



## بررسی عددی و پیش بینی اندازه دانه‌ها در مناطق مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیومی ۶۰۶۱

امیر غیاثوند<sup>۱</sup>، مهدی کاظمی<sup>۲\*</sup>، مازیار مهدی پور جلیلیان<sup>۳</sup>

۱- دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، ایران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر

۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

### کلمات کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

اندازه دانه

اجزاء محدود

مناطق جوش

آلیاژ آلومینیوم.

**خلاصه:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک تکنیک اتصال جامد می‌باشد که بر اساس دو عامل فشار بزرگ‌تر از تسلیم و تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک اتصال نهایی بین قطعات در هندسه‌های جوش متفاوت صورت می‌پذیرد. اندازه دانه‌ها در مناطق جوش مبتنی بر سه رویداد ریکاوری، تبلور مجدد و رشد دانه‌ها می‌باشد که بر اساس میزان پیشرفت هر کدام از این مراحل، اندازه ذرات نهایی حاصل می‌گردد. در پژوهش حاضر با استفاده از روشی تحلیلی-عددی بر پایه شبیه‌سازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ اندازه ذرات نهایی در نواحی مختلف جوش پیش‌بینی شده است. شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند به واسطه نرم‌افزار آباکوس و با رویکرد کوپل اویلر لاگرانژی صورت پذیرفت. به منظور صحت‌سنجی، نتایج حاصل از مدل نوین با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت، نتایج در مطابقت مناسبی با نتایج تجربی قرار داشت. با توجه به تمرکز حرارت و جریان پلاستیک در منطقه مرکزی جوش، منطقه اغتشاش بیشترین تغییرات ریزساختاری را داشت و میزان اندازه دانه‌ها در این ناحیه دچار کاهش شدیدتری نسبت به سایر مناطق مختلف جوش گردید. بررسی تفاوت اندازه دانه‌ها در دو ناحیه پیش‌رو و پس‌رو نیز مورد مطالعه قرار گرفت و تفاوت مشهودی در اندازه ذرات در این دو ناحیه مشاهده شد.

### ۱- مقدمه

به واسطه تماس و اصطکاک شدید دو قطعه را گرم می‌کند و تحت تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک قرار می‌دهد [۶]. ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به واسطه دو سرعت دورانی و خطی توأم، جریان بزرگی در حول خود ایجاد می‌کند که این جریان مواد، موجب ایجاد اتصال در قطعه‌کار می‌گردد. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به سایر روش‌های جوشکاری انرژی ورودی مورد نیاز کمتری مصرف می‌کند، به گاز محافظ و فلاکس و ماده پرکننده خارجی نیازی ندارد و سازگار با محیط زیست است [۷]. بواسطه این تکنیک می‌توان گستره‌ی وسیعی از مواد فلزی و پلیمری را بدون تغییرات شدید ترکیب شیمیایی اولیه آن‌ها جوشکاری کرد، حتی می‌توان مواد و آلیاژهایی با ترکیب متفاوت را نیز جوشکاری کرد [۸]. از این روش جوشکاری برای وضعیت‌های مختلف جوشکاری مانند جوش لب به لب و جوشکاری لوله‌ها استفاده می‌شود. با توجه به مزایای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مطالعه اثرات متغیرهای این فرآیند و همچنین بهبود کارایی و بازدهی انرژی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. پارامترهای موثر در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در

از میان تکنیک‌های موجود و مورد استفاده جهت اتصال قطعات، جوشکاری را می‌توان پرکاربردترین و محبوب‌ترین تکنیک دانست [۱]. این روش اتصال دارای مزایای ویژه و قابل توجهی می‌باشد اما معایبی نیز به همراه دارد. به دلیل مشکلات ناشی از ذوب محلی ایجاد شده در حین جوشکاری‌های سنتی (جوش ذوبی)، کیفیت مکانیکی اتصال به طور معمول با افت قابل توجهی روبرو می‌شود [۲]. ایده استفاده از تکنیک‌هایی که به واسطه آن بتوان اتصال را در شرایط عدم ذوب مواد به وجود آورد، پژوهشگران را به سوی ابداع فرایندهای اتصال حالت جامد سوق داده است [۳]. عموماً در روش اتصال حالت جامد، به واسطه دو فاکتور فشار و تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک اتصال نهایی در دو قطعه شکل می‌گیرد [۴]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> یک تکنیک اتصال حالت جامد می‌باشد که می‌توان به واسطه آن قطعات هم‌جنس و غیر هم‌جنس را جوش داد [۵]. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک ابزار دوار مصرف‌نشده‌ی

1 Friction Stir Welding

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kazemii.m@gmail.com



دو دسته کلی پارامترهای فرایند و هندسه ابزار دسته‌بندی می‌شوند [۹]. با تغییر در شرایط هرکدام از پارامترها، توزیع حرارت و نحوه توزیع جریان مواد در فرایند تغییر می‌کند که در نهایت منجر به تغییر کیفیت نهایی اتصال می‌شود. مهم‌ترین فاکتور اثرگذار بر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دما و الگوی توزیع حرارت در قطعه‌کار می‌باشد [۵]. حرارت ایجادشده در فرایند از دو عامل اصطکاک میان ابزار و قطعه‌کار و حرارت ناشی از جریان پلاستیک مواد نشأت می‌گیرد، هر چند که سهم عامل نخست (عامل اصطکاک) بسیار بزرگ‌تر از عامل دیگر است [۱۰]. به دلیل اینکه ابزار تماماً دارای دو سرعت دورانی و خطی می‌باشد، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارای ماهیتی نامتقارن از نقطه نظر توزیع حرارت و توزیع جریان پلاستیک و توزیع ریزساختار در دو سوی خط جوش می‌شود [۱۱]. سمتی که در آن دو سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار داری جهتی هم‌سو می‌باشند را سمت پیش‌رو<sup>۱</sup> و سمتی که دو سرعت مزبور در خلاف جهت یکدیگر باشند را اصطلاحاً سمت پس‌رو<sup>۲</sup> می‌نامند. دو سمت پیش‌رو و پس‌رو تفاوت‌های قابل توجهی در نحوه توزیع حرارت و توزیع جریان پلاستیک با یکدیگر دارند، این تفاوت‌ها موجب اختلاف قابل توجهی در کیفیت مکانیکی و متالورژیکی در این نواحی می‌گردد [۱۲].

