بخش دیگر توسط ابزار جذب خواهد شد که این حرارت دریافتی در ابزار و قطعه کار سبب افزایش دما در این دو بخش می‌گردد. در مدل حاضر، برای بررسی تأثیر میزان حرارت دریافتی توسط ابزار، از تعریف یک پارامتر با نام λ استفاده شده که مقدار آن از ۰ تا ۱ متغیر است. مقدار ۰ معرف حالتی است که هیچ حرارتی به قطعه کار منتقل نخواهد شد و مقدار ۱ معرف وضعیتی است که همه حرارت تولیدی توسط قطعه کار جذب شود. با در نظر گرفتن پارامتر λ و ورود این پارامتر، معادلات حرارت تولیدی سه منطقه مختلف را می‌توان به صورت جدید بازنویسی کرد.

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi\lambda\omega \frac{\sigma_{Yield}(T)}{\sqrt{3}} (R_{Shoulder}^3 - (R_{Pin} + e)^3) (1 + \tan \alpha) \quad (21)$$

$$Q_2 = 2\pi\lambda\omega \frac{\sigma_{Yield}(T)}{\sqrt{3}} (R_{Pin} + e)^2 H_{Pin} \quad (22)$$

$$Q_3 = \frac{2}{3} \pi\lambda\omega\mu(T) \frac{F_z}{A_{Pin}} [(R_{Pin} + e)^3 - e^3] \quad (23)$$

از عمده نواقص موجود در بیشتر مدل‌های تحلیلی، استفاده از یک شار حرارتی^۱ سطحی کلی (اعمال شده به سطح قطعه کار) است که این موضوع منجر به عدم اعمال حرارت به صورت ترکیبی از شارهای حجمی و سطحی در عمق قطعه کار می‌گردد. بی‌توجهی به این عامل، سبب خواهد شد نحوه توزیع حرارت در عمق قطعه کار با توزیع حرارت در شرایط واقعی به شدت دچار اختلاف شود و دما در سطح قطعه کار، رشد بزرگ‌تری را تجربه کند، در حالی که براساس مطالعات تجربی صورت گرفته، در عمق‌های میانی قطعه کار، چرخه‌های حرارتی نسبتاً بزرگی ایجاد می‌شود و دما افزایش قابل توجهی خواهد داشت [۲]. از این رو برای

^۱. Heat Flux

برای اطمینان از صحت مقدار انتخاب شده، چند مرحله شبیه سازی عددی برای حالت نخست از جدول ۱ با استفاده از مقادیر مختلف λ صورت پذیرفت و در نهایت مقدار 0.75 به عنوان بهترین حالت برگزیده و برای همه مراحل بعدی شبیه سازی به صورت ثابت در نظر گرفته شد. با استفاده از کدنویسی به زبان فرترن [۲۸]، محدوده ابعادی بین به صورت داده های ورودی در سابروتین DFLUX برای مشخص سازی حجم احاطه شده توسط پین برای اعمال فلاکس حرارتی حجمی به نرم افزار معرفی شد. برای پیاده سازی فرایند از یک گام حرارتی گذرا در نرم افزار بهره گرفته شد و زمان هر گام در هر وضعیت شبیه سازی با استفاده از سرعت حرکت خطی ابزار در همان مرحله محاسبه گردید. پس از گام حرارتی جوشکاری، در هر ۹ حالت شبیه سازی از یک گام حل پنج دقیقه ای برای مرحله خنک کاری استفاده شد. با توجه به روابط توسعه داده شده در پژوهش حاضر، از روابط مربوط به حرارت ورودی ایجاد شده توسط پین ابزار (رابطه (۲۴)) و حرارت ایجاد شده به واسطه شانه ابزار (رابطه (۲۵)) برای اعمال شارهای حرارتی حجمی و سطحی استفاده گردید. مطابق این روابط و کدنویسی در قالب سابروتین DFLUX دو شار حرارتی بر قطعه کار اعمال شد. یک شار حرارتی سطحی مطابق با حرارت ایجاد شده توسط شانه ابزار با استفاده از رابطه (۲۵) بر سطح فوقانی قطعه کار و یک شار حرارتی حجمی بر اساس رابطه (۲۴) و منبع حرارتی تولید شده توسط پین ابزار بر کل حجم قطعه کار اعمال گردید. برای اعمال این دو شار حرارتی به گونه ای کدنویسی صورت گرفت که بتوان میزان شارهای حرارتی اعمالی را وابسته به تنش تسلیم و ضریب اصطکاک وابسته به دمای لحظه ای و محلی فرایند و موقعیت مکانی تعریف کرد. جهت انجام این امر، از سابروتین USDFLD استفاده شد و با تعریف دو پارامتر تنش تسلیم و ضریب اصطکاک به صورت متغیرهای میدانی در سابروتین و فراخوانی این متغیرها در طول شبیه سازی وابستگی این پارامترها به دمای آبی فرایند انجام گرفت. شایان ذکر است از شبیه سازی مرحله نفوذ و خروج ابزار صرف نظر شد و فقط مرحله جوشکاری و حرکت خطی ابزار در راستای خط جوش مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با لینک کردن کدهای نوشته شده و نرم افزار، تحلیل عددی مسئله صورت پذیرفت. با توجه به روابط ارائه شده و حل حرارتی مسئله، علاوه بر تعریف خواص عمومی و حرارتی قطعه کار به تعریف

