

تأثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار روی ماکزیمم دمای ایجاد شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حضور و عدم حضور خنک‌کار با استفاده از آنالیز المان محدود

عبدالحمید عزیزی*
استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
ملیحه حاجی نژاد
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

چکیده

با توجه به تأثیر چرخه‌های گرمایی بر مناطق دورتر از ناحیه جوش و همچنین اهمیت انجام این فرایند در صنایع دریایی، بررسی گرمایی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب یک نیاز اساسی است. در این تحقیق مدلسازی گرمایی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حضور خنک‌کار و در هوا با سرعت دورانی‌ها و پیشروی‌های مختلف انجام پذیرفت. مقایسه بین نتایج مدلسازی و نتایج تجربی صورت گرفت که بیانگر صحت انجام مدلسازی بود. یافته‌ها نشان داد که افزایش سرعت دورانی به دلیل افزایش شار گرمایی تولیدی، منجر به افزایش دما در مناطق مختلف قطعه‌کار در جوشکاری در هوا و زیر آب می‌شود؛ اما در جوشکاری زیر آب با توجه به جوشش آب در مناطق اطراف ابزار، افت دما در این مناطق بیشتر است و اختلاف دمای بیشتری بین دمای قطعه‌کار در جوشکاری در هوا و زیر آب مشاهده می‌شود. کاهش سرعت پیشروی به دلیل افزایش انباشت حرارتی، منجر به افزایش دمای قطعه‌کار می‌گردد که در جوشکاری در هوا نسبت به جوشکاری در زیر آب، افزایش دما چشمگیرتر است. در واقع تأثیر تغییرات سرعت پیشروی بر جوشکاری در زیر آب نسبت به هوا کمتر است. **واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سرعت دورانی، سرعت پیشروی، خنک‌کار.

Effect of Tool Rotational and Welding Speed on Transient Temperature in underwater and Normal Friction Stir Welding using Finite Element Method

A. H. Azizi
M. Hajinejad

Mechanical Engineering Department, Ilam University, Ilam, Iran
Mechanical Engineering, Islamic azad University, Dezful Branch, Dezful, Iran

Abstract

Friction Stir Welding is an appropriate method to connect different metals in temperatures below their melting point. In spite of this, the effect of thermal cycles causes the reduction in mechanical strength in different weldment regions. On the other hand, because of necessity of doing welding in submerged conditions like in navy industries it is of great importance to investigate and thermally modeling the submerged Friction Stir Welding. In this paper, finite element modeling of friction stir welding in the air and underwater were performed for Al6061-T6 alloys to control the thermal cycles. In addition to cooling effect, the influence of parameters such as welding speed and rotational speed on the maximum temperature in workpiece was investigated. The model results were then examined by experimental data and a reasonable agreement was observed. Results show that increasing rotational tool speed due to increasing in generating heat flux causes increasing in maximum temperature experienced by workpiece in different regions in both air and underwater welding. However, in underwater welding because of boiling water surrounding the tool, temperature drop is more greater than another one. The difference between maximum temperature in air and underwater welding is high. Reducing welding speed causes increasing the maximum temperature. This is due to reducing cumulative generated heat flux during welding. Increasing temperature during welding in air is more salient than doing welding in underwater. In the other word the effect of welding speed on maximum temperature in welding in air is more than underwater welding.

Keywords: Friction Stir Welding, Welding Speed, Rotational Speed, Coolant.

۱- مقدمه

HAZ^۱ که ضعیف‌ترین منطقه از اتصال است، می‌شود. کنترل سطح دما در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند خصوصیات مکانیکی اتصال را تا حد زیادی بهبود ببخشد [۱۳-۱۱]. از طرفی در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی، رفع عیوب خطوط نفت و گاز و نیز تعمیر کشتی‌ها و زیر دریایی‌ها، نگر داشتن و تعمیر آنها در بیرون آب مستلزم صرف هزینه‌های زیادی می‌باشد [۱۴]. بدین منظور تعدادی از پژوهشگران فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را در حضور سیالات خنک‌کار و یا به صورت غرق آبی مورد مطالعه قرار داده‌اند. شکل ۱ طرحواره‌ای از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه منطقه HAZ در قطعه‌کار،

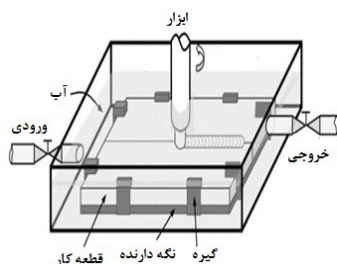
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که اولین بار توسط توماس و همکارانش در انجمن جوشکاری بریتانیا در سال ۱۹۹۱ اختراع و به ثبت رسید [۴-۱]. از مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌توان به اتصال فلزات بدون ذوب شدن و با انقباض و اعوجاج کمتر نسبت به روش‌های ذوبی، حفظ خصوصیات مکانیکی اتصال، تولید آلودگی کمتر و قابلیت اتصال آلیاژهایی نظیر آلومینیم سری ۲XXX و ۷XXX اشاره کرد [۸-۵]. در این فرآیند، حداکثر دمای قطعه‌کار در حین فرایند به حدود ۹۰-۷۰ درصد دمای ذوب فلز پایه می‌رسد [۹،۱۰]. اما چرخه‌های گرمایی ناشی از گرمای اصطکاکی بین ابزار چرخشی و قطعه‌کار منجر به کاهش خواص مکانیکی اتصال بخصوص باعث کاهش استحکام در منطقه

¹Heat Affected Zone

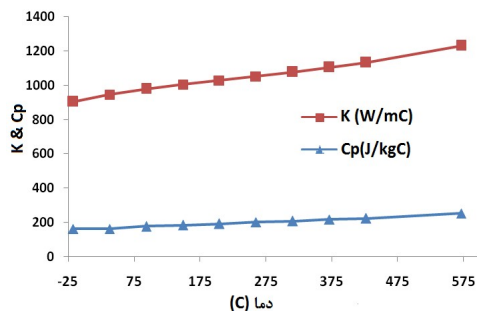
در دمای بالا و مقاومت سایشی بسیار مناسب می‌باشد. جوشکاری در فاصله ۲۵ میلی‌متری از لبه قطعه‌کار شروع و در فاصله ۱۷۵ میلی‌متری از لبه قطعه‌کار پایان می‌یابد.

