

شبیه‌سازی حرارتی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ به آلومینیوم ۵۰۸۳

بهزاد صادقیان*، مسعود عطاپور و ابوذر طاهری‌زاده
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۹/۲۸)

چکیده - جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از روش‌های بسیار کاربردی در اتصال فلزات غیرمشابه است. در این پژوهش به شبیه‌سازی توزیع حرارت در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ به آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از روش المان محدود پرداخته شده است. حل حرارتی برای این مسئله از دو روش حل حالت پایدار و نیز حل حالت گذرا استفاده شده و دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. قابل ذکر است که، به‌منظور اعتبارسنجی مدل، ورق‌های فولاد زنگ‌زن و آلومینیوم آماده‌سازی شده و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفته است. به‌علاوه با به‌کار بردن ترموکوپل بر قطعات، تاریخچه دمایی نقاط حین جوشکاری برای دو فلز به‌دست آمد. پس از آن، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرارتی با نتایج آزمایشگاهی حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این اتصال مقایسه و اعتبارسنجی شد. در پایان با ساخت یک مدل شبکه عصبی، تأثیر پارامترهای ورودی فرایند جوشکاری بر حداکثر دمای زیر ابزار بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روش المان محدود، اتصال غیرمشابه، حل حالت گذرا، حل حالت پایدار، شبکه عصبی مصنوعی.

Thermal Simulation of Friction Stir Welding in 304 Stainless Steel to 5083 Aluminum Dissimilar Joint

B. Sadeghian*, M. Ataapour and A. Taherizadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract: Friction stir welding is of the most applicable methods to join dissimilar metals. In this study, the thermal distribution during the joining of 304 stainless steel and 5083 aluminum alloy by friction stir welding method was simulated by the finite element method. Both, transient and stationary thermal solutions were used in the simulations and the two methods were compared correspondingly. To verify the model, two sheets of stainless steel and aluminum were prepared and the friction stir welding was applied. Additionally, by using thermocouples temperature, the history of points on the sheets was obtained

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.sadeghian@ma.iut.ac.ir

during welding. Then, the simulation and the experimental results were compared to validate the model. Finally, an artificial neural network model was created and the effect of different input parameters on the maximum temperature under the tool was investigated.

Keywords: Friction stir welding, Finite element method, Dissimilar joint, Transient solution, Stationary solution, Artificial neural network.

فهرست علائم

پارامتر لغزش	S	مساحت کل زیر ابزار (m^2)	A_t
دما (K)	T	ضریب استفان-بولتزمن	B
دمای محیط (K)	T_b	ظرفیت حرارتی (J/Kg.K)	C_p
سرعت خطی (m/s)	U	پارامتر حرارت اصطکاکی	F
سرعت مماسی (m/s)	V_0	نسبت حرارت ورودی به قطعه	f
پارامتر چسبندگی	δ	ضریب همرفت ($W/m^2.K$)	h
ضریب نشر	ϵ	ضریب انتقال حرارت (W/m^2)	k
زاویه از خط مرکزی جوش (درجه)	θ	حرارت انتقالی از کف ($W/m^2.s$)	Q_b
ضریب اصطکاک	μ	حرارت انتقالی از سطح ($W/m^2.s$)	Q_s
چگالی (Kg/m^3)	ρ	حرارت تولید ورودی ($W/m^2.s$)	\dot{Q}
تنش تسلیم برشی (MPa)	τ	شعاع پین (m)	r_p
ثابت پیشران	ψ	شعاع شانه (m)	r_s

۱- مقدمه

فازی، ریزساختاری و تنش‌های باقی‌مانده در قطعه کار ایجاد می‌شود، لزوم شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بسیار احساس می‌شود. از جمله مهم‌ترین شبیه‌سازی‌هایی که در این فرایند صورت گرفته است می‌توان به شبیه‌سازی توزیع حرارت، حرارتی- مکانیکی، حرارتی- میکروساختاری و سیلان ماده اشاره کرد. در بین شبیه‌سازی‌های ذکر شده، شبیه‌سازی توزیع حرارت از اهمیت به مراتب بالاتری برخوردار است چرا که تمامی شبیه‌سازی‌های دیگر به شدت وابسته به نحوه توزیع دما در قطعه هستند [۱].

روش اجزا محدود، روشی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط‌های پیوسته است. ایده کلی این روش، جایگزین کردن مسئله اصلی با مسئله ساده‌تر است و در فرمول‌بندی ساده شده یا به عبارت دیگر فرمول‌بندی جبری از المان محدود استفاده شده است. اگر بتوان مسئله ساده‌تر را حل

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که یک ابزار چرخشی غیرمصرفی داشته که از دو قسمت شانه و پین تشکیل شده است. ابزار فرایند با چرخش و وارد شدن به دو ورقی که محکم کنار هم قرار گرفته‌اند، تولید اصطکاک و حرارت کرده و اتصال را ایجاد می‌کند. در این فرایند عمل اتصال توسط ابزار چرخشی و پین موجود در سر آن صورت می‌گیرد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال ۱۹۹۱ در موسسه جوشکاری انگلستان (TWI) ابداع و گسترش این فرایند توسط لاکهید مارتین در سال ۱۹۹۵ صورت گرفت [۱].

شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSW) مسئله بسیار مهمی است که از مدت‌ها همواره مدنظر محققان بوده است. با توجه به تأثیرات مهمی که تغییرات دمایی و سیلانی ماده حین جوشکاری FSW دارد و از پس آن تغییرات

این پژوهش با پژوهش‌های پیشین تفاوت عمده دارد اصلاح معادله حرارتی استفاده شده برای جوشکاری FSW غیرمشابه است که دقت مدل را نسبت به معادلات پیشین بالاتر می‌برد. قابل ذکر است که دو روش حل حالت پایدار و نیز حل حالت گذرا مورد بحث واقع شده و مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از تست‌های عملی مقایسه و کارایی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از آن یک مدل شبکه عصبی روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اعمال شد تا الگوریتمی برای رابطه بین متغیرهای ورودی این فرایند با دمای حداکثر ایجاد شده در منطقه جوش به دست آید.

۲- مدل عددی

۲-۱- توزیع گرما و معادله انتقال حرارت

با استناد به معادله فوریه، گرمایی که در اثر اصطکاک بین قطعه و ابزار و نیز حرارت ناشی از تغییر فرم پلاستیک شدید ایجاد می‌شود با توجه ویژگی‌های حرارتی قطعه از جمله ضریب انتقال حرارت، ظرفیت حرارتی و چگالی قطعه مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید. این رابطه برای حل در حالت گذرا (وابسته به زمان) در نظر گرفته می‌شود:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_{imp} \quad (1)$$

همچنین در این تحقیق یک حل حالت پایدار نیز برای این جوشکاری در نظر گرفته شده است. در این حل زمان تغییر نمی‌کند اما در عوض یک پارامتر سرعت در جهت x در معادله وارد می‌شود. مزیت این حل نسبت به حالت گذرا زمان پایین‌تر حل آن است:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial x_i} = -\rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

در روابط فوق، k ضریب انتقال حرارت در جهات x, y, z (W/m^2)، ρ چگالی (kg/m^3)، C_p ظرفیت حرارتی ($J/kg K$) است. به علاوه ترم Q (W/m^2) شامل مجموع حرارت‌های ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه و نیز حرارت ناشی از تغییر فرم پلاستیک شدید در واحد حجم بر ثانیه است.

کرد، و جواب‌های به دست آمده با تقریب خوب مبین جواب‌های واقعی خواهند بود [۲]. این روش در پژوهش‌های پیشین، روش مناسبی برای مدل‌سازی مسائل جوشکاری از جمله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است.