سرعت های جوشکاری متفاوت و خارج از مرکزی های متفاوت پین ابزار با نتایج تجربی موجود در پیشینه پژوهش به عنوان عاملی جهت صحت سنجی مدل اصلاح شده استفاده گردید و همچنین نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از مدل اثا مقایسه شد. داده های تجربی اعم از هندسه ابزار، پارامترهای فرایند و جنس قطعه کار براساس پژوهش صورت گرفته توسط اثا و همکارانش [۲۲] در نظر گرفته شد و براساس شرایط آزمایشگاهی ارائه شده در پژوهش آنها شبیه سازی های عددی صورت پذیرفت.

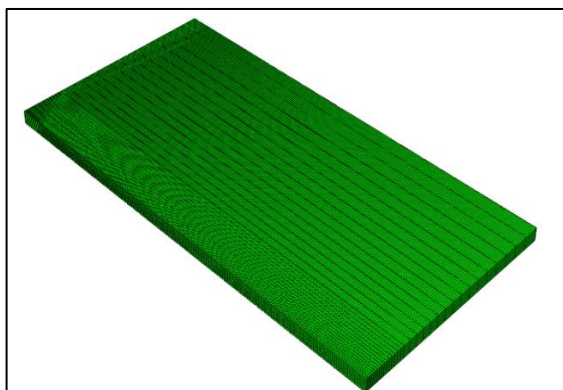
هندسه و جنس ماده مورد استفاده در فرایند FSW مطابق با کار تجربی صورت گرفته از جنس آلیاژ آلومینیوم AA5754 در نظر گرفته شد. بدین منظور بنابر شرایط تقارن فرایند، نیمی از قطعه کار کلی در شبیه سازی با ابعاد $5 \times 100 \times 200$ میلی متر استفاده شد. ابزار مورد استفاده در کار تجربی دارای یک شانه با قطر 19 میلی متر همراه با یک پین استوانه ای با قطر 6 میلی متری است. سرعت دورانی ابزار در همه حالات مورد بررسی، ثابت و برابر با 600 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. فرایند در سه سرعت جوشکاری 100 ، 300 و 500 دور بر دقیقه و سه میزان خارج از مرکزی 0 ، 0.2 و 0.8 میلی متر شبیه سازی شد که مجموعاً 9 مدل برای شبیه سازی آماده شد. در جدول ۱ حالات مورد بررسی و پارامترهای فرایند هر وضعیت نمایش داده شده است.

جدول ۱- حالات مورد شبیه سازی

وضعیت	سرعت دورانی	سرعت جوشکاری	خارج از مرکزی
	rpm	mm/min	mm
A	600	100	0
B	600	300	0
C	600	500	0
D	600	100	0.2
E	600	300	0.2
F	600	500	0.2
G	600	100	0.8
H	600	300	0.8
I	600	500	0.8

با توجه به تعریف پارامتر λ و عدم نیاز به مدل سازی تغییرات حرارتی ابزار در طول فرایند، از مدل سازی هندسی ابزار صرف نظر شد و صرفاً براساس پیشینه پژوهش و مطالعات تجربی و عددی صورت گرفته، مقدار پارامتر λ برابر با 0.75 تعریف گردید [۲۶ و ۲۷]. شایان ذکر است

توجه به نتایج مشخص گردید که مدل با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی دمای ماکزیمم فرایند است.