با توجه به اینکه بسیاری از خصوصیات اتصال از جمله تنش‌ها و کرنش‌های توسعه یافته در طول جوشکاری وابسته به دما می‌باشند لذا در اینجا در راستای انجام دقیق شبیه‌سازی، خصوصیات حرارتی مواد از جمله رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه برای قطعه‌کار و ابزار به ترتیب مطابق با شکل ۲ و ۳ و متغییر با دما در نظر گرفته شده است. اما چگالی مستقل از دما فرض شد که این مقدار برای قطعه‌کار 2700 kg/m^3 و برای ابزار برابر با 7920 kg/m^3 می‌باشد.

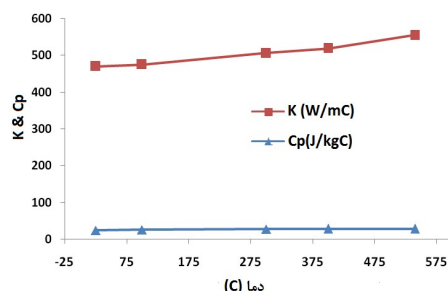
یکی از مشکلات اساسی در مدلسازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی محاسبه میزان شار گرمایی ایجاد شده در حین فرایند است. دلیل این امر متغییر بودن مقدار ضریب اصطکاک بوده که می‌تواند از مقدار ۱ در حالت چسبنده تا صفر در حالت ذوب قطعه‌کار تغییر کند. در منابع مختلف محدوده تغییرات ضریب اصطکاک در حین فرایند بین ۰/۳ تا ۰/۸۵ بوده که در اینجا جهت انجام مدلسازی مقادیر ۰/۵ و ۰/۶۸ به ترتیب برای جوشکاری در هوا و آب در نظر گرفته می‌شود [۸].



شکل ۱- طرحواره‌ی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب



شکل ۲- خواص ترموفیزیکی وابسته به دما برای قطعه‌کار [۱۸]



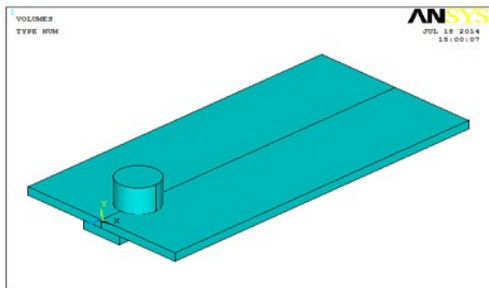
شکل ۳- خواص ترموفیزیکی وابسته به دما برای ابزار [۱۸]

ضعیف‌ترین منطقه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژهای آلومینیم است، ژانگ و همکارانش [۱۱] به منظور کنترل سطح دما و بهبود سختی منطقه HAZ، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را در زیر آب انجام دادند. با تحلیل و بررسی میکروساختار نتایج، دریافتند که زبری و خشن بودن سطح جوش در جوشکاری زیر آب کمتر شده و به دلیل کنترل چرخه‌های گرمایی جوشکاری بوسیله خنک‌کاری با آب، سختی منطقه HAZ و خواص مکانیکی اتصال در زیر آب بهبود یافته است. فو و همکارانش [۱۵] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را در زیر آب (غوطه‌ور در آب) برای آب خنک (حدود 8°C) و آب گرم (حدود 90°C) و نیز در هوا برای آلیاژهای Al7050 انجام دادند. چرخه‌های گرمایی جوشکاری و پخش عرضی میکروسختی اتصال‌های جوش داده شده و همچنین خصوصیات کششی مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج آزمایشها نشان داد که حداکثر دما در جوشکاری در هوا 380°C است. در حالی که این مقدار برای جوشکاری در آب خنک و آب گرم به ترتیب برابر با 220°C و 300°C بود. بهترین خصوصیات کششی اتصال در جوشکاری در آب گرم بدست آمد. در تحقیقی دیگر توسط ژانگ و همکارانش [۱۶] مدلسازی حرارتی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژ Al2219 انجام گرفت. مدلسازی با نرم افزار MSC MARC و به منظور بررسی مشخصه جوشش آب در اثر گرمای ناشی از جوشکاری صورت گرفت. آب موجود در اطراف ابزار با توجه به مشخصات جوشش به دو قسمت آب جوششی و آب غیر جوششی تقسیم شد. بر اساس نتایج آزمایشها، دمای اولیه آب حدود 20°C و آب در دمای 120°C می‌جوشد. بین نتایج مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی برقرار بود. یافته‌ها نشان داد که در جوشکاری زیر آب با وجود افزایش شار گرمایی تولید شده در سطح تماس شانه با قطعه‌کار، حداکثر دمای قطعه‌کار به میزان قابل توجهی کمتر از اتصال در هوا است.

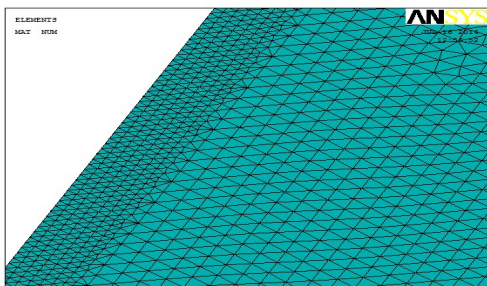
تاکنون مطالعات زیادی چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت تحلیلهای عددی جهت بررسی و مطالعه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته است. اما این تحقیقات در رابطه با جوشکاری در حضور خنک‌کار به نسبت کمتر است. لذا در این تحقیق سعی می‌شود تا با کمک آتالیز عددی، جوشکاری در زیر آب مدل و سپس تأثیر دو پارامتر مهم سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار روی خواص حرارتی و توزیع دما در نواحی مختلف جوشکاری مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و نتایج اخذ شده از جوشکاری زیر آب و در هوا مورد مقایسه قرار می‌گیرند. جهت صحت بخشیدن به مدل از نتایج تجربی ارائه شده توسط ژانگ و همچنین سوندراجان [۱۷] استفاده می‌شود.

۲- هندسه و خواص مواد

در این تحقیق دو صفحه متقارن از آلیاژ آلومینوم Al6061-T6 با دمای ذوب 583°C در ابعاد $200 \times 50 \times 6/4 \text{ mm}^3$ در نظر گرفته شده است. ابزار شامل یک پین استوانه‌ای صاف و شانه تخت به ترتیب با شعاع $2/5$ و 12 میلی‌متر می‌باشد. طول پین ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار متغییر در نظر گرفته می‌شوند و نیروی وارده بر ابزار در حین فرایند ۱۳ KN می‌باشد. جنس ابزار از فولاد آلیاژی CPM1V با چقرمگی خوب، حفظ سختی



(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) هندسه قطعه کار و ابزار (ب) مش بندی مدل

۳- مدل سازی المان محدود

هدف از مدل سازی حرارتی، محاسبه دمای گذرا توسعه یافته در قطعه کار در طول فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می باشد. در مدل سازی حرارتی دمای گذرای T که تابعی از زمان t و مختصات فضایی (x, y, z) است به وسیله معادله انتقال گرمای سه بعدی مطابق با معادله (۱) محاسبه می شود [۱۸].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و k_x, k_y, k_z به ترتیب رسانایی گرمایی در جهت x, y و z می باشند.