مدل حرارتی از اواخر دهه ۹۰ میلادی یکی از بحث‌های اساسی در فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی بوده است. یکی از مهم‌ترین دلایل این موضوع، تابعیت مستقیم بسیاری از خواص جوش از جمله خواص مکانیکی و متالورژیکی از سابقه دمایی قطعه کار است. به علاوه، فرایند جوشکاری اغتشاشی خود تأثیرپذیری بالایی از گرمای تولید شده و جریان حرارت دارد. در سال ۱۹۹۸، اندازه‌گیری حرارت در فرایند FSW توسط مک کلور و همکاران انجام شد. چالش اصلی در شبیه‌سازی این فرایند ارائه یک معادله مناسب برای حرارت ورودی این فرایند است. در این راستا از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴، پژوهشگران زیادی مدل‌های متعددی برای این فرایند پیشنهاد داده‌اند. از جمله این پژوهشگران سانگ و همکاران، خاندکار و همکاران، ناندان و همکاران بوده در آخرین پژوهش، رحمتی و ایرانمنش مدل حرارتی این فرایند را ارتقا دادند و اثر تغییر فرم پلاستیک شدید، اصطکاک لغزنده و چسبنده را در نظر گرفتند [۷-۳].

امروزه در صنایع به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سهولت حمل و نقل، نیازمند اتصال آلیاژهای آلومینیوم به عنوان عنصر سبک به فولادها و از جمله فولادهای زنگ‌نزن هستیم. اتصالات آلومینیوم به فولاد زنگ‌نزن کاربردهای متنوعی از صنایع حمل و نقل دریایی گرفته تا راکتور هسته‌ای و وسایل آشپزخانه دارند. به علاوه با توجه به مقاومت به خوردگی مناسب فولاد زنگ‌نزن و نیز آلیاژ آلومینیوم-منیزیم، نیاز به بررسی اتصال و جوشکاری این دو فلز مورد توجه قرار گرفته است [۸ و ۹].

در این پژوهش، با توجه به اهمیت بالای توزیع حرارت در یک فرایند جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به آلومینیوم ۵۰۸۳، هدف شبیه‌سازی این اتصال غیرمشابه است. آنچه که در

[۶ و ۷] پیشنهاد شده است. در این رابطه γ یک عدد ثابت بوده و توسط کاربر برای اصلاح مدل در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش و مرجع مذکور این عدد ۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین پارامتر f نمایانگر نسبت حرارتی است که وارد قطعه می‌شود. در واقع مقداری حرارت توسط هدایت حرارتی ابزار هدر می‌رود. این نسبت با تقسیم کردن پارامترهای حرارتی قطعه به پارامترهای حرارتی مجموع به دست می‌آید:

$$Q_{inp} = \gamma \cdot f \cdot F(\omega r - u \psi \sin \theta) \quad (4)$$

$$f = \frac{\sqrt{(k\rho C_p)_\omega}}{\sqrt{(k\rho C_p)_\omega} + \sqrt{(k\rho C_p)_T}} \quad (5)$$

همچنین پارامتر F ناشی از حرارت خالص تولیدی بین قطعه و ابزار است. که مطابق رابطه (۶) به دست می‌آید:

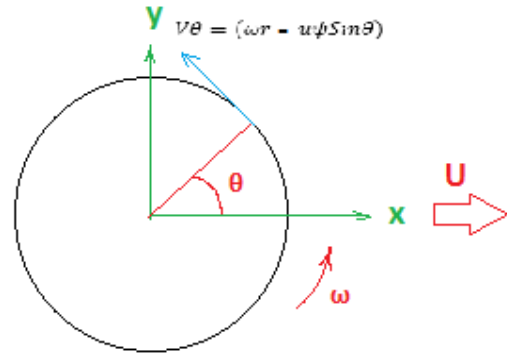
$$F = (1-S)\tau\eta + S(\delta\tau\eta + (1-\delta)\mu P_T) \quad (6)$$

در رابطه فوق η راندمان تولید حرارت و δ نیز پارامتر مربوط به چسبندگی است. در واقع رابطه فوق بین حرارت ناشی از اصطکاک که از فشار و ضریب اصطکاک حاصل می‌شود و نیز حرارت ناشی از تغییر فرم پلاستیک شدید که به شدت وابسته به تنش برشی تسلیم قطعه است تفکیک قائل شده است. در این رابطه μ ضریب اصطکاک، P_T فشار حاصل از نیروی عمودی، τ تنش تسلیم برشی ماکزیمم است. موارد ذکر شده در معادلات (۷) و (۸) آمده است [۷]:

$$S = 1 - \exp\left(-S_0 \frac{r\omega - \psi U \sin \theta}{R_s \omega}\right) \quad (7)$$

$$\mu = \mu_0 \exp(-S(r\omega - \psi U \sin \theta)) \quad (8)$$

در روابط فوق S پارامتر لغزش و S_0 ضریب ثابت لغزش، μ_0 ضریب ثابت اصطکاک است. در این پژوهش با توجه به اینکه حرارت ناشی از اتصال غیرمشابه دو فلز فولاد زنگ‌نزن و آلومینیوم در نظر گرفته شده است، از این رو می‌بایست این معادله برای هر دو فلز نوشته و میانگین گرفته شود. این مسئله پیش از این توسط لیو و همکاران مطرح شد [۱۰]. از آنجا که در جوش‌های غیرمشابه اصطکاکی اغتشاشی عمدتاً برای بهبود کیفیت جوش از مقداری آفست به سمت فلز نرم‌تر استفاده



شکل ۱- شماتیک سرعت خطی و زاویه‌ای ابزار در جوشکاری FSW

۲-۲- حرارت ایجاد شده در فصل مشترک ابزار/قطعه

در این مدل حرارت به دو قسمت تقسیم می‌شود، حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین قطعه و سطح شانه و دیگری حرارت ناشی از تغییر فرم پلاستیک شدید. قابل ذکر است در این پژوهش به دلیل کم بودن مقادیر، از حرارت ناشی از اصطکاک در فصل مشترک بین ابزار و نیز حرارت ناشی از کار مکانیکی صرف نظر شد.

اکنون برای به دست آوردن حرارت مذکور بایستی از روابطی که بعداً ارائه می‌شود استفاده کرد. در گام اول سرعت خطی هر نقطه از ابزار روی قطعه از رابطه (۳) به دست می‌آید. شکل (۱) شماتیک سرعت خطی روی ابزار را نشان می‌دهد.

$$V_\theta = (\omega r - U \psi \sin \theta) \quad (3)$$

در این رابطه r فاصله هر نقطه از ابزار تا مرکز آن، u سرعت خطی ابزار روی قطعه و ω سرعت چرخشی است. قابل ذکر است که با در نظر گرفتن رابطه فوق بدون ψ سرعت در هر نقطه و تحت هر زاویه به صورت متقارن به دست می‌آید. این در حالی است که پارامترهای مختلفی از جمله تفاوت سیلان پلاستیک و نیروی برشی در مناطق پیش‌رو و پس‌رو (AS) و (RS) روی غیرمتقارن شدن دما تأثیر می‌گذارند. در نتیجه رابطه فوق با ضریب ψ نوشته می‌شود. این ضریب مطابق آنچه که در مقالات اشاره شده است معادل ۲۰ در نظر گرفته می‌شود [۷]. برای محاسبه حرارت ایجاد شده در یک جوش مشابه حرارت رابطه (۴) پیشنهاد شده است. این رابطه طبق مراجع

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = Q \quad (15)$$

قابل ذکر است که مرکز اعمال این حرارت در نرم افزار متحرک است و حرارت به صورت مختصات استوانه‌ای (کارتزین) اعمال می‌شود. به این صورت که مرکز استوانه $Y_0 = 1/5 \text{ mm}$ که به اندازه آفست داده شده به سمت آلومینیوم است و نیز $X_0 = Vt$ که V سرعت خطی و t زمان است.