شکل ۴- شبکه‌بندی مدل قطعه‌کار

۴- نتایج و بحث

شبیه‌سازی عددی فرایند FSW آلیاژ AA5754 با استفاده از مدل اصلاح‌شده و با استفاده از کدنویسی به زبان فرترن در قالب دو سابروتین DFLUX و USDFLD انجام شد. هر ۹ مدل مورد اشاره در جدول ۱ تحت فرایند شبیه‌سازی با استفاده از تکنیک بیان‌شده قرار گرفتند. در جدول ۳ نتایج دمای ماکزیمم حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و نتایج تجربی و نتایج مدل انا برای این حالات نمایش داده شده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج دمای ماکزیمم حالات متفاوت

وضعیت	نتایج تجربی	نتایج مدل	نتایج مدل
	[۲۲] C°	انا [۲۲] C°	حاضر C°
A	۴۴۰	۴۶۴,۵	۴۴۷,۲
B	۳۷۰	۳۷۲,۳	۳۷۵,۱
C	۳۴۵	۳۴۶,۵	۳۴۴,۴
D	۴۲۵	۴۵۱,۸	۴۳۲,۶
E	۳۵۵	۳۴۵,۴	۳۵۴,۴
F	۳۳۵	۳۱۶,۲	۳۳۶,۵
G	۳۷۰	۴۱۵,۴	۳۶۱,۲
H	۳۱۵	۲۹۹,۷	۳۲۸,۶
I	۲۸۰	۲۶۲,۲	۲۸۸,۳

دلیل این دقت بالا را می‌توان توجه مدل اصلاح‌شده به پارامترهای وابسته به دمای لحظه‌ای فرایند، نظیر ضریب اصطکاک و تنش تسلیم قطعه‌کار و استفاده از دو شار حرارتی سطحی و حجمی به صورت توأم دانست که موجب شده است نتایجی با درصد اطمینان بالاتر حاصل شود. با

تنش تسلیم آلیاژ AA5754 نیز به صورت وابسته به دما نیاز خواهد بود، در جدول ۲ خواص حرارتی و تنش تسلیم وابسته به دمای آلیاژ نمایش داده شده است.

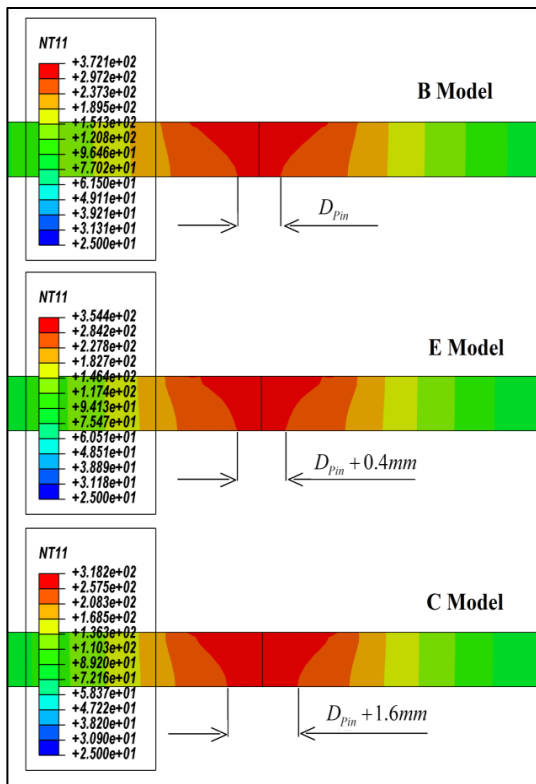
جدول ۲- خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ AA5754 [۲۹] و [۳۰]