۳-۱- شبکه بندی مدل

در این تحقیق برای مدل سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از نرم افزار ANSYS APDL 14 برای حل معادلات انرژی و انجام آنالیز استفاده شده است. مدل سازی حرارتی قطعه کار و صفحه پشتی از روش المان محدود با مش بندی غیر یکنواخت با المان SOLID70 انجام می گیرد. SOLID 70 یک المان با هشت گره و یک درجه آزادی در هر گره می باشد. این المان برای یک آنالیز حرارتی، سه بعدی و حالت پایدار یا گذرا کاربرد دارد. اما از آنجایی که شار حرارتی و انتقال حرارت جابجایی هر دو نمی توانند به صورت ورودی به قطعه کار وارد شوند، سطح بالایی قطعه کار توسط المان SURF152 شبکه بندی شده است. شار گرمایی روی المان های SOLID70 وارد و انتقال حرارت جابجایی با استفاده از المان های SURF152 روی سطح بالایی قطعه کار اعمال می گردد. با توجه به تقارن قطعه کارها، مدل سازی فقط برای یکی از صفحات انجام می گیرد (شکل ۴). با توجه به مدل سازی انجام گرفته تعداد نودها و المانهای مدل به ترتیب برابر با ۷۴۸۹۴ و ۱۴۶۲۲ عدد می باشد.

۳-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی گرمایی، از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار بر مدل سازی فرآیند می باشد که بصورت زیر تعریف می شوند. شرط اولیه در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا و در آب به صورت معادله (۲) بیان می گردد [۱۶].

$$T(x, y, z, t) = T_0 = 25^\circ C \quad (2)$$

T_0 دمای اولیه قطعه کار است که در این مدل سازی $25^\circ C$ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی شار گرمایی در سطح مشترک ابزار و قطعه کار بر اساس قانون فوریه به صورت زیر است.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (3)$$

n بردار نرمال مرزها می باشد. برای انتقال گرمای جابجایی و تشعشع برای همه سطوح قطعه کار می توان نوشت [۱۹]:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) + \sigma \epsilon (T^4 - T_a^4) \quad (4)$$

۳-۳- شار گرمایی ورودی

در طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی گرما به دلیل اصطکاک بین پین و شانه با سطح قطعه کار تولید می شود. در این فرآیند جریان مواد تغییر شکل یافته پیچیده است و معمولاً تعیین توزیع

h ضریب انتقال گرمای جابجایی با محیط، T_a دمای محیط، ϵ ضریب پخش و σ ثابت بولتزمن است. برای سطح زیرین قطعه کار که در ارتباط با صفحه پشتی است ضریب انتقال گرمای جابجایی با h_b نشان داده می شود. معمولاً انتقال گرمای تابشی قابل صرف نظر کردن است. در این مقاله دمای هوا $25^\circ C$ در نظر گرفته شد. مقادیر h و h_b نیز به ترتیب $(15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ C)$ و $(200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ C)$ لحاظ می گردند [۱۶].

در جوشکاری زیر آب توزیع دما در تمام قسمت های قطعه کار با جوشکاری در هوا متفاوت است. در جوشکاری زیر آب، آب اطراف ابزار به دو قسمت آب جوششی و آب غیر جوششی تقسیم می شود که مرز بین دو ناحیه خیلی واضح نیست. در این فرآیند برخلاف انتظار آب در $100^\circ C$ نمی جوشد؛ با توجه به دوران ابزار، آب اطراف ابزار نیز به صورت حلقوی جریان دارد. در سطح بالای قطعه کار نزدیک ابزار، جایی که دما بیشتر از $120^\circ C$ است (تقریباً منطقه HAZ)، آب شروع به جوشش می کند که نتیجه انتقال گرمای زیادی به آب می باشد. اما در سایر قسمت های قطعه کار (مناطق دورتر از خط اتصال) جوشش رخ نمی دهد و گرما از طریق انتقال حرارت جابجایی به آب منتقل می شود. در مدل سازی در زیر آب، ضریب انتقال گرمای جابجایی در قسمت جوششی ($h_{\text{boiling}} = 3000 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ C)$)، در قسمت غیر جوششی ($h_{\text{non-boiling}} = 850 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ C)$) و برای سطح زیرین در تماس با صفحه پشتی ($h_b = 1000 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ C)$) در نظر گرفته می شود [۱۶].

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبار سنجی مدل

در این مقاله ابتدا برای اعتبار مدل، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژهای آلومینیوم Al2219 در هوا و زیر آب مدلسازی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشهای ژانگ و همکارانش [۱۶] مقایسه گردید. برای حفظ پایداری، ابعاد قطعه کار و ابزار، خصوصیات مواد، سرعت چرخشی، سرعت دورانی و نیروی وارده بر ابزار از مقادیر کار ژانگ و همکارانش استفاده می‌شود. قطعه کار از جنس Al2219 با دمای ذوب °C ۵۳۴ در ابعاد $3.00 \times 1.00 \times 7/5 \text{ mm}^3$ قطر شانه mm ۲۲/۵ و بین مخروطی راستگرد با طول ۷/۴mm و قطر متوسط ۷/۴mm و زاویه انحراف ۲/۵ درجه در نظر گرفته شد. سرعت دورانی، سرعت پیشروی و نیروی وارد بر ابزار برای جوشکاری در هوا و زیر آب یکسان و به ترتیب مقادیر rpm ۸۰۰، mm/min ۱۰۰ و kN ۴/۶ لحاظ گردید. در شکل ۵ به ترتیب بیشترین دما در عرض قطعه کار برای جوشکاری در هوا و زیر آب نمایش داده شده است. در هر دو حالت تطابق خوبی بین نتایج مدلسازی و تجربی وجود دارد.