از دیگر شرایط مرزی مهم، شرط همرفت است. بدین گونه که سطح قطعه در تماس با هواست و انتقال حرارت از طریق همرفت صورت می‌گیرد که از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \quad (16)$$

در این رابطه T دمای محیط و h ضریب انتقال حرارت که معادل $(W/m^2 K)$ و T_a دمای محیط است. قابل ذکر است شرط مرزی مهم دیگری که در این تحقیق مورد توجه و استفاده قرار گرفت شرط تشعشع حرارت است که شامل ضریب تشعشع و ضریب استفان بولتزمن است:

$$Q_s = h(T - T_s) + \varepsilon B(T^4 - T_s^4) \quad (17)$$

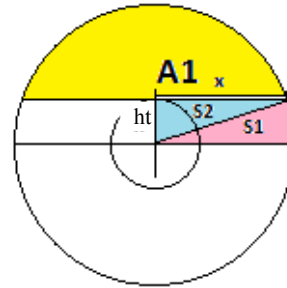
همچنین برای سطح زیرین قطعه در تماس با فولاد ساده کربنی یک شرط همرفت تعیین شده که ضریب همرفت آن برابر h_b و 10° برابر h در نظر گرفته می‌شود:

$$Q_b = h_b(T - T_s) \quad (18)$$

۲-۴- هندسه و شبکه‌بندی قطعه

برای حل حالت پایدار چون منبع حرارتی متحرک نیست، حرارت اعمالی به صورت دایره‌ای در مرکز قطعه اعمال می‌شود. ابعاد قطعه به صورت $3 \times 6 \times 15 \text{ mm}$ و شعاع‌ها r_s برای شانه و r_p برای پین در نظر گرفته شدند. در چنین حلی حرارت به سطح شانه وارد می‌شود. شبکه‌بندی قطعه در حل حالت پایدار بدین صورت در نظر گرفته شده است که برای پین و شانه المان‌های چهار وجهی و برای مابقی قطعه المان‌های شش وجهی مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شد.

برای حل حالت گذرا، با توجه به اینکه حرارت در طول قطعه و در مرکز عرضی آن حرکت می‌کند، نیازی به ایجاد



شکل ۲- نسبت مساحت‌های دو قسمت فولاد و آلومینیوم زیر ابزار جوشکاری

می‌شود از این رو می‌بایست نسبت مساحت‌ها به درستی ضرب شوند. با پیروی از شکل (۲)، در معادلات (۹) تا (۱۳) نسبت مساحت‌ها با توجه به آفست محاسبه شده و در رابطه حرارت ورودی قرار داده شده است، در این روابط SS فولاد زنگ نزن، Al آلومینیوم، A_t مساحت کل و h_t ارتفاع هستند:

$$Q = \frac{1}{A_t} ((\gamma.f.F(\omega r - u\psi \sin\theta) \int dA_{SS}) + (\gamma.f.F(\omega r - u\psi \sin\theta) \int dA_{Al})) \quad (9)$$

$$S_1 = \frac{r_s^2}{2} \sin^{-1} \left(\frac{h_t}{r_s} \right) \quad (10)$$

$$S_2 = \frac{h_t}{2} \sqrt{r_s^2 - h_t^2} \quad (11)$$

$$A_1 = A_t - 2(S_1 + S_2) \quad (12)$$

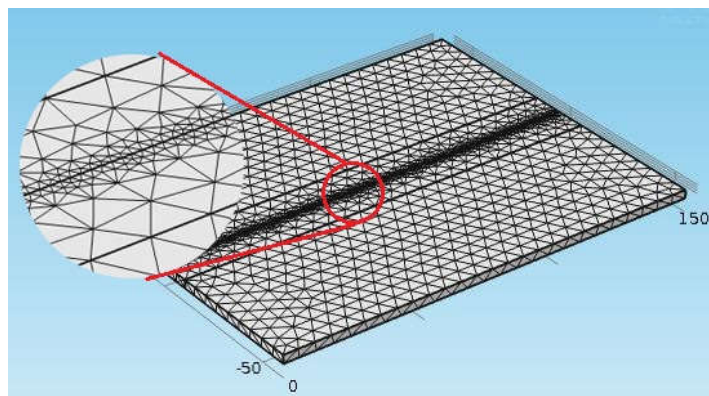
$$A_2 = A_t - 1 \quad (13)$$

۲-۳- شرایط مرزی حرارتی

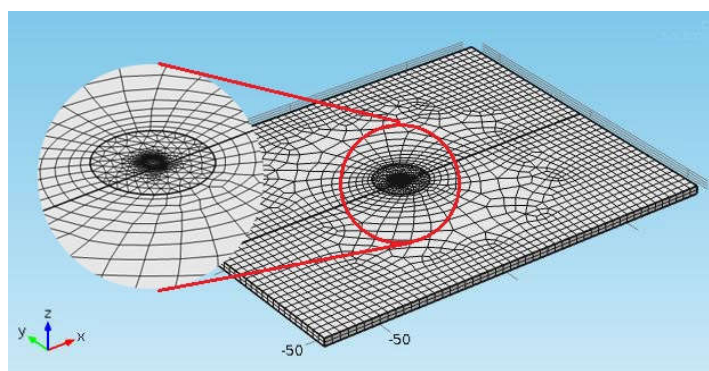
شرایط مرزی حرارتی عوامل بسیار مهمی در مدل‌سازی یک فرایند محسوب می‌شوند. در این پژوهش اولین شرط مرزی که مدنظر گرفته می‌شود دمای اولیه قطعه است. این دما در کل قطعه و در زمان $t = 0$ برای حل حالت گذرا فرض می‌شود. این دما $T_0 = 300 \text{ K}$ و مطابق رابطه (۱۴) نوشته می‌شود:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad (14)$$

شار حرارتی در فصل مشترک قطعه و ابزار، همان حرارت Q که پیش‌تر ذکر شد، به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود که در آن n نماینده بردار عمود بر مرز است:



شکل ۳- شبکه‌بندی قطعه مدل شده برای مدل حل حرارتی حالت گذرا



شکل ۴- شبکه‌بندی قطعه مدل شده برای مدل حل حرارتی حالت پایدار

جدول ۱- ترکیب شیمیایی عناصر فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

C	Mg	P	S	Si	Cr	Ni	N
۰/۰۸	۲	۰/۰۴۵	۰/۰۳	۰/۷۵	۱۸	۹	۰/۱

جدول ۲- ترکیب شیمیایی عناصر آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳

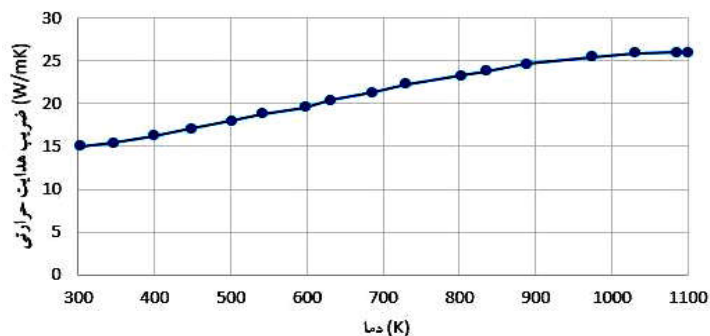
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۴/۵	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۱۵