تنش تسلیم	گرمای ویژه	رسانش حرارتی	چگالی	دما
MPa	J/Kg.C°	W/m.C°	Kg/m3	C°
۱۶۰	۹۰۰	۱۲۵	۲۶۷۰	۲۰
۱۴۸	۹۷۴	۱۳۲	۲۶۴۵,۱	۱۰۰
۱۳۰	۱۰۳۹	۱۴۱	۲۶۲۹,۴	۲۰۰
۷۵	۱۰۸۱	۱۵۳	۲۶۱۱,۵	۳۰۰
۲۹	۱۱۳۶	۱۶۰	۲۵۸۹,۳	۴۰۰
۱۹	۱۱۷۸	۱۷۵	۲۵۶۷	۵۰۰
۱۰	۱۲۶۱	۱۹۳	۲۵۴۹,۲	۶۰۰

مقادیر ضریب اصطکاک وابسته به دما براساس مقادیر ارائه‌شده در پیشینه پژوهش به نرم‌افزار معرفی شد. تغییرات این پارامتر با افزایش دما در طول فرایند به صورت نزولی است و از ماکزیمم مقدار ۰/۴ در دمای اتاق تا مینیمم مقدار ۰/۰۱ در دمای ذوب آلیاژ کاهش می‌یابد [۳۱]. برای اعمال شرایط مرزی حرارتی مدل از ضریب‌های انتقال حرارت جابه‌جایی مختلف برای بخش‌های متفاوت قطعه‌کار استفاده شد [۳۲]. با توجه به عدم مدل‌سازی سندان^۱، از یک ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مجازی نسبتاً بزرگ برابر با ۳۰۰ W/m²K برای این بخش (بخش تحتانی قطعه کار) استفاده گردید [۳۲]. برای سایر وجوه قطعه‌کار از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برابر با ۳۰ W/m²K بهره گرفته شد. دمای اولیه قطعه‌کار برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی مدل از ۴۲۷۴۰ المان از خانواده DCC3D8 استفاده شد که این المان‌ها، المان‌هایی آجری دارای ۸ گره و دارای قابلیت Convection/Diffusion هستند. جهت بهبود کیفیت نتایج، پس از آنالیز حساسیت به مش، شبکه‌بندی مدل به ترتیبی صورت گرفت که در ناحیه خط جوش چگالی المان‌ها افزایش یابد. بدین منظور از ۸ المان در راستای ضخامت قطعه‌کار بهره گرفته شد تا توزیع حرارت در منطقه جوش با دقت بالاتری پیش‌بینی شود. در شکل (۴) شبکه‌بندی اعمال‌شده بر مدل نمایش داده شده است. با

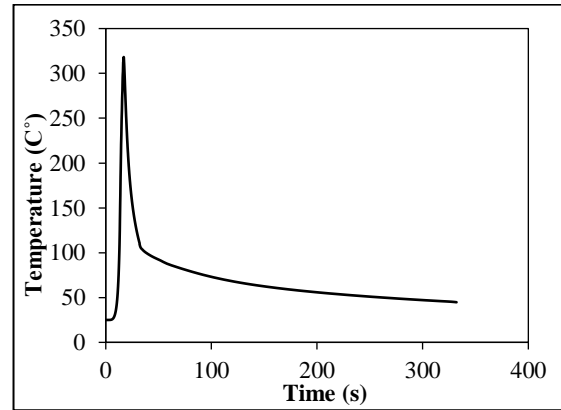
^۱. Anvil

پیش‌بینی توزیع دمایی صحیح و منطبق با شرایط واقعی در عمق قطعه‌کار فرایند FSW با ابزار خارج از مرکز است. با توجه به اینکه در مدل حاضر از دو شار حرارتی متفاوت سطحی و حجمی برای شبیه‌سازی منبع حرارتی اعمال شده توسط شانه و پین ابزار استفاده گردیده است، توزیع حرارت و دما حاصل از شبیه‌سازی عددی در سطح و عمق قطعه کار با قرابت بالاتری با شرایط واقعی خواهد بود و با استفاده از این توزیع دمایی صحیح، نواحی متفاوت در سرتاسر سطح مقطع جوش قابل‌پیش‌بینی و اندازه‌گیری است. در شکل ۷ کانتور توزیع دما در سطح مقطع جوش برای سه حالت پین بدون خارج از مرکزی (مدل B)، پین با خارج از مرکزی ۰/۸ میلی‌متر (مدل E) و پین با خارج از مرکزی ۰/۲ میلی‌متر (مدل H) نمایش داده شده است. با توجه به کانتورهای نمایش‌داده‌شده در این شکل می‌توان نتیجه گرفت که مدل اصلاح‌شده حاضر نه تنها در پیش‌بینی و برآورد دمای ماکزیمم فرایند، بلکه در پیش‌بینی نحوه و الگوی توزیع دما در حالت استفاده از پین خارج از مرکز در عمق قطعه‌کار نیز موفق بوده است.