در ادامه برای اطمینان بیشتر از اعتبار مدل، مدلسازی برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا برای آلیاژ Al6061-T6 انجام و نتایج با نتایج آزمایشهای سونداراجان [۱۷] و همکارانش نیز مقایسه گردید. جهت انجام مقایسه تمامی شرایط اولیه در نظر گرفته شده جهت مدلسازی با پارامترهای تجربی در نظر گرفته شده یکسان می‌باشد. شکل ۶ مقایسه بین نتایج مدلسازی و نتایج تجربی برای توزیع دمای متغییر با زمان در فاصله ۶ میلی‌متری از خط اتصال (منطقه HAZ) را نشان می‌دهد. بین نتایج سازگاری خوبی مشاهده می‌شود.

در ابتدای فرایند جوشکاری بین نتایج تجربی و مدلسازی اختلاف وجود دارد. دلیل این امر این است که دمای اولیه هوا در اطراف ابزار در شبیه سازی همیشه برابر با مقدار °C ۲۵ در نظر گرفته می‌شود حال آنکه در واقعیت به خاطر حرارت ایجاد شده در حین فرایند این مقدار دما افزایش یافته و همین امر منجر به این می‌گردد تا نتایج شبیه سازی از مقادیر تجربی کمتر باشند.

۴-۲- تأثیر خنک‌کار

در این قسمت با انجام مدلسازی حرارتی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا و در زیر آب در سرعت دورانی ۳۴۴rpm و سرعت پیشروی ۲/۲mm/s تلاش شد تا تأثیر خنک‌کار بر دمای حداکثر و توزیع دما در قسمت‌های مختلف قطعه کار مورد بررسی قرار گیرد. از مدلسازی حداکثر دمای قطعه کار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا °C ۵۱۳ حاصل می‌شود که از دمای ذوب قطعه کار کمتر است اما این مقدار برای جوشکاری در زیر آب °C ۴۳۸ است که تقریباً ۷۵ درجه از حداکثر دما در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا کمتر است. این اختلاف بدلیل خاصیت خنک‌کنندگی آب می‌باشد.

دمای موادی که از جلو پین به پشت پین جابجا می‌شوند خیلی مشکل است و با توجه به اینکه پین مصرف نشدنی است و مدلسازی پین متحرک چندان ساده نیست؛ در این تحقیق فقط فاز حرکت ابزار با فرض شرایط لغزشی بین پین و مواد، مدلسازی می‌شود. در حالت ایده-آل گشتاور پیچشی مورد نیاز برای چرخش ابزار به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۸].

$$\int_0^{M_R} dM = \int_0^{r_s} \mu P(r) 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3} \mu \pi P_s r_s^3 \quad (5)$$

که M گشتاور پیچشی، μ ضریب اصطکاک، P فشار وارد شده بر ابزار و r_s شعاع شانه می‌باشد.

گرما تولید شده توسط شانه در واحد زمان و سطح با در نظر گرفتن شرایط لغزشی بین ابزار و قطعه کار به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۲۰].

$$Q = \int_0^{M_R} \omega dM = \int_0^{r_s} \omega \mu P(r) 2\pi r^2 dr \quad (6)$$

سرعت زاویه‌ای و F نیروی عمودی وارد شده به ابزار است. با جایگزینی $\omega = 2\pi N$ ، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$Q = \int_0^{r_s} 4\pi^2 \mu P N r^2 dr = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N r_s^3 \quad (7)$$

از رابطه فوق مشخص است که گرمای ورودی به شعاع شانه و سرعت دورانی ابزار بستگی دارد که منجر به تولید یک توزیع غیر یکنواخت می‌گردد. بنابراین با در نظر گرفتن شعاع پین ابزار گرمای ایجاد شده توسط شانه ابزار در فرایند را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$Q_s = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N (r_s^3 - r_p^3) \quad (8)$$

به گونه‌ای که r_p و r_s به ترتیب شعاع شانه و پین می‌باشند. گرمای تولید شده در سطح بین پین و قطعه کار برابر است با گرمای ایجاد شده در پیشانی و کناره‌ی پین که این مقادیر را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$Q_p = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N (r_p^3 + 3r_p^2 l) \quad (9)$$

به گونه‌ای که l طول پین است. با جمع زدن گرمای تولیدی در قسمت شانه و پین ابزار می‌توان مقدار گرمای کلی ایجاد شده در فرایند را بدست آورد:

$$Q_t = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N (r_s^3 + 3r_p^2 l) \quad (10)$$

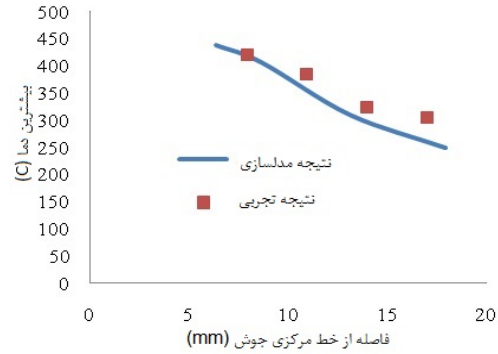
گرمای تولید شده بین ابزار و قطعه کار به صورت دوبعدی فرض می‌شود. برای مدلسازی المان محدود فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، یک دستگاه مختصات استوانه‌ای محلی برای حرکت منبع گرما تعریف شده و سپس شار گرمایی به صورت دایره‌ای به اندازه شعاع شانه ابزار به المانهای آن منطقه اعمال می‌گردد. برای شبیه‌سازی ابزار متحرک (منبع گرمایی متحرک)، در هر گام دستگاه مختصات قبلی حذف و یکی دیگر در موقعیت جدید ایجاد شده و شار گرمایی در این موقعیت بر سطح اعمال می‌گردد.

شود. به دلیل حضور چرخه‌های گرمایی در منطقه اطراف ابزار در جوشکاری زیر آب، در قسمت‌های پایانی نمودارها، اختلاف دمای کمتری وجود دارد. به گونه‌ای دیگر می‌توان گفت که در جوشکاری در زیر آب منطقه HAZ دمای کمتری را تجربه می‌کند که همین امر منجر به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این ناحیه از جوش می‌شود که این نتیجه در راستای تحقیقات تجربی انجام گرفته پیشین نیز می‌باشد [۱۱-۱۳]. از طرفی دیگر می‌توان گفت که روند کاهش دما تا دمای محیط برای نواحی مختلف در جوشکاری زیر آب نسبت به هوا شدیدتر بوده که این امر به خاطر خاصیت خنک‌کنندگی بیشتر آب در این فرایند می‌باشد.