با توجه به دو عامل زمان و هزینه‌ی بالای تست‌های آزمایشگاهی جهت برآورد و پیش‌بینی خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال حاصل از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مدلسازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان راهکاری مناسب جهت مطالعه فرایند جوشکاری شناخته می‌شود. پژوهش‌های نسبتاً زیادی در زمینه مدلسازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی صورت پذیرفته است. چائو و همکارانش [۱۳] با استفاده از یک مدل حرارتی که در آن ضریب اصطکاک ثابت فرض شده بود به پیش‌بینی توزیع دمای قطعه‌کار پرداختند. سونگ و همکارانش [۱۴] مدلی بر اساس منبع حرارتی متحرک جهت پیش‌بینی دمای ایجادشده در قطعه‌کار ایجاد نمودند، در پژوهش آن‌ها هر دو منبع حرارت تولیدشده توسط دیواره پین و شانه ابزار در نظر گرفته شد. غیاثوند و حسنی‌فرد [۱۵] با استفاده از رویکرد کوپل اویلر لاگرانژی<sup>۳</sup>

به شبیه‌سازی عددی دو فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای پرداختند و دما و نیروی وارده بر ابزار را برای هر دو فرایند محاسبه نمودند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از پژوهش آن‌ها رویکرد کوپل اویلر لاگرانژی به خوبی توانایی پیش‌بینی دما و نیروی مورد نیاز جهت انجام فرایند جوشکاری را داراست. ناندان و همکارانش [۱۶] به واسطه یک مدل سه بعدی کوپل دما-جابجایی به بررسی و مطالعه انتقال حرارت و جریان پلاستیک مواد در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد نرم پرداختند، بر اساس نتایج حاصله با افزایش سرعت دورانی ابزار جریان پلاستیک و حرارت تولیدی در فرایند به شدت افزایش می‌یابد. یادوانشی و همکارانش [۱۷] به شبیه‌سازی اجزاء محدود و ارائه یک مدل انتقال حرارت سه بعدی جهت پیش‌بینی دما در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آل بادور و همکارانش [۱۸] با ایجاد یک مدل سه بعدی اجزاء محدود بر اساس استفاده از رویکرد کوپل اویلر لاگرانژی به مدلسازی حرارتی ابزار و قطعه‌کار در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند، بر اساس نتایج بدست‌آمده در پژوهش آن‌ها، استفاده از تکنیک کوپل اویلر لاگرانژی موجب پیش‌بینی نسبتاً مناسبی از توزیع دما در ابزار و قطعه‌کار و نحوه جریان مواد در منطقه مختلف جوش خواهد شد. انصاری و همکارانش [۱۹] به بررسی و شبیه‌سازی فرایند پردازش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیومی ۵۰۸۳ با استفاده از تکنیک کوپل اویلر لاگرانژی پرداختند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از پژوهش آن‌ها، این روش عددی قابلیت تحلیل تنش و تحلیل حرارتی فرایند را بخوبی داراست. اسکندری و همکارانش [۲۰] به بررسی تغییرات میکروساختاری و حرارتی اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر هم جنس دو آلیاژ ۶۰۶۱ و ۳۹۰ پرداختند. بر اساس نتایج مشخص شد که قرارگیری آلیاژ ۶۰۶۱ در سمت پیش‌رو موجب غالب شدن تاثیر نرخ کرنش نسبت به دما بر اندازه دانه‌های هسته جوش خواهد داشت. وو و همکارانش [۲۱] به بررسی، شبیه‌سازی و مطالعه توزیع ریزساختار و توزیع دما در جریان فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از نرم افزار دفرم<sup>۴</sup> پرداختند. آن‌ها بواسطه توزیع دما و نرخ کرنش در هسته جوش به برآورد اندازه دانه‌ها پرداختند.

با توجه به بررسی پیشینه پژوهش مشخص شد که عموماً

1 Advancing Side (AS)  
2 Retreating Side (RS)  
3 Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL)

محدود آباکوس قابلیت شبیه‌سازی مسائل پیچیده‌ی مهندسی نظیر فرایندهای جوشکاری سنتی و جوشکاری‌های جدید همچون فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را داراست.

با توجه به پیچیدگی موجود در برهمکنش عوامل مختلف اثرگذار بر کیفیت اتصال نهایی و عدم وجود شیوه تحلیلی کارآمد برای مدل‌سازی توزیع حرارت و محاسبه جابجایی‌ها در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، همواره شبیه‌سازی اجزاء محدود راهکاری قابل اتکاء برای محققین به حساب آمده است. با توجه به وجود جابجایی‌های بزرگ در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باید از روشی استفاده نمود که پیش‌بینی صحیحی از تولید حرارت و کرنش‌های پلاستیک را به عمل آورد. بدین منظور می‌توان از سه رویکرد لاگرانژی، لاگرانژی-اویلری و کوپل اویلر لاگرانژی استفاده نمود. در صورت استفاده از رویکرد لاگرانژی برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل تغییر شکل المان‌ها و حرکت گره‌های المانی در سه درجه آزادی انتقالی، شاهد انحراف و اعوجاج بیش از حد المان‌ها خواهیم بود. همین مسأله موجب اعوجاج المان‌ها می‌گردد و در نهایت آنالیزی ناکارآمد حاصل خواهد شد مگر این که شبکه‌بندی و مش بسیار ریزتری در سرتاسر مدل به کار گرفته شود که این تغییر سبب بالارفتن هزینه و زمان آنالیز خواهد شد که از لحاظ کارایی مقرون به صرفه نخواهد بود. تکنیک لاگرانژی-اویلری در شبیه‌سازی از شیوه‌ای استفاده می‌کند که در آن همچنان گره‌های المانی قابلیت حرکت داشته اما شکل المان‌ها در طول جابجایی پلاستیک به طور تقریبی حفظ شده و فقط از لحاظ مقیاس ابعادی دست‌خوش تغییر می‌گردند. در پژوهش حاضر از تکنیک کوپل اویلر لاگرانژی برای شبیه‌سازی

جدول ۱. خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ ۶۰۶۱ [۲۳]

