



## شبیه سازی عددی FSW و FSSW آلیاژ آلومینیم AA6061-T6 با استفاده از ابزار فاقد پین با رویکرد CEL

امیر غیاثوند<sup>۱\*</sup> و سوران حسینی فرد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

### چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی FSW، یک روش اتصال حالت جامد است که به منظور رفع محدودیت جوشکاری آلیاژهای آلومینیم ابداع شده است. در پژوهش حاضر شبیه سازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای FSSW آلیاژ آلومینیم AA6061-T6، به وسیله یک ابزار بدون پین که دارای یک بخش توگذاری شده از جنس ماده قطعه کار است، در چهار قطر متفاوت صورت پذیرفت. پیک دمایی ایجاد شده در فرایند برای همه حالات شبیه سازی ثبت و با داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده از پژوهش‌های پیشین به منظور صحت‌سنجی، مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج عددی حاضر مشخص شد که در فرایند FSSW میزان تولید حرارت و افزایش دما بالاتر از فرایند FSW است که این موضوع به دلیل عدم وجود سرعت انتقالی در این حالت و افزایش حرارت در یک بخش با حجم کوچک‌تر است. بررسی نیروی عکس‌العمل عمودی وارد بر ابزار در FSSW صورت پذیرفت، مشاهده شد چنانچه از ابزاری استفاده شود که دارای قسمت تعبیه شده است، پیک نیرویی کاهش می‌یابد و میزان این کاهش نیرو با افزایش در میزان قطر بخش آلومینیمی افزایش پیدا خواهد کرد؛ به طوری که در حالت استفاده از ابزار d10 پیک نیرو نسبت به ابزار d0 حدود ۱۰ درصد کاهش را تجربه کرد.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ شبیه سازی عددی؛ تکنیک CEL؛ آلیاژ آلومینیم.

## Numerical Simulation of FSW and FSSW with Pinless Tool of AA6061-T6 Al Alloy by CEL Approach

A. ghiasvand<sup>1,\*</sup>, S. Hassanifard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Tabriz Univ., Tabriz, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Tabriz Univ., Tabriz, Iran.

### Abstract

Friction Stir welding (FSW) is a solid state technique that was invented to eliminate the limitations of welding of aluminum alloys. In the present study numerical simulation of friction stir welding and friction stir spot welding (FSSW) of AA6061-T6 aluminum alloy by pinless tool which has an embedded part with same material of the workpiece was performed in four different diameters. The temperature peak generated in the process was recorded for all simulation states and compared with previous experimental data for validation purposes. It has been found that in the FSSW process, the heat generation and temperature increase is higher than the FSW process, which is due to the Lack of transitional speed in this case and the increase in heat in a smaller volume section. Investigation of the vertical reaction force of tool was performed in FSSW, it was observed that if an embedded part in tool is used, the peak force is reduced and the amount of this decrease will increase with increasing the diameter of the embedded aluminum section. In the case of using d10 tool, the peak force compared to the d0 tool was about 10% lower.

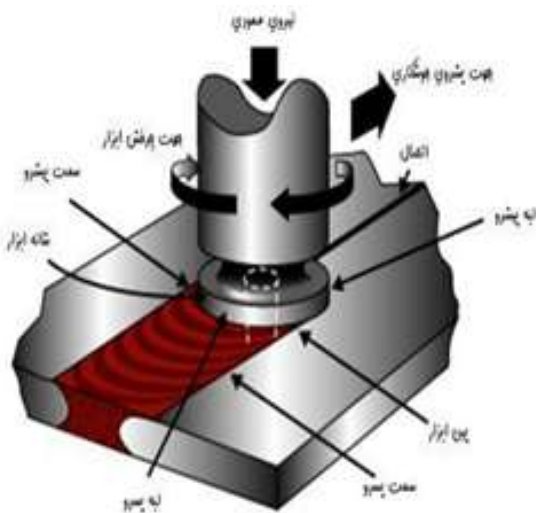
**Keywords:** Friction Stir Welding; Numerical Simulation; CEL Technique; Aluminum Alloy.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۳۳۳۹۲۴۶۷؛ فکس: ۳۳۳۹۲۴۶۷

آدرس پست الکترونیک: Amir.Ghiasvand@Tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