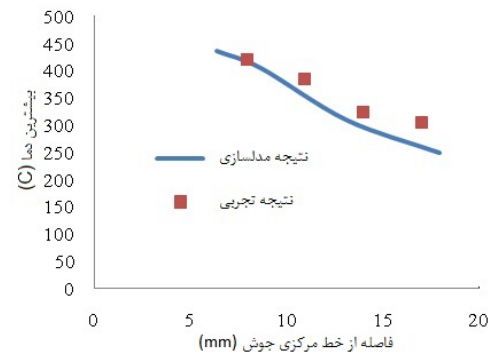
۳-۴- تاثیر سرعت دورانی

در این پژوهش با بررسی سرعت دورانی‌های مختلف، تلاش شد تا تاثیر سرعت دورانی بر حداکثر دمای تجربه شده توسط قطعه‌کار در جوشکاری زیر آب و در هوا مورد مطالعه قرار گیرد. برای این منظور با فرض ثابت بودن سایر شرایط سرعت دورانی‌های ۵۰۰ rpm و ۴۵۰ rpm مقایسه ۹ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ مقایسه توزیع دما در عرض قطعه‌کار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب در سرعت دورانی‌های مختلف و با سرعت پیشروی ثابت ($V = 2 \text{ m/s}$) نشان داده شده است. با افزایش سرعت دورانی با توجه به افزایش شار گرمایی تولید شده در سطح مشترک ابزار و قطعه کار، دمای قطعه‌کار در هر دو فرایند افزایش می‌یابد. در جوشکاری زیر آب با وجود اینکه شار گرمایی ورودی بیشتر است، اما انتقال گرمایی بیشتری توسط آب انجام می‌شود و همین امر باعث می‌شود تا دمای قطعه کار نسبت به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا کمتر باشد. با افزایش فاصله از خط مرکزی جوش، اختلاف دما در دو نوع جوشکاری بیشتر می‌شود؛ یعنی تاثیر خنک‌کار بر مناطق زیر ابزار کمتر است که این امر به خاطر جوشش آب در این ناحیه و در نتیجه کمتر شدن اثر خنک‌کنندگی آب است. در سرعت دورانی‌های کمتر (شکل ۹ الف و ب)، با توجه به پایین بودن میزان دما، گرمای لازم برای انجام فرایند فراهم نمی‌شود. از طرفی دیگر با انجام جوشکاری در هوا و در سرعت دورانی‌های بالا (در اینجا ۴۵۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه) ماکزیمم دمای ایجاد شده به بیش از نقطه ذوب قطعه‌کار (583°C) رسیده که این امر به عدم موفقیت جوشکاری در هوا در شرایط مذکور دلالت دارد. اما چنین پدیده نامطلوبی برای جوشکاری در زیر آب اتفاق نمی‌افتد. بنابراین می‌توان گفت که در جوشکاری در هوا انجام فرایند در سرعت دورانی‌های ۱۵۰، ۲۵۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه با احتمال موفقیت کمتری همراه است حال آنکه چنین عدم موفقیتی برای جوشکاری در زیر آب متصور نیست که خود این امر توانایی این شرایط جوشکاری را می‌رساند.

توزیع دما در مناطق پسرو و پیشرو نسبت به محور ابزار نامتقارن می‌باشد. دما در منطقه پسرو به نسبت پیشرو بیشتر بوده که این امر بدلیل تجمع بیشتر گرما در منطقه پشت ابزار در حین جوشکاری است. جوشکاری در زیر آب در مقایسه با جوشکاری در هوا دارای تغییرات شدیدی در کاهش دما با فاصله از مرکز جوش بوده که این امر بدلیل خنک‌کنندگی آب می‌باشد.

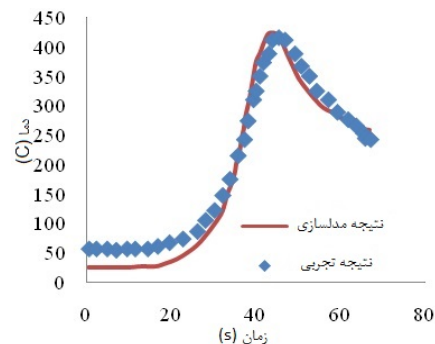


(الف)



(ب)

شکل ۵- نتایج مدلسازی و آزمایشها برای حداکثر دما با فاصله از مرکز جوش برای الف- جوشکاری در هوا و ب- در زیر آب



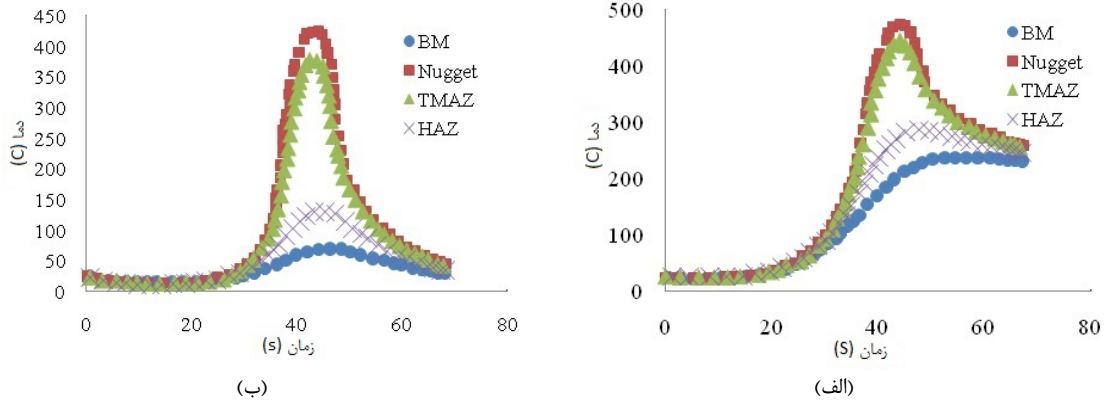
شکل ۶- نتایج مدلسازی و نتایج آزمایشها برای توزیع دما با زمان در جوشکاری در هوا و در منطقه HAZ

در شکل ۷ توزیع دما در مناطق مختلف جوش و در شکل ۸ این توزیع به شکل مشخصی برای منطقه HAZ و TMAZ نشان داده شده است. در جوشکاری در هوا اختلاف دما در مناطق مختلف محسوس می‌باشد. اما در جوشکاری زیر آب به دلیل کنترل چرخه‌های گرمایی در مناطق اطراف ابزار، کاهش دمای بیشتری در منطقه HAZ و BM^۱ مشاهده می‌شود. چنین اختلاف مشهودی بین نتایج جوشکاری در هوا و در زیر آب در منطقه گرده جوش^۲ و TMAZ^۳ مشاهده نمی‌شود.