**Table 1 Mechanical and thermal properties of AA6061-T6 alloy [23]**

$\alpha$ ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$C_p$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	$\nu$	$E$ (GPa)	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )
۲۳/۵	۲۶۹۰	۹۴۵	۰/۳۳	۶۶/۹۴	۲۰
۲۴/۶	۲۶۹۰	۹۷۸	۰/۳۳	۶۳/۲۱	۱۰۰
۲۵/۷	۲۶۷۰	۱۰۰۰	۰/۳۳	۶۱/۳۲	۱۴۹
۲۶/۶	۲۶۶۰	۱۰۳۰	۰/۳۳	۵۶/۸۰	۲۰۴
۲۷/۶	۲۶۶۰	۱۰۵۲	۰/۳۳	۵۱/۱۵	۲۶۰
۲۸/۵	۲۶۶۰	۱۰۸۰	۰/۳۶	۴۷/۱۷	۳۱۶
۲۹/۶	۲۶۳۰	۱۱۰۰	۰/۴۰	۴۳/۵۱	۳۷۱
۳۰/۷	۲۶۳۰	۱۱۳۰	۰/۴۱	۲۸/۷۱	۳۲۷
۳۱/۲	۲۶۰۰	۱۲۷۶	۰/۴۲	۲۰/۰۲	۴۸۲

شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته توسط محققین به منظور برآورد دما، جریان پلاستیک، تنش‌های پسماند و نیروهای اعمالی بر ابزار صورت پذیرفته است و شبیه‌سازی و بررسی عددی تغییرات ریزساختاری و پیش‌بینی اندازه دانه‌ها در جریان فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مناطق مختلف جوش تاکنون مورد مطالعه واقع نشده است. از این رو در پژوهش حاضر با استفاده از ترکیبی از معادلات تحلیلی و شبیه‌سازی عددی فرایند جوشکاری بواسطه نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، به پیش‌بینی اندازه دانه‌ها در مناطق مختلف مقطع جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. هدف عمده و اصلی پژوهش حاضر پیش‌بینی اندازه دانه‌ها و تکامل آن در مناطق مختلف مقطع جوش به واسطه تکنیک مورد نظر است. در ابتدا دما، کرنش، نرخ کرنش در طی فرایند با استفاده از مدل اجزاء محدود بر پایه رویکرد کوپل اویلر لاگرانژی محاسبه شده است، سپس با استفاده از این نتایج و بکارگیری روابط تحلیلی، اندازه ذرات نواحی مختلف جوش پیش‌بینی شده است. در نهایت به منظور صحت‌گذاری شرایط مدل، نتایج حاصل از مطالعات عددی صورت‌گرفته در پژوهش حاضر با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- مدل عددی اجزاء محدود

روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند، می‌باشد. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی، مسئله مهم دستیابی به معادله‌ای است که از نظر عددی پایدار باشد، به این معنا که خطا در داده‌های اولیه و در حین حل آن قدر نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آنها است.

استفاده از روش حل اجزاء محدود در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی که دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست و یا اگر نتایج همبستگی و یکنواختی کافی را ندارند، بسیار مفید می‌باشد. نرم افزار اجزاء

که در این رابطه  $\sigma_0$  تنش تسلیم،  $\epsilon_{pl}$  کرنش پلاستیک موثر،  $\dot{\epsilon}_{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک معادل،  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش نرمال شده است،  $T$ ،  $T_{ref}$  و  $T_{melt}$  به ترتیب دما، دمای مرجع و دمای ذوب ماده می‌باشد،  $n$ ،  $C$ ،  $B$ ،  $A$  و  $m$  نیز ثابت‌های ماده هستند که برای مواد مختلف بواسطه تست هایپکینسون محاسبه می‌شوند [۲۵]. این مدل پلاستیک به طور مناسب اثرات مربوط به دما و نرخ کرنش را در نظر گرفته و نتایج مناسب‌تری را حاصل می‌کند. با مشخص بودن موارد فوق می‌توان به درستی شرایط و جریان را در فاز پلاستیک ماده محاسبه نمود. ثوابت جانسون کوک آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول ۲ ارائه شده است [۲۶].

جهت مدلسازی شرایط و برهمکنش اصطکاکی میان ابزار و قطعه کار از تکنیک تماس عمومی در نرم افزار بهره گرفته شد. به منظور برآورد میزان ضریب اصطکاک  $\mu$  از مدل اصطکاکی کولمب توسعه یافته استفاده گردید [۲۷] که روابط آن به صورت زیر می‌باشد.

$$\mu\sigma_n \geq \tau_{max} \rightarrow \tau_f = \tau_{max} \quad (2)$$

$$\mu\sigma_n < \tau_{max} \rightarrow \tau_f = \mu\sigma_n \quad (3)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

در این روابط  $\tau_f$  تنش برشی ناشی از اصطکاک است و این تنش به صورت حالت شرطی مشخص شده حاصل می‌گردد، به منظور مشخص سازی تنش برشی ماکزیمم  $\tau_{max}$  از معیار فون مایز بهره گرفته شد و برابر با رابطه مشخص شده (رابطه (۴)) در نظر گرفته شد که در این رابطه  $\sigma_n$  تنش نرمال و  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده قطعه کار است. لازم به ذکر است که از ضریب اصطکاک وابسته به دما در مدل استفاده گردید [۲۷ و ۲۸].

شرایط مرزی اعمالی بر قطعه کار و ابزار از جنس سرعت کنترل در نظر گرفته شد و به ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سرعت دورانی و سرعت انتقالی متناسب با کار تجربی نسبت داده شد. ابزار دارای دو

استفاده شده است. در این تکنیک از کوپل المان‌های اویلری و لاگرانژی استفاده شده است، بر خلاف المان لاگرانژی المان‌های اویلری هیچ‌گونه تغییری در هندسه خود را تجربه نمی‌کنند و هندسه این المان‌ها در طول شبیه‌سازی ثابت باقی خواهد ماند، المان اویلری در ابتدا خالی از ماده است و باید ماده در حجم مورد نظر به آن نسبت داده شود. به دلیل عدم اعوجاج در المان‌های اویلری، این المان‌ها به سادگی توانایی مدل کردن تغییر شکل‌های بزرگ را دارا می‌باشند و از نقطه نظر هزینه شبیه‌سازی نیز از کارایی بالایی برخوردار هستند. ابعاد و شرایط پارامتری فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی شبیه‌سازی شده بر مبنای شرایط کار تجربی انجام شده توسط وو و همکارانش صورت گرفت [۲۲]. بدین صورت که ابعاد نهایی قطعه کار مطابق با شرایط آزمایشگاهی برابر با  $100 \times 60 \times 6/85$  میلی‌متر در نظر گرفته شد که به دو بخش مجزا از هم تقسیم‌بندی شد. مطابق با کار تجربی سرعت دورانی ابزار مطابق با کار تجربی برابر با ۱۵۶ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی برابر با  $0/42$  میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

ابزار مورد استفاده در پژوهش حاضر مطابق با کار تجربی دارای قطر شانه  $25/4$ ، قطر پین برابر با  $6/35$  و ارتفاع پین برابر با ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. به علت عدم تغییر شکل محسوس در ابزار از اعمال قید جسم صلب بر ابزار بهره گرفته شد. با توجه به اینکه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در دمای بالا و تحت تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ صورت می‌پذیرد، می‌بایست به صورت یک مسأله کوپل دما-جابجایی مورد حل قرار گیرد. از این رو نیاز است که خواص مکانیکی و حرارتی مواد به طور دقیق تعریف شده و به نرم‌افزار معرفی شود. خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مطابق با جدول ۱ در نرم افزار تعریف گردید [۲۳].