ایجاد اصطکاک می‌شود که این اصطکاک منجر به تولید حرارت و افزایش دما در قطعات و ابزار می‌شود، این نفوذ تا بدان جا ادامه می‌یابد که سطح شانه ابزار با سطح بیرونی قطعات تماس پیدا کند [۳]، همزمان با افزایش دما میزان استحکام تسلیم قطعات کاهش می‌یابد و فشار اعمالی از حد تسلیم ماده قطعه کار فراتر رفته و قطعات به منطقه پلاستیک وارد شوند و جریان مواد به صورت جریان پلاستیک بزرگی حول ابزار تولید شود [۲ و ۴]. در این مرحله به طور معمول برای افزایش بیشتر دمای قطعات و پیش گرم کردن ماده پیش روی ابزار در سیکل‌های بعدی، یک زمان اسکان<sup>۵</sup> نیز در نظر گرفته می‌شود. پس از اتمام مراحل پیشین، ابزار در راستای شکاف موجود قطعات دارای سرعت انتقالی خواهد شد. در شکل ۱ شماتیک فرایند FSW و قسمت‌های مختلف قطعه کار و ابزار نشان داده شده است.



شکل ۱- بخش‌های مختلف ابزار و قطعه کار [۱]

با توجه به عوامل متعدد دخیل در فرایند و تاثیر گذار بر کیفیت اتصال نهایی و پیچیدگی شرایط و ارتباط بین این پارامترها در طول فرایند، پژوهش‌های تجربی، تحلیلی و عددی بسیاری در این زمینه صورت گرفته است؛ اما همچنان نیاز به بررسی‌های بیشتری در این بخش احساس می‌شود. شیمیت و هاتل [۵] به ارائه یک مدل حرارتی سه بعدی اجزاء محدود جهت پیش‌بینی الگوی جریان پلاستیک مواد حول

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> FSW در زمره فرایندهای اتصال حالت جامد<sup>۲</sup> دسته‌بندی می‌شود. در چنین فرایندهایی در ماده قطعه کار و در ابزار ذوب صورت نمی‌پذیرد و دمای فرایند همواره در سطحی پایین‌تر از دمای ذوب مواد است [۱]. دو عامل اصلی در اتصال حالت جامد، فشار و تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک می‌باشند. بر اساس عامل ایجاد فشار و تغییر شکل، دسته‌بندی‌های متفاوتی از اتصال حالت جامد ایجاد شده است. FSW در سال ۱۹۹۱ در موسسه TWI انگلستان ابداع شد [۲] و امروزه این روش در صنایع مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. انگیزه ابداع FSW، وجود محدودیت‌ها و عیوب فراوان در اتصال و جوشکاری آلومینیم و آلیاژهای سخت آن با شیوه‌های پیشین است. با استفاده از تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژهای سخت آلومینیومی، عیوب تا میزان بسیار بالایی مرتفع شده و قابلیت اعتماد اتصال افزایش می‌یابد [۲]. FSW در عین کارایی و قابلیت‌های فراوان از روند و عملیاتی ساده بهره می‌گیرد. در این روش از یک ابزار دوار مصرف نشدنی استفاده می‌شود که از دو بخش اصلی پین<sup>۳</sup> و شانه<sup>۴</sup> تشکیل شده که عموماً از قطعه کار سخت‌تر و دارای استحکام نهایی بالاتری در دمای اولیه و دمای کاری است.

در فرایند FSW ابزار دارای دو سرعت انتقالی و یک سرعت دورانی (حول محور مرکزی خود) است. نخستین سرعت انتقالی در مرحله نفوذ به کار گرفته می‌شود که ابزار با یک سرعت ثابت در راستای ضخامت دو قطعه نفوذ می‌کند و به تدریج وارد دو قطعه می‌شود، سرعت انتقالی دوم مربوط به مرحله شکل‌گیری و ایجاد اتصال است، ابزار در این گام در راستای خط جوش با سرعت ثابت شروع به حرکت نموده و اتصال میان دو قطعه را شکل می‌دهد [۱]. مراحل کلی پیاده-سازی اتصال بدین گونه خواهد بود که نخست ابزار در راستای ضخامت قطعه و در شکاف میان دو قطعه کار وارد می‌شود، در این مرحله بالاترین نیروهای عکس‌العمل به قطعه کار وارد می‌شود. تماس بین ابزار دوار و قطعه کار سبب

<sup>1</sup> Friction Stir Welding

<sup>2</sup> Solid State Bonding

<sup>3</sup> Pin

<sup>4</sup> Shoulder

<sup>5</sup> Dwell Time

مقرون به صرفه نخواهد بود. در روش ALE از شیوه‌ای استفاده می‌شود 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 می‌شوند، هرچند این روش قابلیت شبیه‌سازی FSW را داراست، اما زمان تحلیل بسیار بالا خواهد بود و مسقوط ماندن آنالیز نیز در هر مرحله از شبیه‌سازی ممکن خواهد بود.