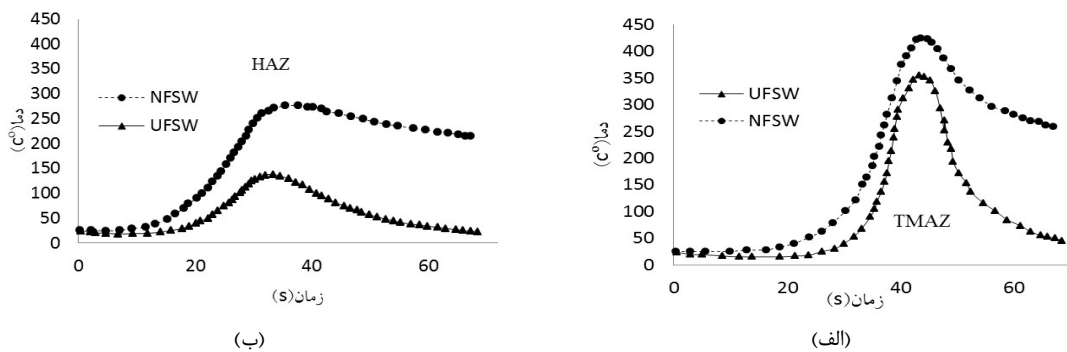
^۱Base Metal

^۲Nugget

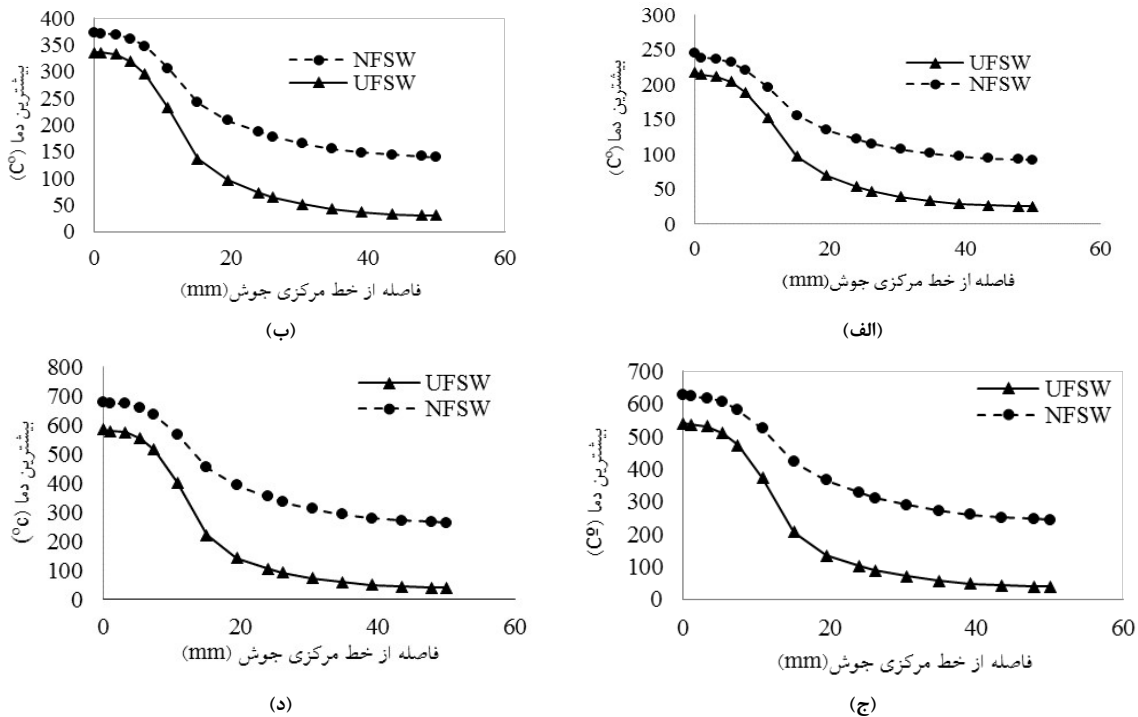
^۳Thermo Mechanical Affected Zone



شکل ۷- تغییرات دما در مناطق مختلف قطعه کار در $\omega = 344 \text{ rpm}$ و $V = 2/2 \text{ mm/s}$ برای الف- جوشکاری در هوا و ب- در زیر آب



شکل ۸- توزیع دما در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا (NFSW) و زیر آب (UFSW) در مناطق الف- TMAZ ب- HAZ



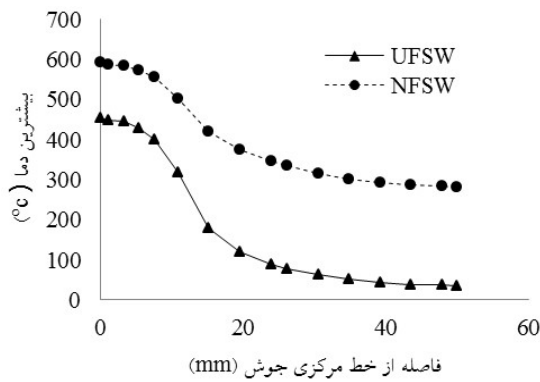
شکل ۹- توزیع دما در عرض قطعه کار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا (NFSW) و زیر آب (UFSW) در الف- 150 rpm ب- 450 rpm ج- 500 rpm د- 450 rpm

۴-۴- تاثیر سرعت پیشروی

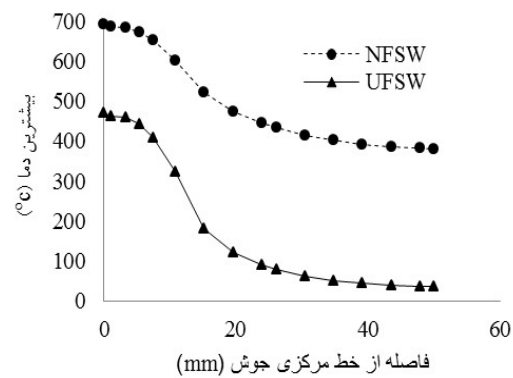
برای بررسی تاثیر سرعت پیشروی، سرعت پیشروی‌های مختلف برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور با فرض ثابت بودن سایر شرایط، مدلسازی برای سرعت های ۵/۵، ۳، ۱/۵، ۱ انجام شد. در شکل ۱۰ مقایسه توزیع دما در عرض قطعه‌کار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب در سرعت پیشروی‌های مختلف و با سرعت دورانی ثابت (۳۴۴rpm) نشان داده شده است. با افزایش سرعت پیشروی، با توجه به کاهش زمان انجام فرایند و کاهش انباشت گرما، دمای قطعه‌کار در هر دو فرایند کاهش می‌یابد. سرعت پیشروی بیشترین تاثیر را بر جوشکاری در هوا دارد و در جوشکاری در زیر آب با تغییرات سرعت پیشروی، دمای بیشینه قطعه‌کار دستخوش تغییر چندانی نمی‌شود. در سرعت‌های پایین اختلاف دما در جوشکاری در هوا و زیر آب چشمگیر است، اما با افزایش سرعت پیشروی، اختلاف دما در جوشکاری در هوا و در زیر آب کمتر می‌شود. بطوریکه در سرعت‌های ۴ و ۵/۵ mm/s بیشینه دمای ایجاد شده در منطقه اغتشاشی، در جوشکاری در زیر آب نسبت به جوشکاری در هوا بیشتر است. دلیل این امر این است که با