۲-۵- خواص فیزیکی مواد مورد استفاده

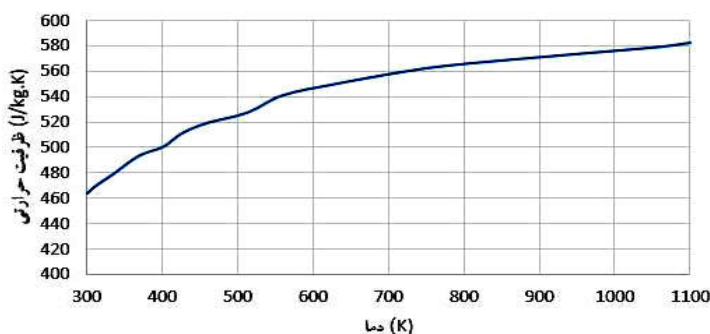
در این تحقیق از فلز فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و نیز آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ استفاده شد. (با ترکیب اشاره شده در جدول‌های (۱) و (۲)). با توجه به معادلاتی که پیش‌تر ذکر شد، ضرایب معادله از جمله هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت حرارتی و نیز موارد مورد نیاز برای حرارت ورودی از جمله تنش تسلیم برحسب دما برای هر دو فلز در شکل‌های (۵) تا (۸) آمده است.

هندس پین و شان در قطعه نیست و حرارت در مختصات استوانه‌ای وارد می‌شود. در نتیجه از دو قطعه مکعب مستطیل با ابعاد مشابه حالت پایدار استفاده شده و المان‌ها به صورت شش وجهی از خط مرکزی به سمت جداره قطعه از ریز به درشت تغییر می‌کنند. شکل (۴) نمایانگر المان‌ها برای حل گذرا است. قابل ذکر است که در این مسئله تمامی مراحل ساخت مدل، شبکه‌بندی و حل مسئله از نرم‌افزار کامسول^۲ مدل 4.3a استفاده شد.

ضریب هدایت حرارتی

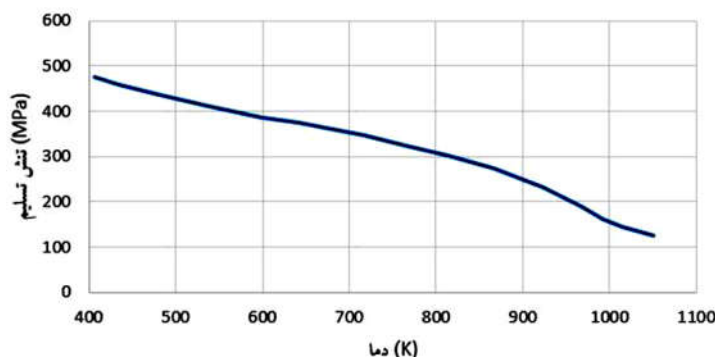


ظرفیت حرارتی



شکل ۵- تغییرات ضریب هدایت حرارتی و نیز ظرفیت حرارتی با دما در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ [۶]

تنش تسلیم فولاد 304

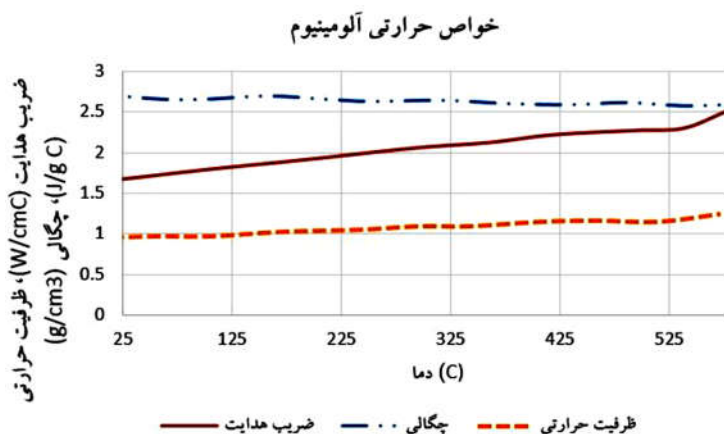


شکل ۶- تغییرات تنش تسلیم با دما برای فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ [۶]

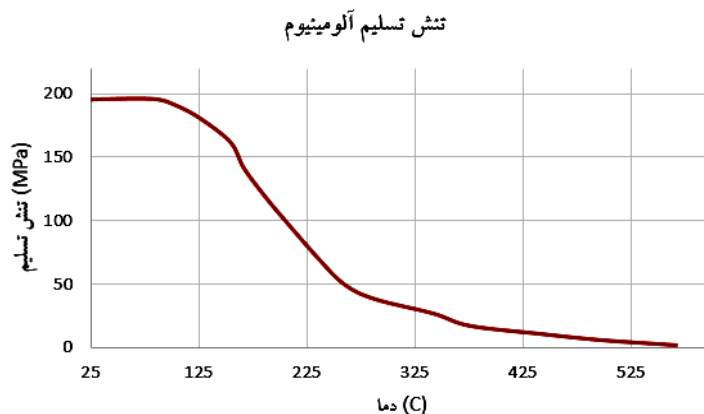
۳- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی نتایجی که از شبیه‌سازی به دست می‌آید، به انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شد. در این تحقیق

از قطعات فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ابعاد $150 \times 60 \times 3$ mm استفاده شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها دو ترموکوپل نوع K در قسمت میانی قطعه عمود بر خط جوش به عمق $1/5$ mm قرار داده شد و روی



شکل ۷- تغییرات چگالی، ضریب انتقال حرارت و ظرفیت حرارتی با دما برای آلومینیوم ۵۰۳۸ AA [۱۱]



شکل ۸- نمودار تغییرات استحکام تسلیم آلومینیوم ۵۰۸۳ برحسب دما [۱۲]

بالاتر برود. برای جوشکاری قطعه از دستگاه فرز عمودی استفاده شد. نیروی فرز معادل ۳۰ kN بوده و سرعت چرخشی ۵۰۰ RPM در نظر گرفته شد. جوشکاری در دو سرعت خطی ۴۰ و ۸۰ mm/min و نیز سرعت ۱۳۰ RPM در سرعت خطی ۸۰ در حالت لب به لب انجام شد. جوشکاری از فاصله ۵ mm از سر قطعه کار شروع و در ۵ mm پایان قطعه کار به اتمام رسید. در پایان تاریخچه دمایی که از ترموکوپل‌ها به دست می‌آید برای دو سرعت مختلف خطی و سرعت چرخشی ۵۰۰ RPM و نیز در هر دو فلز به دست آمد. به علاوه به منظور ارزیابی ریزساختار فلز جوش، تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۱۳۰ RPM تهیه شد.