در پژوهش حاضر از تکنیک CEL برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در این تکنیک از کوپل المان‌های اویلری و لاگرانژی استفاده می‌شود. 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 همین خصوصیات، المان‌های اویلری به سادگی توانایی مدل کردن تغییر شکل‌های بزرگ را دارا می‌باشند و از نظر هزینه شبیه‌سازی از کارایی بالاتری نیز برخوردار هستند [۷].

## ۲-۱- تشریح مدل

در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS با رویکرد CEL به مدل‌سازی دو فرایند FSW و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای<sup>۴</sup> FSSW<sup>۴</sup> آلیاژ آلومینیم AA6061-T6 به واسطه ابزاری بدون پین پرداخته شده است. داده‌های آزمایشگاهی و تجربی مورد استفاد جهت صحت‌سنجی در این پژوهش، از کار تجربی یوانگ و همکارانش [۸] حاصل شده است و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود، مورد مقایسه قرار گرفته است. هندسه ابزار به صورت ساقه<sup>۵</sup> استوانه‌ای فاقد پین<sup>۶</sup> است که کاملاً منطبق بر ابزار مورد استفاده یوانگ و همکارانش می‌باشد، در شکل ۲ شماتیک ابزار مورد استفاده نمایش داده شده است [۸]، با توجه به اینکه ضریب اصطکاک

ابزار پرداختند و شرایط مختلف تماس و انتقال حرارت حول ابزار را مورد مطالعه قرار دادند. ژانگ و لیو [۶]، به بررسی تاثیر هندسه پین ابزار بر دما و جریان مواد در FSW پرداختند، با توجه به نتایج حاصل از پژوهش، تغییر در هندسه پین به شدت بر الگوهای جریان پلاستیک و توزیع دمایی فرایند تاثیر گذار است. البادور و همکارانش [۷] به بررسی عددی و شبیه‌سازی فرایند FSW با استفاده از رویکرد نوینی پرداختند، نتایج دمایی حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از تکنیک مورد استفاده در مطابقت مناسبی با شرایط آزمایشگاهی قرار داشت.

با توجه به عدم وجود شیوه تحلیلی کارآمد و جامع برای مدل‌سازی توزیع حرارت و محاسبه جابجایی‌ها در فرایند FSW، در صورت پیاده‌سازی صحیح روش شبیه‌سازی اجزاء محدود<sup>۱</sup> به عنوان راهکاری قابل اتکاء محسوب خواهد شد. از این رو در پژوهش حاضر، به بررسی عددی اجزاء محدود فرایند FSW و FSSW با استفاده از ابزاری فاقد پین پرداخته شده است که دارای دو بخش با دو جنس متفاوت است. تاثیر وسعت بخش داخلی و غیر هم جنس ابزار بر توزیع دما و نیروی عکس‌العمل وارد بر ابزار در قطره‌های متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲-۲- شبیه‌سازی اجزاء محدود

با توجه به وجود جابجایی‌های پلاستیک بزرگ در فرایند باید از روشی استفاده نمود که به درستی پیش‌بینی صحیحی از تولید حرارت و کرنش‌های پلاستیک را به عمل آورد، بدین منظور می‌توان از سه رویکرد لاگرانژی، لاگرانژی-ویلری اختیاری<sup>۲</sup> ALE و کوپل اویلری لاگرانژی<sup>۳</sup> CEL استفاده کرد [۷]. در صورت استفاده از رویکرد لاگرانژی باتوجه به قابلیت دفرمه شدن المان‌ها و حرکت گره‌های المانی در سه درجه آزادی انتقالی، انحراف و اعوجاج بیش از حد در المان‌ها به وجود خواهد آمد که همین مسأله موجب می‌شود، آنالیزی ناکارآمد حاصل شود، مگر این که شبکه‌بندی و مش بسیار ریزتری را در سرتاسر مدل به کار گرفت که این تغییر سبب بالا رفتن هزینه و زمان آنالیز خواهد شد که از لحاظ کارایی