افزایش سرعت جوشکاری مدت زمان تماس ابزار با سطح قطعه‌کار و در نتیجه شار گرمایی ایجاد شده کمتر می‌شود. با ایجاد حرارت کمتر ناحیه جوششی آب کمتر می‌گردد و همین امر منجر به نرخ انتقال حرارت سریع از سطح قطعه‌کار و اختلاف کمتر بیشینه دما در جوشکاری زیر آب و در هوا می‌شود.

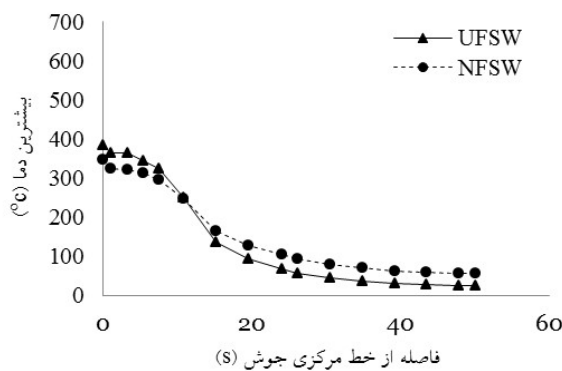
با توجه به شکل ۱۱ و با مقایسه تاثیر سرعت دورانی و سرعت جوشکاری می‌توان نتیجه گرفت که سرعت جوشکاری نسبت به سرعت دورانی دارای تاثیر کمتری می‌باشد. به عنوان مثال و برای یک حالت خاص سرعت دورانی ۳۴۴ دور بر دقیقه هنگامیکه سرعت جوشکاری از مقدار ۲/۲ به ۳ میلی‌متر بر ثانیه افزایش می‌یابد، مقدار کاهش دمای بیشینه به ترتیب ۲۰ و ۸۰ درجه سلسیوس برای جوشکاری در زیر آب و هوا مشاهده می‌شود. حال آنکه در سرعت جوشکاری ۲/۲ میلی‌متر بر ثانیه اگر سرعت دورانی از ۳۴۴ به ۲۵۰ دور بر دقیقه کاهش یابد، میزان کاهش در دمای بیشینه به ترتیب برابر با ۱۱۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس برای جوشکاری در زیر آب و در هوا می‌باشد.



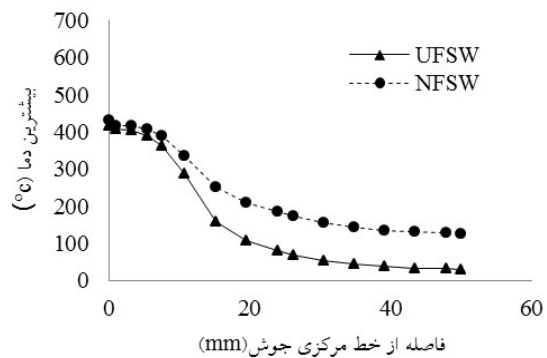
(ب)



(ف)



(د)

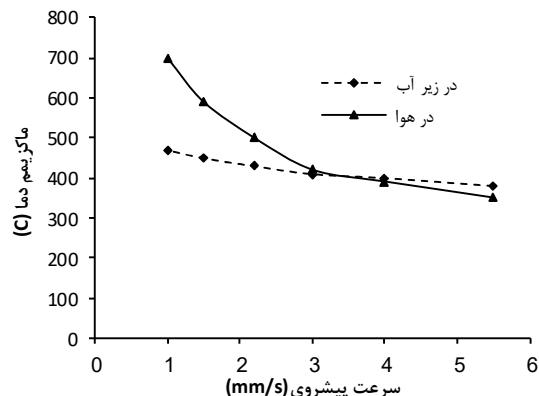
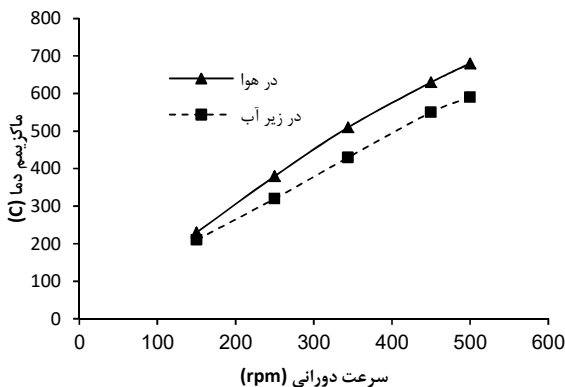


(ج)

شکل ۱۰- توزیع دما در عرض قطعه‌کار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا (NFSW) و زیر آب (UFSW) در ۳۴۴ rpm و الف - $V=1\text{mm/s}$ ب - $V=1/5\text{mm/s}$ ج - $V=3\text{mm/s}$ د - $V=5/5\text{mm/s}$

جوشکاری روی بیشینه دما در جوشکاری در هوا در مقایسه با جوشکاری در زیر آب و به ویژه در سرعت پیشروی‌های پایین بیشتر است که این نتیجه را می‌توان از شکل ۱۱ الف استخراج کرد.