ترموکوپل‌ها عایق حرارتی قرار داده شد تا از هدر رفت حرارت و ایجاد خطا در اندازه‌گیری جلوگیری به عمل آید. ترموکوپل‌ها هرکدام به فاصله ۹ mm در سمت فولاد و ۱۱ mm در سمت آلومینیوم از خط مرکزی جوش قرار گرفتند. ابزار مورد استفاده، مانند شکل (۹) کاربرد تنگستن-کبالت^۳ بوده و شعاع شانه برابر ۹ mm و شعاع پین ۳ mm و نیز ارتفاع پین معادل ۲/۷ mm در نظر گرفته شد. همچنین برای جوشکاری قطعه یک آفست به اندازه ۱/۵ mm به سمت آلومینیوم داده شد این آفست ورود ذرات درشت و مخرب فولاد به داخل آلومینیوم در منطقه اغتشاش را کمتر می‌کند [۱۳]. این کار موجب می‌شود که از ورود ذرات درشت فولاد به داخل آلومینیوم تا حد امکان جلوگیری به عمل آید و کیفیت جوش

پردازنده‌های کوچک و بسیار زیادی سپرده که به صورت شبکه‌ای به هم پیوسته و موازی با یکدیگر رفتار می‌کنند تا یک مسئله را حل کنند [۱۴ و ۱۵]. در این پژوهش از شبکه عصبی چند لایه^۴ با در نظر گرفتن دو لایه شامل یک لایه پنهان با تابع انتقال سیگموئیدی تانژانت هائپربولیک و یک لایه خروجی با تابع انتقال خطی استفاده شد. قابل ذکر است معادله خروجی حاصل از نورون در رابطه (۲۰) و نیز رابطه تابع سیگموئیدی تانژانت هائپربولیک در معادله (۲۱) آمده است. به منظور آموزش شبکه فیدفوروارده^۵ از روش لونیگ-مارکواریت^۶ استفاده شد که تاکنون به عنوان سریع‌ترین و موثرترین روش آموزش شبکه در مسائل تقریب شناخته شده است:

$$n = \sum_{i=1}^n W_{ij} P \quad (19)$$

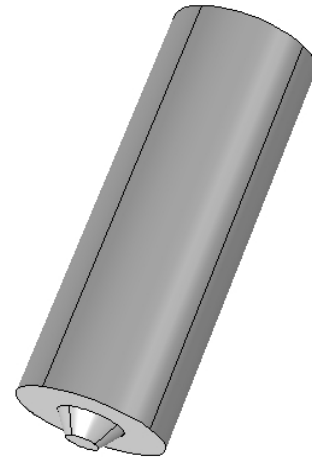
$$a = f(n) = f\left(\sum_{ij} W_{ij} \times P + b_i\right) \quad (20)$$

$$f(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (21)$$

در این روابط P مقدار ورودی، W_{ij} وزن هر نورون، n خالص ورودی، a خروجی نورون، f تابع انتقال هستند:

در این پژوهش به منظور افزایش دقت مدل و کارایی آموزش، از روش K -fold Cross Validation استفاده شد. در این روش یک داده آزمایش کنار گذاشته شده و دیگر داده‌ها آموزش داده می‌شود. هر بار یک داده به عنوان آزمون و $K-1$ داده به عنوان داده آموزشی انتخاب می‌شود. پس از اتمام آموزش شبکه، داده آزمون با خروجی واقعی آن مقایسه و خطای آن ذخیره می‌شود. پس از آن یک داده دیگر به عنوان آزمون کنار گذاشته شده و فرایند تکرار می‌شود. این فرایند تا آزمایش تمامی داده‌ها ادامه یافت. پس از پایان آموزش از خطاهای ذخیره شده میانگین مربعات گرفته شد [۱۶].

به منظور یافتن تعداد نورون بهینه، برنامه در حلقه‌ای نوشته شد و شبکه هر بار با یک تعداد مشخص نورون از ۳ تا ۱۵ نورون اجرا شد و هر بار اجرا نیز سه بار تکرار شده و از خروجی‌ها میانگین مربعات خطا به دست آمد. در نهایت از نتایج



RS	AS
Al 5083	SS 304
WC-Co	

شکل ۹- شماتیک ابزار و نحوه آفست دهی در حین جوشکاری قطعات

۴- مدل‌سازی ریاضی پارامترها

از آنجا که حداکثر دمای جوشکاری در زیر ابزار تأثیر به‌سزایی در اولاً سیلان پلاستیک ماده ثانیاً خواص مکانیکی دارد از این رو در این تحقیق به منظور تعیین عوامل مختلف بر حداکثر دمای زیر ابزار بررسی شده است. پارامترهای مورد بررسی سرعت خطی، سرعت چرخشی و دمای پیشگرم هستند که در سه سطح مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول (۳) آمده است. به منظور پیش‌بینی ارتباط بین این پارامترها و تابع خروجی بایستی مدلی قابل اطمینان و دقیق ساخته می‌شد. به این منظور، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای ساخت مدل استفاده شد.

شبکه عصبی مجموعه‌ای از نورون‌های زیستی به هم متصل است. در استفاده‌های جدیدتر این عبارت به شبکه عصبی مصنوعی که از نورون‌هایی مصنوعی ساخته شده است هم اشاره دارد. شبکه عصبی مصنوعی یک سامانه پردازشی داده‌ها است که از مغز انسان ایده گرفته و پردازش داده‌ها را به عهده

جدول ۳- نتایج تهیه شده از شبیه‌سازی برای مدل‌سازی پارامترها با شبکه عصبی

MaxTemp	T.	w	V	No.
۳۴۲	۳۰۰	۵۰۰	۴۰	۱
۳۶۴	۴۰۰	۵۰۰	۴۰	۲
۳۸۹	۵۰۰	۵۰۰	۴۰	۳
۴۱۲	۳۰۰	۷۰۰	۴۰	۴
۴۳۲	۴۰۰	۷۰۰	۴۰	۵
۴۵۴	۵۰۰	۷۰۰	۴۰	۶
۴۷۹	۳۰۰	۹۰۰	۴۰	۷
۵۰۶	۴۰۰	۹۰۰	۴۰	۸
۵۳۰	۵۰۰	۹۰۰	۴۰	۹
۳۰۶	۳۰۰	۵۰۰	۸۰	۱۰
۳۴۳	۴۰۰	۵۰۰	۸۰	۱۱
۳۷۹	۵۰۰	۵۰۰	۸۰	۱۲
۳۷۲	۳۰۰	۷۰۰	۸۰	۱۳
۴۰۶	۴۰۰	۷۰۰	۸۰	۱۴
۴۴۱	۵۰۰	۷۰۰	۸۰	۱۵
۴۲۹	۳۰۰	۹۰۰	۸۰	۱۶
۴۶۰	۴۰۰	۹۰۰	۸۰	۱۷
۵۰۳	۵۰۰	۹۰۰	۸۰	۱۸
۲۷۷	۳۰۰	۵۰۰	۱۲۰	۱۹
۳۲۳	۴۰۰	۵۰۰	۱۲۰	۲۰
۳۶۶	۵۰۰	۵۰۰	۱۲۰	۲۱
۳۴۴	۳۰۰	۷۰۰	۱۲۰	۲۲
۳۸۲	۴۰۰	۷۰۰	۱۲۰	۲۳
۴۲۰	۵۰۰	۷۰۰	۱۲۰	۲۴
۳۹۳	۳۰۰	۹۰۰	۱۲۰	۲۵
۴۳۴	۴۰۰	۹۰۰	۱۲۰	۲۶
۴۷۸	۵۰۰	۹۰۰	۱۲۰	۲۷

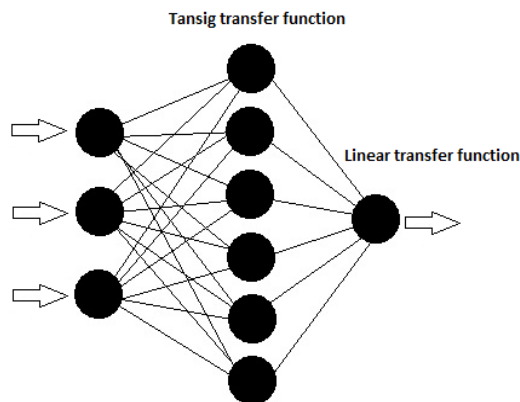
آلومینیوم جوشکاری شده در سرعت چرخشی ۳۵۰RPM و سرعت خطی ۸۰mm/min، نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ملاحظه می‌شود که منطقه اتصال فولاد زنگ‌نزن به آلومینیوم در جوشکاری حالت جامد به شدت به به‌وجود آمدن ترک‌ها حساس است. علت این امر به‌وجود آمدن فازهای بین‌فلزی FeAl₃ و Fe₂Al₅ در فصل مشترک است، از این‌رو فصل مشترک ترد شده و با تغییرات دمایی و ایجاد تنش‌های حرارتی