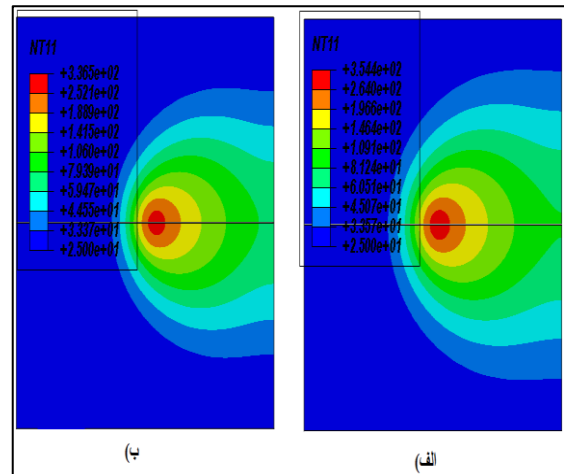


شکل ۷- کانتور دما مقطع جوش سه خارج از مرکزی متفاوت با توجه به شکل (۷) با افزایش میزان خارج از مرکزی پین ابزار، مکان هندسی توزیع حرارت در منطقه وسیع‌تری اعمال می‌شود و این وسعت منطقه اعمال حرارت منجر به کاهش تمرکز حرارت

توجه به اینکه پیش‌بینی دما در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به پیش‌بینی وضعیت تنش، کرنش و جریان مواد در طول فرایند می‌گردد، اهمیت استفاده از روابط توسعه‌داده‌شده، بیش از پیش مشخص خواهد شد. به عنوان نمونه در شکل (۵) تاریخچه زمانی دمایی حالت شبیه‌سازی H و در شکل (۶) کانتور توزیع دمایی در سطح قطعه‌کار مربوط به دو وضعیت شبیه‌سازی E و F نمایش داده شده است.



شکل ۵- تاریخچه زمانی دمایی یکی از نقاط مدل H



شکل ۶- کانتور دمایی سطح قطعه‌کار: الف. مدل E، ب. مدل F براساس کانتورهای توزیع دمایی نمایش‌داده‌شده در شکل‌های (۵) و (۶)، به دلیل حضور شانه ابزار (اعمال شار حرارتی سطحی به نمایندگی از شانه ابزار) در سطح فوقانی قطعه‌کار و برهم‌کنش حرارتی موجود در این ناحیه و با توجه به اینکه بخش اعظم حرارت ورودی به فرایند توسط شانه ابزار تولید می‌شود، ماکزیمم دمایی فرایند در سطح قطعه کار حادث شده که این نحوه توزیع دمایی حاصل از شبیه‌سازی عددی، منطبق بر مطالعات و یافته‌های تجربی است [۲].

از جمله مزایا و نکات قابل‌تأمل در استفاده از مدل حاضر،

برپایه تعریف روابطی جدید براساس وابستگی تنش تسلیم و ضریب اصطکاک به دمای لحظه‌ای فرایند، دقت پیش‌بینی حرارت تولیدی در هر لحظه و هر موقعیت از قطعه‌کار افزایش قابل توجهی یافت.

با تعریف و استفاده از دو شار سطحی و حجمی به‌ترتیب برای مدل‌سازی حرارت تولیدی توسط شانه و پین ابزار، توزیع حرارتی و پیش‌بینی دقیق‌تری از دمای پیک فرایند و الگوی توزیع دما در سطح مقطع جوش در فرایند FSW با ابزار دارای پین خارج از مرکز حاصل شد و امکان بررسی تأثیر میزان خارج از مرکزی پین بر الگوی توزیع دما در مقطع جوش به دست آمد.