با استناد به این نتایج می‌توان گفت که تاثیر سرعت دورانی روی ماکزیمم دمای تجربه شده توسط قطعه‌کار در مقایسه با سرعت جوشکاری بیشتر است. یک نتیجه مهم دیگر اینکه تاثیر سرعت



شکل ۱۱- تاثیر الف- سرعت جوشکاری و ب- سرعت دورانی روی بیشینه دما در جوشکاری زیر آب و در هوا

۶- نمادها

گرمای ویژه ($J/kg \text{ } ^\circ C$)	c_p
ضریب انتقال گرمایی جابجایی ($W/m^2.C$)	h
رسانایی گرمایی ($W/m.C$)	k
طول پین (m)	l
گشتاور (N.m)	M
سرعت دورانی (rpm)	N
بردار نرمال	n
فشار (Pa)	P
شار گرمایی (W/m^2)	q
شعاع پین (m)	r_p
شعاع شانه (m)	r_s
دما	T
زمان	t
دمای اولیه	T_0
دمای محیط	T_a
سرعت جوشکاری (mm/s)	V
مختصاتهای فضایی	x, y, z
چگالی (kgm^{-3})	ρ
ضریب اصطکاک	μ
ضریب پخش حرارتی	ϵ
ثابت بولتزمان	σ
سرعت دورانی (rad/s)	ω
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	FSW
منطقه متاثر از گرما	HAZ
منطقه متاثر از کارمکانیکی	TMAZ
فلز پایه	BM
گرده جوش	Nugget

۵- نتیجه گیری

مدلسازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در هوا و در زیر آب انجام گرفت که در مقایسه با نتایج تجربی مطابقت مناسبی مشاهده گردید. نتایج اخذ شده از مدلسازی در رابطه با تاثیر حضور خنک‌کار، سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری را می‌توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

- حضور خنک‌کار منجر به تجربه دمای کمتر توسط قطعه‌کار و کنترل چرخه‌های گرمایی در مناطق اطراف ابزار مانند HAZ می‌گردد.
- در سرعت جوشکاری ثابت، افزایش سرعت دورانی به دلیل افزایش شار گرمایی باعث بالا رفتن دمای بیشینه در قطعه‌کار می‌گردد ولی همچنان بدلیل حضور خنک‌کار این دما در زیر آب کمتر از هوا است.
- در جوشکاری در هوا افزایش سرعت دورانی منجر به افزایش شار حرارتی تولید شده و ذوب شدن قطعه کار و عدم جوش مناسب می‌گردد حال آنکه در زیر آب چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد.
- در سرعت دورانی ثابت، با افزایش سرعت جوشکاری، اختلاف دمایی بین جوشکاری در زیر آب و در هوا کمتر می‌گردد.
- در سرعت جوشهای پایین بدلیل تولید شار گرمایی زیاد و در سرعت‌های بالا بدلیل تولید شار گرمایی کم، جوشکاری در هوا با عدم موفقیت همراه است حال آنکه در زیر آب چنین اتفاق‌های نامطلوبی رخ نمی‌دهد.
- در آنالیز حرارتی تاثیر سرعت دورانی بیشتر از سرعت جوشکاری است و اینکه در جوشکاری در هوا شاهد تاثیر بیشتر سرعت جوشکاری در مقایسه با زیر آب خواهیم بود.

- [1] Prasanna P., Rao S., and Mohana Rao G.K., Experimental and numerical evaluation of friction stir welds of AA6061-T6 aluminum alloy, Arpin journal of engineering and applied sciences, Vol. 6, pp. 1-18, 2010.
- [2] Song M. and Kovacevic R., Thermal modeling in a moving coordinate system and its validation, International journal of machine tools & manufacture, Vol. 43, pp. 605-615, 2003.
- [3] Colegrove P. and Shercliff H., 3-Dimensional cfd modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile, Journal of materials processin thechnology, Vol. 169, pp. 320-327, 2005.
- [4] Lin S. B., Zhao Y. H. and Wu L., Modeling of Friction Stir Welding process for tools design, Higher Education Press and springer, pp. 236-245, 2011.
- [5] Bloodworth T., On the immersed friction stir welding of AA6061-T6, a metallurgic and mechanical compardion to friction stir weling, M.Sc Thesis , Vanderbilt university, 2009
- [6] Uyyuru R. K., Kailas S.V. , Numerical analysis of friction stir welding process, JMEPEG, Vol. 15, pp. 505-518, 2006.
- [7] Park K., Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process, Phd Thesis, Mechanical Engineering Department, university of Michigan, 2009.
- [8] Jweeg M. J., Tolephih M. H. and Abdul-Sattar M., Theoretical and experimental investigation of transient temperature distribution friction stir welding of AA 7020-T53, Jomal of Engineering, Vol. 6, pp. 693-709, 2012.
- [9] Selvamani S. T., Umantha K. and Palanikumar K., Heat transfer analysis during friction stir welding of Al 6061-T6 alloy, International Jomal of Engineering Research and Application, Vol. 4, pp. 1453- 1460, 2012.
- [10] Prasanna P., Roa S., and Krishna Mohana Rao G., Finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding and its validation, Int J Adv Monuf Technol, Vol. 51, pp. 925-933, 2012.
- [11] Zhang H. J., Liu H.J. and Yu L., Effect of Water Cooling on the performances of Friction Stir Welding Heat- Zone, JMEPEG, Vol. 21, pp. 1182-1187, 2011.
- [12] Liu H. J., Zhang H. J., Huang Y. X., and Yu L., Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc, Vol. 20, pp. 1387-1391, 2009.
- [13] She W. K., Lei W. J. and Wen W., Underwater friction stir welding of ultrafine grained 2017 aluminum alloy, J. Cent. South Univ, Vol. 19, pp. 2081-2085, 2012.
- [14] Stewart C., Feasibility of underwater friction stir weldinn of HY-80 steel, PhD Thesis , Naval postgraduate school Monterey, Califomia, 2011.
- [15] Fu R. D., Sun Z. Q., Sun R. C., Improvement of weld temperature distribution and mechanical properties of 7050 aluminum alloy butt joints by submerged friction stir welding, Materials and Design, Vol. 32, pp. 4825-4831, 2011.
- [16] Zhang H. J., Liu H. J. and Yu L., Thermal modeling of underwater friction stir welding of high strength aluminum alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc., Vol. 23, pp. 1114-1122, 2013.
- [17] Soudararajan V., Zekovic S., and Kovacevic R., Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061, International Journal of machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp.1577- 1587, 2005.
- [18] Kırıl B. G., Tabanoğlu M. and Serindağ H.T., Finite element modeling of friction stir welding in Aaluminum alloys Joint, Mathematical and Computational Application, Vol. 18, pp. 122-131, 2013.
- [19] Doos M., Jweeg M. J. and Ridha S. D., Analysis of friction stir welds. Part I: transient thermal simulation using moving heat source, The 1stRegional Conference of Eng. Sci. NUCEJ Spacial Issue., pp. 429-437, 2008.
- [20] Vepakomma K. H., Three dimensional thermal modeling of fricton stir processing, MSc Thesis, department of mechanical engineering, Florida State University, 2006.