تکرارها میانگین گرفته شد. از این‌رو تعداد نوروں بهینه در این تحقیق ۶ نوروں به‌دست آمد. ساختار نهایی شبکه مطابق شکل (۱۰) است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۱-۵- بررسی مقطع جوش

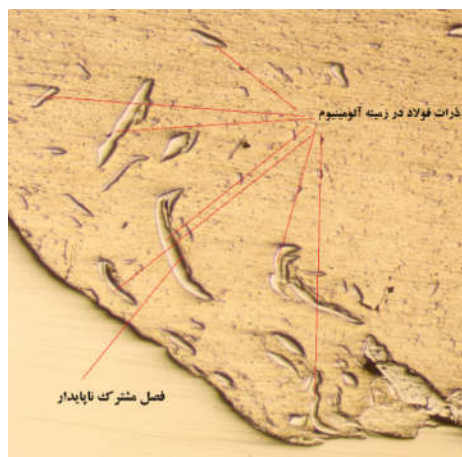
شکل (۱۱) مقطع عرضی منطقه اتصال فولاد زنگ‌نزن به



شکل ۱۰- ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش



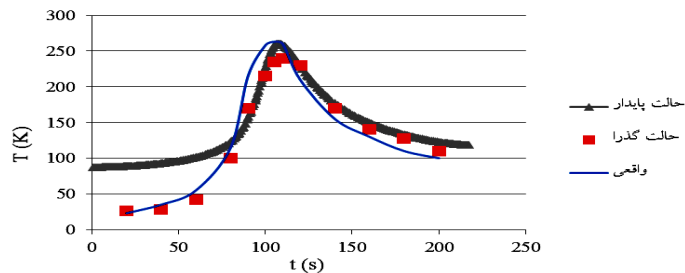
شکل ۱۱- مقطع عرضی اتصال فولاد زنگ‌نزن به آلومینیوم در سرعت چرخشی ۳۵۰RPM و خطی ۸۰ mm/min



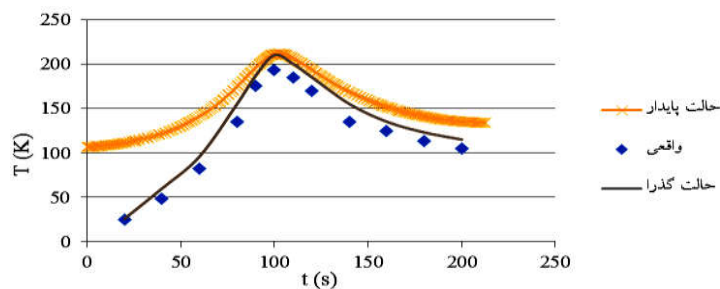
شکل ۱۲- حضور ذرات فولاد در زمینه آلومینیوم پس از جوشکاری

در این پژوهش مدل‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال غیر مشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به روش المان محدود انجام شد. پس از ساخت مدل توسط روش‌هایی که پیش‌تر ذکر شد، تاریخچه دمایی نقاط ترموکوپل گذاشته شده با نرم‌افزار در سرعت‌های خطی و شرایط مشابه به دست آمد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده حاکی از دقت مدل است.

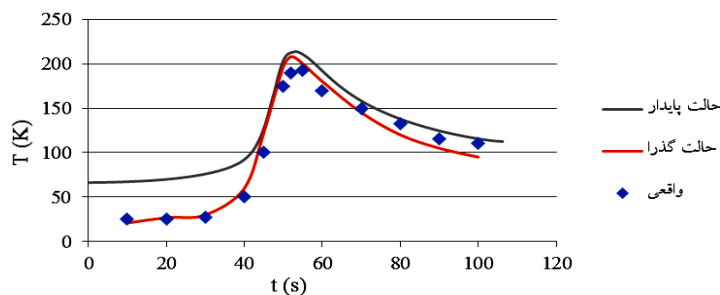
مستعد رشد می‌شود [۱۷ و ۱۸]. مطابق شکل (۱۲) یک ذره فولاد در زمینه آلومینیوم دیده می‌شود. در این شکل اطراف ذره میکروترک‌هایی دیده می‌شود. این ترک‌ها با ایجاد تنش‌های حرارتی در قطعه رشد کرده و منطقه اتصال را ضعیف می‌کنند. از این‌رو به‌منظور کنترل پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از شبیه‌سازی حرارتی فرایند برای پیش‌بینی استفاده می‌شود.



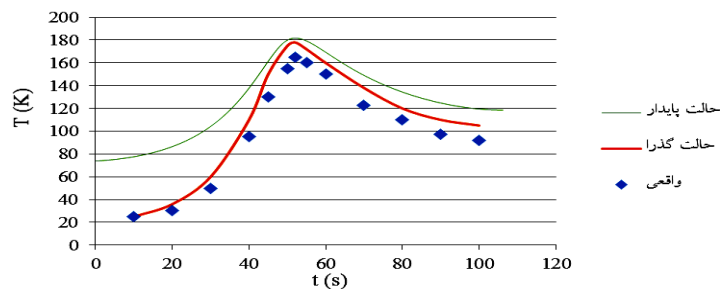
شکل ۱۳- نمودار مقایسه تاریخچه دمایی در سه حالت واقعی، مدل حالت پایدار و حالت گذرا برای فولاد زنگ‌نزن در $V=40 \text{ mm/s}$



شکل ۱۴- نمودار مقایسه تاریخچه دمایی در سه حالت واقعی، مدل حالت پایدار و حالت گذرا برای آلومینیوم در $V=40 \text{ mm/s}$



شکل ۱۵- نمودار مقایسه تاریخچه دمایی در سه حالت واقعی، مدل حالت پایدار و حالت گذرا برای فولاد زنگ‌نزن در $V=80 \text{ mm/s}$



شکل ۱۶- نمودار مقایسه تاریخچه دمایی در سه حالت واقعی، مدل حالت پایدار و حالت گذرا برای آلومینیوم در $V=80 \text{ mm/s}$

نمایش حداکثر دما و نیز شیب دمایی در اطراف ترموکوپل هردو تقریباً جواب‌های مناسبی نشان می‌دهند اما حالت پایدار برای

۲-۵- ارزیابی کارایی مدل در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) قابل مشاهده است که از لحاظ

مدل‌سازی توسط این روش با پارامترهای مختلف انجام شد. این پارامترها شامل سرعت چرخشی، سرعت خطی و دمای پیشگرم است.

شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نمایانگر تأثیر افزایش سرعت خطی و چرخشی جوشکاری بر گرادیان دمایی در عرض منطقه جوش در وسط قطعه است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت خطی از ۴۰ به ۱۲۰ گرادیان دمایی به سمت پایین انتقال پیدا کرده همچنین با افزایش سرعت چرخشی از ۳۰۰ به ۹۰۰ گرادیان به سمت بالاتر رفته است. علت این امر را می‌توان در تأثیر مستقیم سرعت چرخشی و تأثیر معکوس سرعت خطی در میزان حرارت ورودی به قطعه دانست.

قابل ذکر است که گرادیان دمایی در سمت فولاد حداکثر است این مسئله به دو دلیل تشریح می‌شود؛ اول اینکه پتانسیل فولاد زنگ‌نزن برای ایجاد حرارت ورودی بیشتر، در سمت خودش بیشتر است چرا که تنش تسلیم برشی بیشتری دارد. از طرفی فولاد در سمت AS قرار گرفته و این مسئله نیز دمای فولاد را بیشتر بالا می‌برد. به‌علاوه فولاد انتقال حرارت پایین‌تری نسبت به آلومینیوم دارد و حرارت را کمتر پخش می‌کند.