که در این جدول  $T$  دما،  $E$  مدول الاستیسیته،  $U$  نسبت پواسون،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $\rho$  چگالی و  $\alpha$  ضریب انبساط است. به منظور مدل‌سازی شرایط تنش‌ها و کرنش‌ها و همچنین مدلسازی جریان در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از مدل ویسکو پلاستیک جانسون-کوک استفاده شد [۲۴].

جدول ۲. پارامترهای جانسون-کوک آلیاژ ۶۰۶۱ [۲۶]  
Table 2. Johnson-Cook Parameters of AA6061-T6 [26]

$T_{ref}$ (°C)	$T_{melt}$ (°C)	$m$	$n$	$C$	$B$ (MPa)	$A$ (MPa)
۲۴	۵۸۳	۱/۳۴	۰/۴۲	۰/۰۰۲	۱۱۴	۳۲۴

$$\sigma_0 = \left( A + B \bar{\epsilon}_{pl}^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_{ref}}{T_{ref} - T_{melt}} \right)^m \right) \quad (1)$$

به دلیل کوپل بودن میدان‌های حرارت و جابجایی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از حلگر صریح کوپل دما-جابجایی استفاده شد. زمان گام‌های جوشکاری (مراحل نفوذ ابزار، جوش و خروج ابزار) بر اساس کار تجربی محاسبه شد [۱۹].

روند پژوهش بدین صورت می‌باشد که پس از پایان شبیه‌سازی با استفاده از نتایج ترم دما و نرخ کرنش در مناطق مختلف مقطع جوش و با استفاده از روابط تحلیلی تکنیک اتوماتیک سلولی به پیش‌بینی اندازه ذرات در مناطق مختلف جوش پرداخته شد.

### ۳- مدل تحلیلی پیش‌بینی اندازه دانه

مدل اتوماتیک سلولی یک مدل تحلیلی جهت پیش‌بینی تغییرات ریزساختاری می‌باشد که توسط محققین استفاده می‌گردد. این مدل یک مدل فضا گسسته و زمان گسسته می‌باشد که در آن فضا به به بخش‌های کوچک و مساوی تقسیم‌بندی شده است که هر کدام از آنها به واسطه شماره‌ای از پیش‌اختصاص یافته مشخص می‌شوند. به طور کلی وضعیت هر کدام از این سلول‌های کوچک بر اساس وضعیت سلول‌های مجاور آن تغییر خواهد نمود. مدل اتوماتیک سلولی اغلب با مدل اجزاء محدود به صورت کوپل در نظر گرفته می‌شود که نتیجه آن یک محیط گسسته/پیوسته ترکیبی خواهد بود.

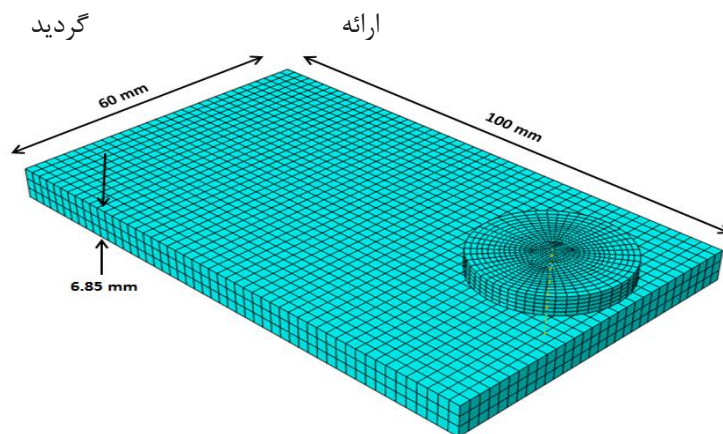
در پژوهش حاضر جهت ایجاد ارتباط و پیوسته‌سازی دو حوزه گسسته و پیوسته در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، از سابروتین UVARM استفاده شد تا بتوان متغیرهای جدیدی را بواسطه خروجی‌های موجود از نرم‌افزار تعریف نمود و این متغیرهای جدید را درخواست نمود.

قانون انتقال برای پیش‌بینی نهایی اندازه ذرات به واسطه تابعی از دما کرنش و نرخ کرنش ایجاد می‌گردد که به واسطه بوفای و همکارانش [۲۶]

سرعت انتقالی و یک سرعت دورانی می‌باشد. وجوه مختلف قطعه‌کار به واسطه اختصاص سرعت در جهات مشخص مقید گردید.

به دلیل انتقال حرارت بین قطعه‌کار و محیط، یک شرایط مرزی حرارتی جابجایی برای قطعه‌کار با ضریب انتقال حرارت  $30 \text{ W/m}^2\text{K}$  با دمای محیط  $22$  درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل عدم مدل‌سازی سندان و انتقال حرارت صورت گرفته از قطعه‌کار به آن یک ضریب انتقال حرارت جابجایی مجازی و جایگزین نسبتاً بزرگ به اندازه  $350 \text{ W/m}^2\text{K}$  با دمای محیط محیطی  $22$  درجه سانتیگراد لحاظ گردید [۲۹]. دمای اولیه نمونه و ابزار  $22$  درجه سانتیگراد در نظر گرفته و به دو قسمت مورد نظر اختصاص داده شد. از مش پیوسته در کل قطعه‌کار استفاده گردید و طول هر یک از المان‌ها با دانه‌بندی  $2$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. از المان‌های خانواده EC۳D۸RT برای قطعه‌کار استفاده شد، این المان‌ها دارای چهار درجه آزادی (سه درجه آزادی جابجایی و یک درجه آزادی دما) می‌باشند. با توجه به استفاده از قید جسم صلب برای ابزار، وابستگی شرایط نمو زمانی به مش ابزار از بین رفت، به همین جهت برای آن از دانه‌بندی  $0.8$  میلی‌متری استفاده شد و نوع این المان‌ها از خانواده C۳D۸T در نظر گرفته شد. مدل مش خورده ابزار و قطعه‌کار در شکل ۱ نمایش داده شده است.