براساس نتایج به‌دست‌آمده، مشخص گردید که با استفاده از یک شار حجمی و اعمال آن در محدوده حجمی پین ابزار، اعمال حرارت در عمق قطعه‌کار به شکل صحیح‌تر و مناسب‌تری روی خواهد داد و قابلیت بررسی دقیق تأثیر هندسه پین ابزار بر میزان حرارت تولیدی و توزیع دما در سطح مقطع جوش میسر خواهد شد.

بر اساس نتایج مشخص شد که با افزایش میزان خارج از مرکزی پین ابزار، مکان هندسی توزیع حرارت در منطقه وسیع‌تری اعمال می‌شود و این وسعت منطقه اعمال حرارت منجر به کاهش تمرکز حرارت در منطقه مرکزی جوش شده، درنهایت موجب خواهد شد سطح دمای ماکزیمم در فرایند در شرایط استفاده از ابزار خارج از مرکز کاهش یابد.

در مرکز جوش می‌گردد و درنهایت موجب خواهد شد سطح دمای ماکزیمم در فرایند در شرایط استفاده از ابزار خارج از مرکز کاهش یابد.

با توجه به صحت و دقت نتایج ارائه‌شده مشخص گردید که مدل حرارتی توسعه‌داده‌شده در متن حاضر و تکنیک استفاده‌شده برای شبیه‌سازی عددی فرایند FSW دارای کیفیت و کارایی بسیار بالایی جهت مدل‌سازی حرارتی فرایند است و با استفاده از توزیع دمایی حاصل از این روش می‌توان در ادامه شرایط، تحلیل تنش-کرنش مناسبی از مناطق مختلف قطعه‌کار به عمل آورد.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک مدل تحلیلی اصلاح‌شده و وابسته به ضریب اصطکاک و تنش تسلیم وابسته به دمای لحظه‌ای و محلی فرایند به‌منظور مدل‌سازی تولید حرارت در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دارای پین خارج از مرکز توسعه داده شد. سپس با استفاده از روابط به‌دست‌آمده، شبیه‌سازی عددی فرایند FSW با استفاده از کد اجزای محدود ABAQUS و به‌کارگیری دو سابروتین DFLUX و USDFLD به‌منظور پیش‌بینی توزیع دمای قطعه‌کار صورت گرفت.

با مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی و تحلیلی مشخص گردید که مدل توسعه‌داده‌شده به‌خوبی و با دقت بالا قادر به پیش‌بینی و برآورد دمای ماکزیمم و الگوی توزیع دما در فرایند FSW با ابزار دارای پین خارج از مرکز است.

مراجع

- [1] W. Thomas, E. Nicholas, J.C. Needham, M. Murch, P. Templesmith and C. Dawes, 1991, "Friction stir welding", International patent application No. PCT/GB92102203 and Great Britain patent application, 1991, No. 9125978.8.
- [2] R.S. Mishra, P.S. De and N. Kumar, Friction stir welding and processing: science and engineering. Springer, 2014.
- [3] S. Amini, M. Amiri and A. Barani, "Investigation of the effect of tool geometry on friction stir welding of 5083-O aluminum alloy", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 76, No. 1-4, 2015, pp. 255-261.
- [4] M. Ahmed, S. Ataya, M.E.-S. Seleman, H. Ammar and E. Ahmed, "Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 242, 2017, pp. 77-91.

[۵] عباس هنربخش رئوف و احسان غریبشاهیان، «شبیه‌سازی المان محدود جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی و تأثیر پارامترهای مؤثر بر آن در آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱-۹.