<sup>4</sup> Friction Stir Spot Welding

<sup>5</sup> Shank

<sup>6</sup> Pinless

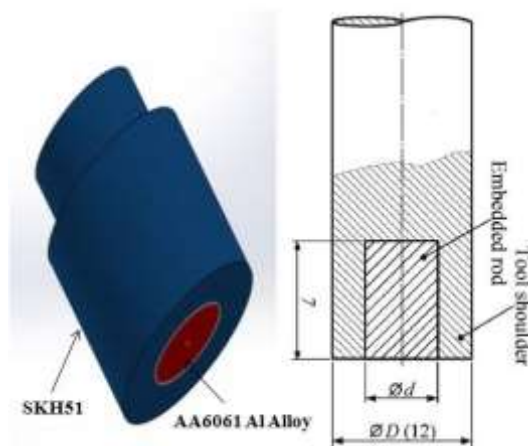
<sup>1</sup> Finite Element Simulation

<sup>2</sup> Arbitrary Lagrangian-Eulerian

<sup>3</sup> Coupled Eulerian Lagrangian

میان آلومینیوم-آلومینیوم-فلاد بزرگ تر است و این مسأله منجر به افزایش تولید حرارت، تغییر شکل و جریان پلاستیک بزرگ تر مواد در طول فرایند خواهد شد، ابزاری دو بخشی با دو جنس متفاوت در این پژوهش بکار گرفته شد، بدین جهت ابزار دارای ساقه و بخش خارجی از جنس فولاد SKH51 با قطر شانه ۱۲ و ارتفاع ۱۰ میلیمتریو یک بخش داخلی جایگذاری شده با جنس متفاوت (مشابه جنس قطعه کار) از جنس آلیاژ آلومینیم AA6061-T6 است، این بخش استوانه‌ای داخلی دارای ارتفاع ۷ میلیمتر و دارای چهار حالت متفاوت با چهار قطر ۰، ۳، ۶ و ۱۰ میلیمتری است، این ابزارها به ترتیب ابزار d0، d3، d6 و d10 نام گذاری و اطلاق می‌شوند. ابزار به صورت لاگرانژی و تغییر شکل پذیر مدل سازی و همه حالات مختلف آن شبیه سازی شد.

شبیه سازی عددی برابر با ۴ میلیمتر در نظر گرفته شد که در مقایسه با حالت مورد استفاده در پژوهش تجربی، ۱ میلیمتر بیشتر در نظر گرفته شد تا به وسیله آن حفره و بیرون زدگی‌های سطح جوش نیز مدل شود و مرحله نفوذ ابزار به صورت مناسب تری شبیه سازی شود [۷]. قطعه کار استفاده شده در FSSW نیز، دارای ابعاد  $30 \times 20$  میلیمتر است که به صورت لب به لب در کنار یکدیگر فیکس شده‌اند، برای شبیه سازی عددی این بخش از فرایند نیز، دو قطعه به صورت قطعه‌ای واحد با ابعاد  $40 \times 30$  میلیمتر مدل شدند که دارای ضخامت ۷ میلیمتر است، مجدداً به دلایل بیان شده این ضخامت نیز به اندازه ۱ میلیمتر از ضخامت قطعات استفاده شده در کار تجربی بیشتر در نظر گرفته شد. قطعه کار به صورت کاملاً اوپلری مدل شد که توانایی شبیه سازی تغییر شکل‌های بزرگ را داشته باشد. از دانه بندی یکسان در کل مدل استفاده شد و طول هر یک از المان‌ها با دانه بندی ۱ میلیمتر در نظر گرفته شد که در مجموع قطعه کار FSW دارای ۹۶۰۰ و قطعه کار FSSW، دارای ۸۴۰۰ المان EC3D8RT گردید، این المان‌های سه بعدی دارای ۸ گره و ۴ درجه آزادی (سه درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی حرارتی) در هر گره و از نوع انتگرال گیری کاهش یافته می‌باشند تا بتوانند در شرایط کوپل دما-جابجایی به خوبی پیش بینی صحیحی از شرایط واقعی مسأله داشته باشند. تعداد المان‌ها نقش مهمی در صحت شبیه سازی خواهد داشت. با توجه به استفاده از قید جسم صلب برای ابزار وابستگی شرایط نمو زمانی به مش ابزار از بین رفت، به همین جهت از دانه بندی  $0.8$  میلیمتری استفاده شد و نوع این المان‌ها C3D8T در نظر گرفته و مدل سازی شدند.



شکل ۲- شماتیک ابزار فاقد پین استفاده شده در پژوهش حاضر

با توجه به ماهیت مسأله که یک مسأله کوپل دما-جابجایی است، خواص مکانیکی و حرارتی مواد به طور دقیق تعریف شد. با توجه به نوع فرایند که یک فرایند جوشکاری در دمای بالا است، باید خواص مواد موجود بر اساس دماهای مختلف ثبت شود، به منظور مدل سازی تنش و تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ از مدل پلاستیک جانسون-کوک استفاده شد که در رابطه (۱) نشان داده شده است [۹].