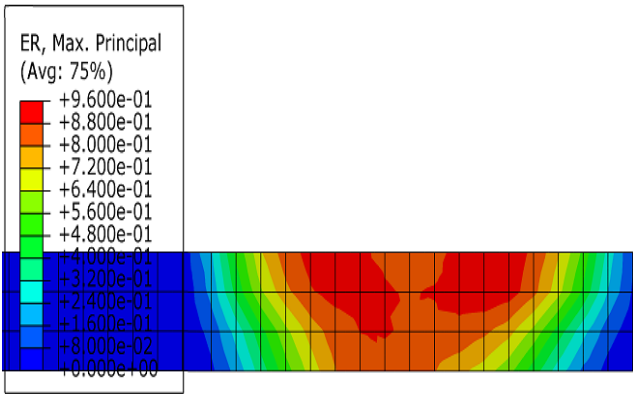
لازم به ذکر است که در جریان شبیه‌سازی‌ها، آنالیز حساسیت به شبکه (مش) به منظور دستیابی به پاسخ‌هایی با کمترین درصد خطا بر روی مدل عددی صورت پذیرفت. بدین منظور از  $5$  دانه‌بندی متفاوت برای شبکه‌بندی مدل اولیه استفاده شد و بر اساس نتایج همگرایی دمای پیک فرایند و مقایسه با نتایج تجربی اندازه دانه‌بندی بهینه (دانه‌بندی  $2$  میلی‌متری) شناسایی شد.



شکل ۱. شبکه‌بندی ابزار و قطعه‌کار

Fig. 1. Mesh of tool and workpiece





شکل ۳. کانتور نرخ کرنش در نواحی مقطع جوش

Fig. 3. Strain rate contour in weld cross sections

قطعه کار را پس از پایدار شدن وضعیت دمایی در نواحی مختلف جوش نمایش داده است.

بر اساس نتایج کانتوری ارائه شده در شکل ۲ مشخص شد که بالاترین دما در جریان فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در منطقه تحت شانه ابزار ایجاد می شود که دلیل آن اصطکاک شدید میان ابزار و قطعه کار در این ناحیه است. با بررسی پیک دمایی فرایند مشخص گردید که دمایی بیشینه همواره کمتر از دمایی ذوب آلیاژ می باشد که این موضوع بیانگر حالت جامد بودن فرایند اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می باشد.

مطابق با پارامتر دما و کرنش، بررسی و ثبت پارامتر نرخ کرنش نیز در سطح مقطع و در نواحی مختلف جوش صورت پذیرفت. کانتور نرخ کرنش مقطع جوش در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به وجود تمرکز حرارت و کرنش های پلاستیک بزرگ در منطقه اغتشاش (منطقه حضور پین ابزار) بزرگترین میزان نرخ کرنش در این ناحیه مشاهده می شود. این عامل سبب ایجاد تغییرات شدیدتر ریزساختاری در این ناحیه خواهد شد بدین صورت که پس از افزایش دما و نرخ کرنش سه عامل ریکاوری، تبلور مجدد دینامیکی و رشد دانه ها به ترتیب در صورت تداوم حرارت و زمان تکامل یافته و اندازه و جهت گیری دانه ها را در این منطقه دستخوش تغییر می نمایند [۵]. پس از ناحیه اغتشاش بالاترین میزان نرخ کرنش به ترتیب مربوط به منطقه تحت تأثیر تغییرات ترمومکانیکی و منطقه متأثر از حرارت می باشد. به طور کلی تغییرات نرخ کرنش در این نواحی موجب ایجاد تغییرات ریزساختاری مختصری در این مناطق جوش نیز خواهد شد.

$$D_{CDRX} = C \varepsilon^J \dot{\varepsilon}^k D_0^h \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5)$$

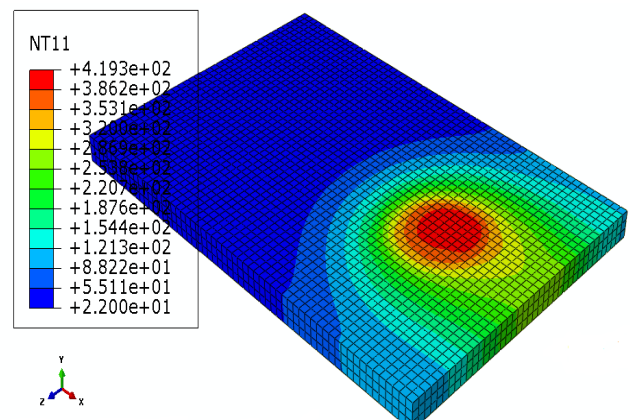
که در این رابطه  $D_{CDRX}$  متوسط اندازه دانه ها بر اساس تبلور مجدد دینامیکی،  $\varepsilon$  کرنش پلاستیک معادل و  $D_0$  اندازه دانه اولیه،  $Q$  انرژی فعال سازی تبلور مجدد،  $R$  ثابت جهانی گازها و  $J, C, K$  و  $h$  ثوابت ماده هستند که قبلاً توسط محققین محاسبه شده اند. مقادیر  $h$  و  $K, J, C$  برای استفاده گریدهای مشابه آلیاژی به ترتیب برابر با ۰/۱۶۴۸، ۰/۳۲۲، ۰/۱۰۴ و ۰/۱۶۴۸، ۰/۳۲۲، ۰/۱۰۴ و ۰/۱۶۴۸، ۰/۳۲۲، ۰/۱۰۴ می باشد [۲۸].

در پژوهش حاضر روند محاسبه اندازه دانه ها در مقطع جوش بدین صورت می باشد که نخست ترم های دما، کرنش و نرخ کرنش برای گره های واقع در مقطع جوش بواسطه شبیه سازی عددی محاسبه شده است سپس بواسطه سابروتین نویسی و استفاده از رابطه (۵) میزان اندازه دانه ها برای هر یک از گره های المانی واقع در مقطع جوش محاسبه شده است.