- [۶] منصور مردعلی زاده، محمد رضا سلیمانی یزدی، محمد علی صفرخانیان، «مدل سازی تجربی و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با استفاده از روش سطح پاسخ»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۱۰۳-۱۱۶.
- [۷] محمد صدیقی، فرشاد نظری و داود افشاری، «بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر اندازه دگمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱-۹.
- [8] M.D. Nouri and H. Hatami, "Experimental and numerical study of the effect of longitudinal reinforcements on cylindrical and conical absorbers under impact loading", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 7, No. 2, 2014, p. 199.
- [9] M. Shariati, H. Hatami, H. Eipakchi, H. Yarahmadi and H. Torabi, "Experimental and numerical investigations on softening behavior of POM under cyclic strain-controlled loading", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 50, No. 15, 2011, pp. 1576-1582.
- [10] M. Shariati, H. Hatami and M.D. Nouri, "Experimental investigations on the softening and ratcheting behaviors of steel cylindrical shell under cyclic axial loading", *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 2, 2013, pp. 11-22.
- [۱۱] روح‌الله وحدتی و مهرداد عضو امینیان، «شبیه‌سازی جوش نقطه‌ای مقاومتی به روش MLPG جهت تعیین تنش‌های حرارتی- مکانیکی و تنش‌های پسماند»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۴، پاییز ۱۳۹۲، صفحه ۶۳-۷۵.
- [۱۲] فرهاد حاجی ابوطالبی و شهریار محققیان، «شبیه‌سازی عددی فرایندهای ماشین‌کاری با استفاده از معیار آسیب برشی هویپوترا»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۰۱-۱۰۹.
- [13] B. Meyghani, M. Awang, S.S. Emamian, M. Nor, M. Khalid and S.R. Pedapati, "A comparison of different finite element methods in the thermal analysis of Friction Stir Welding (FSW)", *Metals*, Vol. 7, No. 10, 2017, p. 450.
- [14] A. Ghiasvand and S. Hassanifard, "Numerical simulation of FSW and FSSW with pinless tool of AA6061-T6 Al alloy by CEL approach", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 3, 2018, pp. 65-75.
- [15] Y.J. Chao, X. Qi and W. Tang, "Heat transfer in friction stir welding—experimental and numerical studies", *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 125, No. 1, 2003, pp. 138-145.
- [16] Ø. Frigaard, Ø. Grong and O. Midling, "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys", *Metallurgical and materials transactions A*, Vol. 32, No. 5, 2001, pp. 1189-1200.
- [17] C. Chen and R. Kovacevic, "Finite element modeling of friction stir welding—thermal and thermomechanical analysis", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 13, 2003, pp. 1319-1326.
- [18] M. Song and R. Kovacevic, "Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 6, 2003, pp. 605-615.
- [19] H. Schmidt, J. Hattel and J. Wert, "An analytical model for the heat generation in friction stir welding", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 12, No. 1, 2003, p. 143.
- [20] M. Riahi and H. Nazari, "Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1-4, 2011, pp. 143-152.
- [21] V.S. Gadakh and K. Adepu, "Heat generation model for taper cylindrical pin profile in FSW", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 2, No. 4, 2013, pp. 370-375.
- [22] A.R.S. Essa, M.M.Z. Ahmed, A.-K.Y.A. Mohamed and A.E. El-Nikhaily, "An analytical model of heat generation for eccentric cylindrical pin in friction stir welding", *Journal of Materials Research and technology*, Vol. 5, No. 3, 2016, pp. 234-240.
- [23] M. Russell and H. Shercliff, "Analytical modelling of microstructure development in friction stir welding", 1999.
- [24] P.A. Colegrove, "3 Dimensional flow and thermal modelling of the friction stir welding process", University of Adelaide, Department of Mechanical Engineering, 2001.

- [25] H. Hibbit, B. Karlsson and E. Sorensen, "ABAQUS user manual, version 6.12", Simulia, Providence, RI, 2012.
- [26] R. Nandan, G. Roy, T. Lienert and T. DebRoy, "Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, No. 5, 2006, pp. 526-537.
- [27] R. Nandan, G. Roy, T. Lienert and T. Debroy, "Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel", *Acta materialia*, Vol. 55, No. 3, 2007, pp. 883-895.
- [28] S.J. Chapman, *Fortran 90/95 for scientists and engineers*. McGraw-Hill, Inc., 2003.
- [29] L. MatWeb, "MatWeb: Material Property Data", [línea]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx>, 2013.
- [30] C.-Q. Huang and L.-I. Liu, "Application of the Constitutive Model in Finite Element Simulation: Predicting the Flow Behavior for 5754 Aluminum Alloy during Hot Working", *Metals*, Vol. 7, No. 9, 2017, p. 331.
- [31] S.B. Aziz, M.W. Dewan, D.J. Huggett, M.A. Wahab, A.M. Okeil and T.W. Liao, "Impact of Friction Stir Welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 29, No. 9, 2016, pp. 869-883.
- [32] F. Al-Badour, N. Merah, A. Shuaib and A. Bazoune, "Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 8, 2013, pp. 1433-1439.