۵-۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی
در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی کارایی مدل حاصل از شبکه عصبی از محاسبه مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تشخیص (R^2) استفاده شد. ضریب تشخیص که با علامت R^2 نشان داده می‌شود، بیانگر میزان احتمال هم‌بستگی میان دو دسته داده در آینده است. در واقع این ضریب براساس مدل ریاضی تعریف شده که منطبق بر داده‌های موجود است که میزان انطباق نتایج مدل‌سازی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. جدول (۴) مقادیر MSE، RMSE و R^2 را می‌دهد که کم بودن MSE و RMSE و همچنین نزدیک

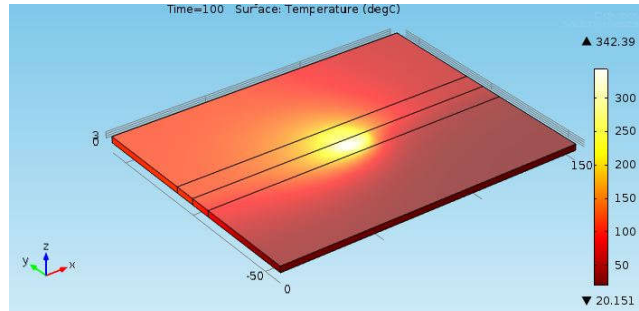
زمان‌های اول جوشکاری و نیز پایان جوشکاری دما را به مراتب بالاتر نشان می‌دهد. علت این امر این است که در این مدل زمان تغییر نمی‌کند بلکه همه شرایط ثابت است. از این‌رو با اجرای برنامه، هر چند پارامتر سرعت وارد معادله دیفرانسیل شد و کشیدگی دما در خلاف سرعت نشان داده می‌شد، اما باز هم تمامی قطعه گرم شده و این مسئله موجب ایجاد خطا در نمایش تاریخچه دمایی شده است. باید متذکر شد که در حل حالت پایدار برای استخراج تاریخچه دمایی یک نقطه، کافی است که در عرض آن نقطه از اول تا آخر قطعه گام‌های اندازه‌گیری دما به اندازه $t=x/v$ برداشته شود تا تاریخچه دمایی به‌دست آید.

۵-۳- مقایسه کانتورهای توزیع حرارت در حالت گذرا و غیرگذرا

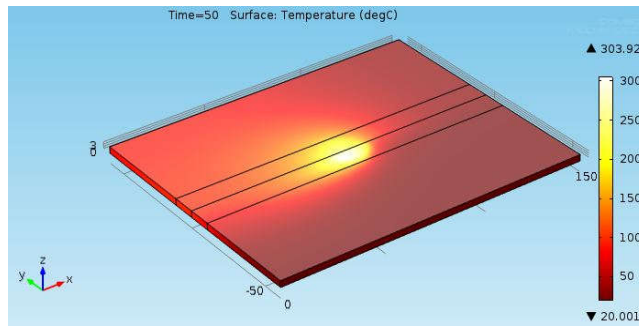
شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) نشان‌دهنده توزیع دما در حالت سرعت خطی ۴۰ و ۸۰ mm/s و سرعت زاویه‌ای ۵۰۰ RPM و دمای ۳۰۰ K مربوط به دو حالت گذرا و پایدار هستند. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود گرمای بیشتری در آلومینیوم پخش شده است و فواصل دورتری از منطقه جوش گرم شده اند. در عین حال مشاهده می‌شود که گرمای بیشتری در زیر ابزار جوشکاری در منطقه جوش فولاد زنگ‌نزن جمع شده و دما در این منطقه بیشتر بالا رفته در حالی که در مناطق دورتر این افزایش دما نسبت به آلومینیوم کمتر است. علت این اختلاف را می‌توان در تفاوت در ضرایب معادله انتقال حرارت دو فلز دانست. به‌علاوه با مقایسه دو شکل می‌توان دید که با افزایش سرعت حرارت کمتری در قطعات پخش شده است و این به دلیل این است که در واحد زمان حرارت کمتری به قطعه وارد شده است.

۵-۴- بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر حرارت ورودی

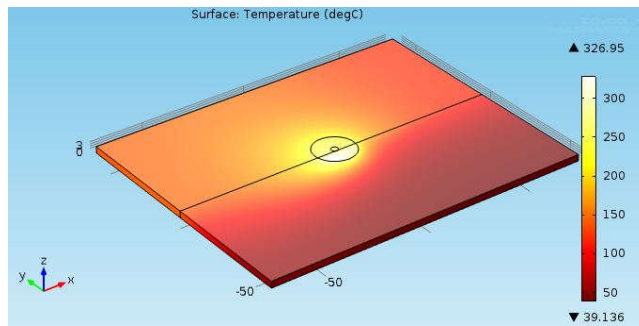
با نزدیک بودن نتایج حالت گذرا به نتایج واقعی اجرا،



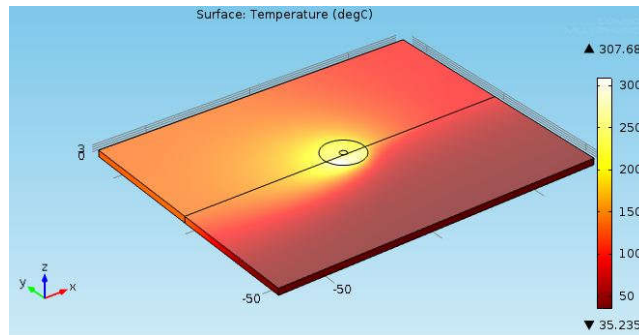
شکل ۱۷- کانتور سه بعدی توزیع حرارت در قطعه حین جوشکاری برای حل حالت گذرا در $V=40$ mm/s



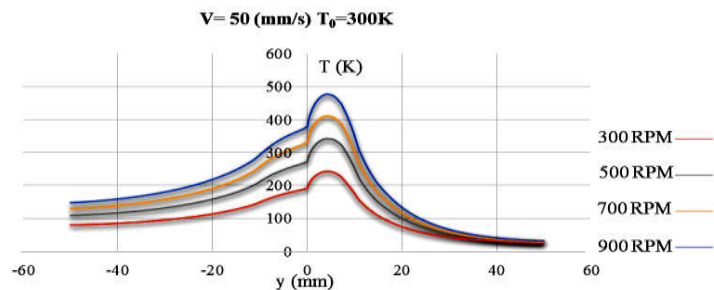
شکل ۱۸- کانتور سه بعدی توزیع حرارت در قطعه حین جوشکاری برای حل حالت گذرا در $V=80$ mm/s



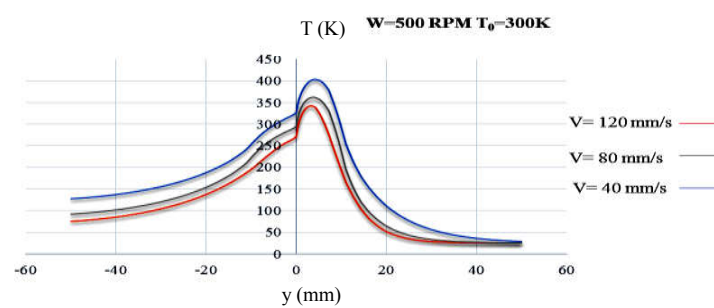
شکل ۱۹- کانتور سه بعدی توزیع حرارت در قطعه حین جوشکاری برای حل حالت پایدار در $V=40$ mm/s



شکل ۲۰- کانتور سه بعدی توزیع حرارت در قطعه حین جوشکاری برای حل حالت پایدار در $V=80$ mm/s



شکل ۲۱- نمودار مقایسه تغییرات دما در مقطع عرضی جوش در سرعت‌های چرخشی مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۲۲- نمودار مقایسه تغییرات دما در مقطع عرضی جوش در سرعت‌های خطی مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۴- بررسی کارایی مدل ساخته شده با شبکه عصبی

Values	
۰/۹۹۲	R^2
۱/۶۸E۰۰۵	MSE
۴۰۹/۸۷	RMS

اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ پرداخته شد که نتایج زیر حاصل شد:

حل حالت گذرا به دلیل نزدیک بودن به شرایط واقعی، علیرغم داشتن زمان بالاتر، نسبت به حل حالت پایدار دقیق‌تر و مورد اعتمادتر است.