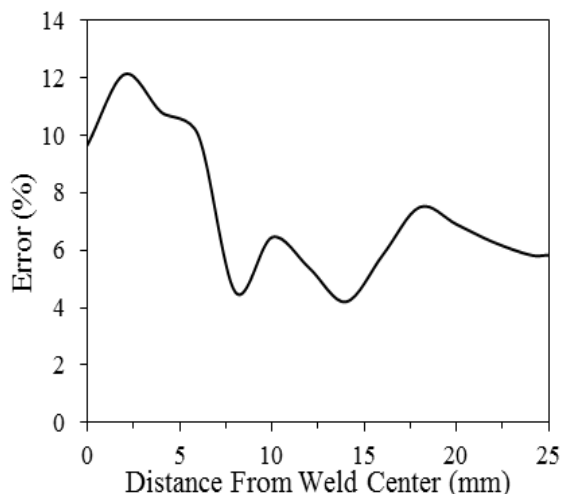
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- دما و نرخ کرنش

شبیه سازی ترم دما در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در طول مرحله نفوذ، مرحله اسکان و مرحله اغتشاش برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با توجه به شرایط آزمایشگاهی صورت پذیرفت و تاریخچه دمایی نقاط و گره های المانی مختلف قطعه کار بر اساس فواصل مختلف نسبت به مرکز جوش ثبت شد. شکل ۲ کانتور توزیع دما در



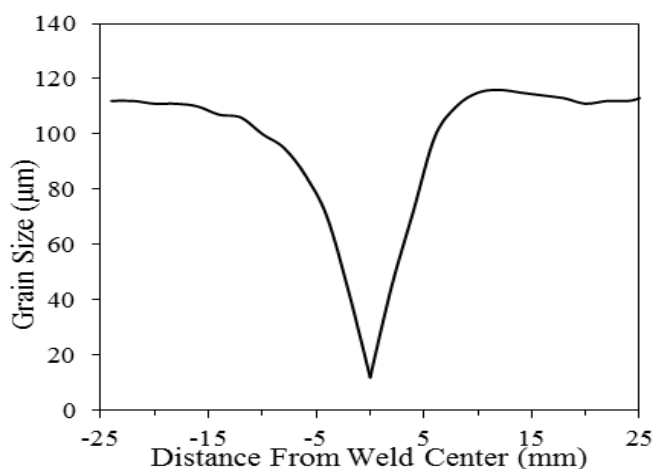
شکل ۲. کانتور ترم دما در شبیه سازی عددی (درجه سانتیگراد)  
Fig. 2. Temperature contour in numerical simulation (degrees Celsius)



شکل ۵. درصد خطای بین نتایج عددی و تجربی

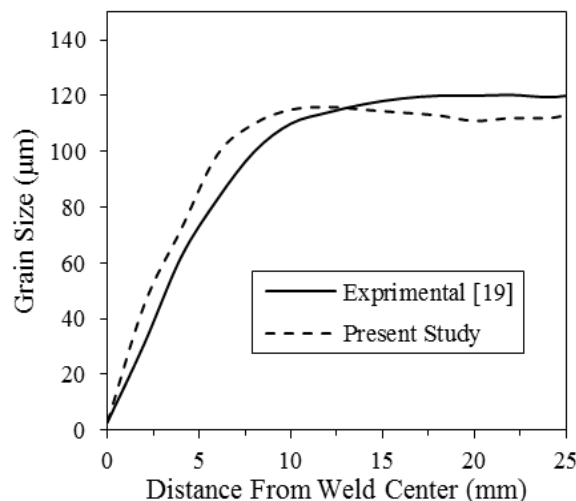
Fig. 5. Percentage of error between numerical and experimental results

ماکزیمم و الگوی توزیع دما در دو سوی خط جوش متفاوت می‌باشد که این مسأله به دلیل عدم تقارن جریان پلاستیک ایجادشده در دو سوی خط جوش است. با توجه به بالاتر بودن دما در بخش پیش‌رو (بخش مثبت محور افقی) میزان کاهش در تنش تسلیم به صورت شدیدتری اتفاق خواهد افتاد و به همین دلیل میزان جریان پلاستیک، کرنش و نرخ کرنش در ناحیه پیش‌رو نسبت به ناحیه پس‌رو (بخش منفی محور افقی) بزرگ‌تر خواهد بود. با توجه به نمودار موجود در شکل ۵ و بر اساس داده‌های مستخرج از مدل عددی-تحلیلی، اندازه دانه‌ها در ناحیه جوش در بخش پیش‌رو نسبت به ناحیه جوش در بخش پس‌رو کوچک‌تر است.



شکل ۶. مقایسه اندازه ذرات در نواحی پیش‌رو و پس‌رو

Fig. 6. Comparison of grain sizes in AS and RS regions



شکل ۴. اندازه ذرات در شرایط شبیه‌سازی و شرایط تجربی

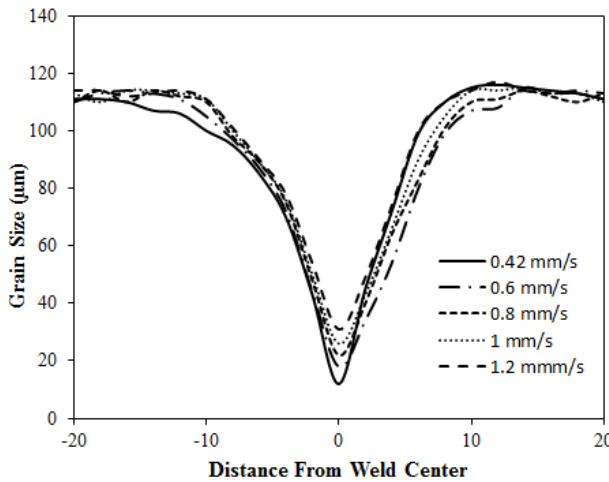
Fig. 4. Grain sizes under simulation and experimental conditions

#### ۲-۴- اندازه دانه‌ها در نواحی جوش

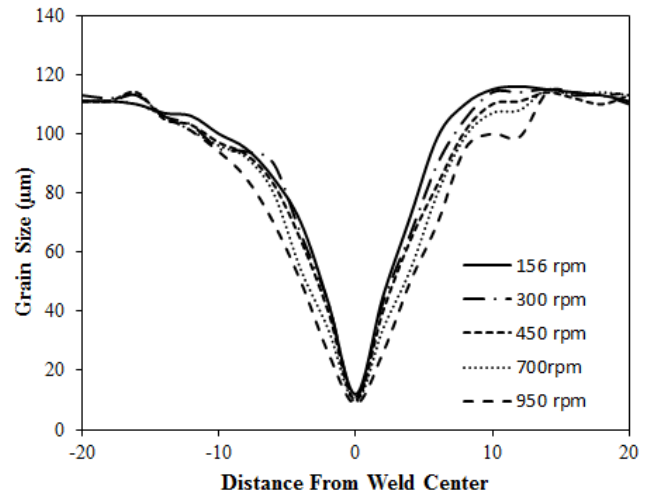
کرنش، ترم دما و نرخ کرنش در نقاط و گره‌های مختلف بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی محاسبه گردید سپس با جایگذاری داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی در رابطه (۵) اندازه ذرات مناطق مختلف جوشکاری محاسبه شد. نتایج اندازه دانه‌ها در مقطع جوش حاصل از پژوهش حاضر و نتایج حاصل از پژوهش تجربی وو و همکارانش [۱۹] در شکل ۴ و در شکل ۵ نمودار درصد خطای نتایج عددی و تجربی در عرض مقطع جوش نمایش داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان دریافت که با فاصله‌گرفتن از مرکز جوش اندازه ذرات به طور قابل توجهی رشد پیدا می‌کند که این رشد دانه‌ها می‌تواند ناشی از عدم وقوع تبلور مجدد دینامیکی و یا ناقص‌شدن این پدیده ریزساختاری باشد. با توجه به عدم تقارن موجود در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شاهد جریان نامتقارن مواد در دو منطقه پیش‌رو و پس‌رو هستیم. این دو بخش دارای توزیع دما، کرنش و نرخ کرنش متفاوت می‌باشند. در شکل ۲ و ۳ نیز این مسأله به وضوح در کانتور دما و نرخ کرنش مشخص است. بررسی تغییرات ریزساختار در دو ناحیه پیش‌رو و پس‌رو نیز صورت پذیرفت و اختلاف ریز ساختار و اندازه دانه‌ها در مناطق مختلف بررسی گردید. در شکل ۶ اندازه ذرات در دو سمت ناحیه مرکزی جوش به نمایش در آمده است.

به طور معمول در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دمایی



شکل ۸. اندازه دانه‌ها در سرعت‌های پیشروی مختلف  
Fig. 8. Grain size at different translational speeds



شکل ۷. اندازه دانه‌ها در سرعت‌های دورانی مختلف  
Fig. 7. Grain size at different rotational speeds

#### ۴-۴- اثر سرعت خطی ابزار

به منظور بررسی تاثیر سرعت خطی ابزار بر اندازه دانه‌ها در مقطع نمونه جوشکاری شده با تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ۵ سرعت متفاوت دورانی برای ابزار استفاده شد. در شکل ۸ توزیع اندازه دانه برای نمونه‌های جوشکاری با سرعت‌های جوشکاری متفاوت نمایش داده شده است. سرعت خطی ابزار یا سرعت جوشکاری یک عامل بسیار موثر بر نحوه توزیع دما و نحوه دانه‌بندی می‌باشد. با افزایش سرعت خطی، ماکزیمم دمای جوشکاری کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش زمان حضور ابزار در یک موقعیت مکانی خاص و کاهش جریان مواد و کاهش تغییر پلاستیک شدید در قطعه کار می‌باشد. افزایش سرعت جوشکاری موجب می‌شود که زمان کافی برای توزیع دما در مقطع عرضی نمونه وجود نداشته باشد. لذا به طور معمول با افزایش سرعت خطی ابزار، منطقه متأثر از حرارت کوچک‌تر می‌شود. از سوی دیگر با افزایش سرعت خطی مقدار کرنش کمتری به منطقه متأثر از کار مکانیکی-حرارتی اعمال شده که موجب کاهش تغییرات اندازه دانه در این مناطق نسبت به سایر مناطق شده است. روند تغییرات اندازه دانه ماکزیمم با تغییر سرعت جوشکاری در شکل ۸ بیان‌گر این مطلب می‌باشد که با افزایش سرعت خطی جوشکاری بنا به دلایل ذکر شده اندازه دانه‌ها در مناطق مختلف جوش افزایش می‌یابد. این افزایش در منطقه مرکزی جوش به شکل شدیدتری روی می‌دهد.

#### ۴-۳- اثر سرعت دورانی ابزار

به منظور بررسی تاثیر سرعت دورانی ابزار بر اندازه دانه‌ها در مقطع نمونه جوشکاری شده با تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ۵ سرعت متفاوت دورانی برای ابزار استفاده شد. شبیه‌سازی عددی مطابق با روند ارائه شده در بخش‌های پیشین برای هر ۵ مدل صورت پذیرفت و اندازه دانه‌ها در نواحی مختلف مقطع جوش با استفاده از مدل تحلیلی عددی حاضر محاسبه شد. در شکل ۷ توزیع اندازه دانه برای نمونه‌های جوشکاری با سرعت‌های دورانی متفاوت ابزار نمایش داده شده است. با افزایش سرعت دورانی ابزار مقدار موادی که در زیر ابزار جابجا می‌شود و تحت تغییر شکل شدید پلاستیک واقع می‌شود افزایش می‌یابد و همین امر موجب افزایش گرمای ناشی از تغییر شکل پلاستیک می‌شود. از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ناشی از اصطکاک نیز افزایش یافته که در نتیجه دمای مناطق مختلف جوش افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته، با افزایش سرعت دورانی ابزار، اندازه دانه تبلور مجدد یافته افزایش می‌یابد که علت این امر را می‌توان به افزایش کرنش پلاستیک بیشتر و افزایش دما در مناطق هسته جوش، منطقه متأثر از کار مکانیکی و حرارتی و همچنین منطقه متأثر از حرارت نسبت داد.