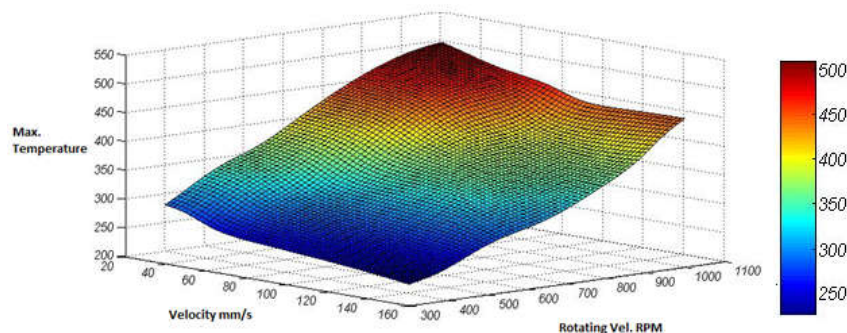
به منظور حصول یک حل دقیق می‌بایست معادله حرارت ایجاد شده به درستی وارد شود. این معادله باید علاوه بر دارا بودن پارامترهای مختلف از جمله تأثیر اصطکاک، تغییر فرم پلاستیک شدید و هدر رفت حرارت توسط ابزار، مسئله نسبت سطوح را در دو فلز مدنظر قرار داده و از آن میانگین بگیرد.

بودن میانگین R^2 به عدد ۱ کارایی مناسب شبکه را نمایش می‌دهد.

شکل (۲۳) رویه سه بعدی دمای حداکثر برحسب سرعت خطی و سرعت چرخشی مستخرج از مدل شبکه عصبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت چرخشی و کاهش سرعت خطی به دلیل افزایش حرارت ورودی ایجاد شده در واحد زمان، دمای حداکثر قطعه بیشتر می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی توزیع حرارت در جوشکاری



شکل ۲۳- رویه تغییرات دمای حداکثر در منطقه جوش با سرعت‌های خطی و چرخشی در دمای اولیه ۳۰۰ K

فولاد نسبت به آلومینیوم است.

شبکه عصبی مصنوعی روش مناسبی جهت پیش‌بینی تأثیر پارامترها بر دمای حداکثر انتخاب شد. در این روش با بهره‌گیری از هوش مصنوعی پیش‌بینی نقش سرعت چرخشی و سرعت خطی بر دمای حداکثر در قالب رویه صورت گرفت.

نشان می‌دهد که زودتر دمای آن بالا می‌رود. علت اینها ضریب انتقال حرارت بالاتر آلومینیوم نسبت به فولاد زنگ‌نزن است. حداکثر دما در زیر ابزار در فولاد حاصل شده است. علت این مسئله اولاً انتقال حرارت پایین‌تر فولاد نسبت به آلومینیوم، قرارگیری فولاد در منطقه AS و نیز تنش تسلیم برشی بالاتر

واژه‌نامه

- | | | |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1. friction stir welding | 3. WC-Co | 5. feed-forward |
| 2. COMSOL Multiphysics 4.3a | 4. multi-layer perceptron | 6. Levenberg-Marquardt |

مراجع

- Mishra, R. S., and Ma, Z., "Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-78, 2005.
- Fish, J., and Belytschko, T., *A First Course in Finite Elements*, John Wiley & Sons, 2007.
- McClure, J. C., Tang, W., Murr, L., Guo, X., Feng, Z., and Gould, J. E., "A Thermal Model of Friction Stir Welding", *Proceedings of the 5th International Conference on Trends in Welding Research*, Pine Mountain, GA, pp. 590-595, 1998.
- Song, M., and Kovacevic, R., "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, pp. 605-615, 2003.
- Khandkar, M. Z. H., Khan, J. A., Reynolds, A. P., and Sutton, M. A., "Predicting Residual Thermal Stresses in Friction Stir Welded Metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, No. 1, pp. 195-203, 2006.
- Nandan, R., Roy, G., Lienert T., and DebRoy, T., "Numerical Modelling of 3D Plastic Flow and Heat Transfer During Friction Stir Welding of Stainless Steel", *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 11, No. 5, pp. 526-537, 2006.
- Darvazi, A. R., and Iranmanesh, M., "Prediction of Asymmetric Transient Temperature and Longitudinal Residual Stress in Friction Stir Welding of 304L Stainless Steel", *Materials & Design*, Vol. 55, No., pp. 812-820, 2014.
- Bang, H., Jeon, G., Oh, I., and Ro, C., "Gas Tungsten Arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Al6061-T6 Aluminum Alloy and STS304 Stainless Steel", *Materials & Design*,

- Vol. 37, pp. 48-55, 2012.
9. Dong, H., Yang, L., Dong, C., and Kou, S., "Arc Joining of Aluminum Alloy to Stainless Steel with Flux-Cored Zn-Based Filler Metal", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 26, pp. 7151-7154, 2010.
 10. Liu, X., Shuhuai, L., and Jun, N. "Analysis of Process Parameters Effects on Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel", *Materials & Design*, Vol. 59, pp. 50-62, 2014.
 11. Kim, D., Badarinarayan, H., Kim, J. H., Kim, C., Okamoto, K., Wagoner, R., and Chung, K., "Numerical Simulation of Friction Stir Butt Welding Process for AA5083-H18 Sheets", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 29, No. 2, pp. 204-215, 2010.
 12. Zhu, X. K., and Chao, Y. J., "Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Welding Simulation", *Computers & Structures*, Vol. 80, No. 11, pp. 967-976, 2002.
 13. Coelho, R. S., Kostkac, A., dos Santos, J. F., and Kaysser-Pyzallaab, A., "Friction-Stir Dissimilar Welding of Aluminium Alloy to High Strength Steels: Mechanical Properties and Their Relation to Microstructure", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 175-183, 2012.
 14. Hagan, M. T., Demuth, B. H., and Beale, M. H.. *Neural Network Design*. Boston. Pws Pub., 1996.
 15. Toktas, I., and Zdemir, A. T., "Artificial Neural Networks Solution to Display Residual Hoop Stress Field Encircling a Split-Sleeve Cold Expanded Aircraft Fastener Hole", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 553-563, 2011.
 16. Hentschel, J., and Justin, L., *Using Neural Nets to Recognize Handwriting*, Northwestern University, EECS 395: Machine Learning.
 17. Ogura, T., Saito, Y., Nishida, T., Nishida, H., Yoshida, T., Omichi, N., Fujimoto, M., and Hirose, A., "Partitioning Evaluation of Mechanical Properties and the Interfacial Microstructure in a Friction Stir Welded Aluminum Alloy/Stainless Steel Lap Joint", *Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 8, pp. 531-534, 2012.
 18. Fukumoto, S., Tsubakino, H., Okita, K., and Tomita, T., "Amorphization by Friction Welding between 5052 Aluminum Alloy and 304 Stainless Steel", *Scripta Materialia*, Vol. 42, No. 8, pp. 807-812, 2000.