## ۵- نتیجه‌گیری

- Materials Science and Engineering: A, 528(28) (2011) 8071-8083.
- [7] A. Ghiasvand, M. Kazemi, M.M. Jalilian, H.A. Rashid, Effects of tool offset, pin offset, and alloys position on maximum temperature in dissimilar FSW of AA6061 and AA5086, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 15(1) (2020) 1-14.
- [8] M. Tamjidy, B. Baharudin, S. Paslar, K. Matori, S. Sulaiman, F. Fadaeifard, Multi-objective optimization of friction stir welding process parameters of AA6061-T6 and AA7075-T6 using a biogeography based optimization algorithm, *Materials*, 10(5) (2017) 533.
- [9] V. Pandian, S. Kannan, Numerical prediction and experimental investigation of aerospace-grade dissimilar aluminium alloy by friction stir welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 54 (2020) 99-108.
- [10] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, An analytical model for the heat generation in friction stir welding, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12(1) (2003) 143.
- [11] B. Meyghani, M. Awang, S.S. Emamian, M. Nor, M. Khalid, S.R. Pedapati, A comparison of different finite element methods in the thermal analysis of Friction Stir Welding (FSW), *Metals*, 7(10) (2017) 450.
- [12] Z. Zhao, H. Liang, Y. Zhao, K. Yan, Effect of Exchanging Advancing and Retreating Side Materials on Mechanical Properties and Electrochemical Corrosion Resistance of Dissimilar 6013-T4 and 7003 Aluminum Alloys FSW Joints, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(4) (2018) 1777-1783.
- [13] Y.J. Chao, X. Qi, W. Tang, Heat transfer in friction stir welding—experimental and numerical studies, *Journal of manufacturing science and engineering*, 125(1) (2003) 138-145.
- [14] M. Song, R. Kovacevic, Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(6) (2003) 605-615.
- [15] A. Ghiasvand, 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*, 8(3) (2018) 65-75.
- [16] R. Nandan, G. Roy, T. Lienert, T. Debroy, Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel, *Acta materialia*, 55(3) (2007) 883-895.
- [17] D.K. Yaduwanshi, S. Bag, S. Pal, Heat transfer analyses in friction stir welding of aluminium alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(10) (2015) 1722-1733.
- [18] F. Al-Badour, N. Merah, A. Shuaib, A. Bazoune, Thermo-mechanical finite element model of friction stir welding of dissimilar alloys, *The International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 15(1) (2020) 1-14.
- پیش‌بینی اندازه دانه‌ها نواحی مختلف جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از مدل تحلیلی عددی نوین ارائه‌شده در پژوهش حاضر صورت گرفت. ترم‌های دما، کرنش و نرخ کرنش به وسیله شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس محاسبه شد سپس با استفاده از روابط تحلیلی مدل اتوماتیک سلولی و سابروتین‌نویسی اندازه دانه‌ها در نواحی مختلف مقطع جوش محاسبه شد. نتایج پژوهش را به صورت مختصر می‌توان اینگونه بیان نمود:
- با استفاده از مدل تحلیلی عددی حاضر، می‌توان با درصد خطای اندکی اندازه دانه نواحی مختلف مقطع جوش فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را پیش‌بینی کرد.
  - کمترین اندازه دانه‌ها در ناحیه مرکزی جوش رخ داد که دلیل آن بالابودن دما، کرنش و نرخ کرنش در این ناحیه می‌باشد که سبب ایجاد تبلور مجدد دینامیکی کامل در این ناحیه می‌گردد.
  - با توجه به افزایش جریان مواد و بالاتر بودن دما در بخش پیش‌رو میزان کاهش اندازه دانه‌ها در این ناحیه نسبت به ناحیه پس‌رو بیشتر می‌باشد و اندازه ذرات در این ناحیه کوچک‌تر می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] M.M. Hasan, M. Ishak, M. Rejab, Influence of machine variables and tool profile on the tensile strength of dissimilar AA7075-AA6061 friction stir welds, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9-12) (2017) 2605-2615.
- [2] S.S. Kumar, N. Murugan, K. Ramachandran, Effect of tool tilt angle on weld joint properties of friction stir welded AISI 316L stainless steel sheets, *Measurement*, 150 (2020) 107083.
- [3] A. Garg, M. Raturi, A. Bhattacharya, Influence of additional heating in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys with different tool pin profiles, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1-4) (2019) 155-175.
- [4] M.-K. Besharati-Givi, P. Asadi, *Advances in friction-stir welding and processing*, Elsevier, 2014.
- [5] R.S. Mishra, P.S. De, N. Kumar, *Friction stir welding and processing: science and engineering*, Springer, 2014.
- [6] H.J. Aval, S. Serajzadeh, A. Kokabi, Evolution of microstructures and mechanical properties in similar and dissimilar friction stir welding of AA5086 and AA6061,

- three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, 21(1) (1985) 31-48.
- [25] A. Ghiasvand, S. Hassanifard, Numerical Simulation of Laser Welding and Evaluation of Residual Stress and Temperature Distribution in Lap Joint of AA6061 and AA5086 Aluminum Alloys in Different Thicknesses, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(3) (2019) 41-50.
- [26] N. Dialami, M. Chiumenti, M. Cervera, A. Segatori, W. Osikowicz, Enhanced friction model for Friction Stir Welding (FSW) analysis: Simulation and experimental validation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 133 (2017) 555-567.
- [27] S.B. Aziz, M.W. Dewan, D.J. Huggett, M.A. Wahab, A.M. Okeil, 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)*, 29(9) (2016) 869-883.
- [28] G. Buffa, L. Fratini, R. Shivpuri, CDRX modelling in friction stir welding of AA7075-T6 aluminum alloy: Analytical approaches, *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3) (2007) 356-359.
- [29] F. Al-Badour, N. Merah, A. Shuaib, A. Bazoune, Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8) (2013) 1433-1439.
- of *Advanced Manufacturing Technology*, 72(5-8) (2014) 607-617.
- [19] M.A. Ansari, A. Samanta, R.A. Behnagh, H. Ding, An efficient coupled Eulerian-Lagrangian finite element model for friction stir processing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5-8) (2019) 1495-1508.
- [20] M. Eskandari, H.J. Aval, R. Jamaati, The study of thermomechanical and microstructural issues in dissimilar FSW of AA6061 wrought and A390 cast alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, 41 (2019) 168-176.
- [21] Y. Wu, J. Yu, Z. Yang, Y. Deng, Study of grain distribution during friction stir welding of Al-Zn-Mg alloys using numerical simulation, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, pp. 012022.
- [22] W. Woo, L. Balogh, T. Ungár, H. Choo, Z. Feng, Grain structure and dislocation density measurements in a friction-stir welded aluminum alloy using X-ray peak profile analysis, *Materials Science and Engineering: A*, 498(1-2) (2008) 308-313.
- [23] G. Kerrar, N. Merah, A.N. Shuaib, A.-B. Fadi, A. Bazoune, Experimental and numerical investigations of friction stir welding of aluminum to copper, in: *Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems*, Springer, 2017, pp. 129-138.
- [24] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. Ghiasvand, M. Kazemi, M. Mahdipour Jalilian . Numerical investigation and prediction of grain size in different friction stir welding areas of AA6061 aluminum alloy ,*Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6)(2021) 3751-3760.

DOI: [10.22060/mej.2020.18746.6881](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18746.6881)