شرایط شبیه سازی در FSW و FSSW، مطابق با کار تجربی انجام شده است. قطعه کار موجود در FSW دارای ابعاد  $20 \times 60$  میلیمتر است که به صورت لب به لب<sup>۱</sup> در کنار یکدیگر قرار گرفت و به صورت یک قطعه واحد با ابعاد  $40 \times 60$  میلیمتر مدل شد. ضخامت نمونه‌های FSW در

<sup>1</sup> Diameter 0

<sup>2</sup> But Joint

جدول ۱- خواص حرارتی و مکانیکی ابزار SKH51 [۱۱]

SKH51 Properties	
$\alpha(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	1.6
$C_p \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$	460
$\rho \text{ (kgm}^{-3})$	7800
$k \text{ (Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	24.3
$\nu$	0.3
$E \text{ (Gpa)}$	210

شرایط مرزی از جنس سرعت در نظر گرفته شد و به ابزار در حالت FSW و FSSW سرعت دورانی و سرعت انتقالی مناسب نسبت داده شد، در تحلیل ابزار دارای دو سرعت انتقالی (در راستای ضخامت و در راستای خط جوش) و یک سرعت دورانی است و در تحلیل FSSW، دارای یک سرعت انتقالی (در راستای ضخامت ورق) و یک سرعت دورانی است. وجوه مختلف قطعه کار به واسطه مقیدسازی با استفاده از سرعت در جهات مشخص مقید شد. به دلیل انتقال حرارت بین قطعه کار و هوای پیرامون آن یک شرایط مرزی حرارتی جابجایی با ضریب انتقال حرارت جابجایی  $30 \text{ w/m}^2\text{k}$  با دمای احاطه کننده  $22$  درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد؛ همچنین به دلیل عدم مدل‌سازی سندان و انتقال حرارت صورت گرفته از قطعه کار به آن یک ضریب انتقال حرارت جابجایی مجازی و جایگزین نسبتاً بزرگ به اندازه  $350 \text{ w/m}^2\text{k}$  با دمای احاطه کننده محیطی  $22$  درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. دمای اولیه نمونه و ابزار  $22$  درجه سانتی‌گراد لحاظ شد و انتقال حرارت ابزار و محیط به دلیل عدم اهمیت توزیع دمای ابزار در پژوهش حاضر نادیده گرفته شد.

کل زمان شبیه‌سازی FSSW مشابه حالت آزمایشگاهی برابر با  $250 \text{ s}$  در نظر گرفته شد که  $10 \text{ s}$  ابتدایی مربوط به مرحله نفوذ است، پس از نفوذ ابزار به میزان  $160 \text{ S}$  در موقعیت خود ثابت مانده و مرحله اسکان و اغتشاش و ایجاد اتصال را طی می‌کند. پس از این مرحله ابزار به صورت آنی از

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma$  تنش تسلیم در هر لحظه از فرایند است و  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $n$  و  $m$ ، ثابت‌های ماده هستند که با تست تجربی هاپکینسون بدست می‌آیند.  $T$  دمای لحظه‌ای فرایند،  $T_r$  دمای انتقال و  $T_m$  دمای ذوب ماده است [۹]. با مشخص بودن موارد فوق می‌توان به درستی شرایط و جریان را در فاز پلاستیک ماده محاسبه کرد. در پژوهش حاضر ثابت‌ها معادله جانسون-کوک برای آلیاژ آلومینیوم AA6061، از پیشینه پژوهش و مراجع حاصل شده است [۱۲].

با توجه به اینکه از بین ابزار و قطعه کار، فقط قطعه کار وارد منطقه تسلیم می‌شود و در طول فرایند جوشکاری جریان پلاستیک را تجربه می‌کند، پارامترهای جانسون کوک فقط برای ماده تشکیل دهنده قطعه کار یعنی آلیاژ آلومینیوم AA6061-T6 تعریف شد. جنس ابزار از فولاد SKH51 مطابق با شرایط تجربی در نظر گرفته شد، به منظور بررسی و شبیه سازی عددی فرایند خواص حرارتی و الاستیک ابزار به نرم افزار معرفی شد که این خواص در جدول ۱ آمده است؛ همچنین خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA6061-T6 در جدول ۲ و پارامترهای جانسون-کوک این ماده در جدول ۳ به نمایش درآمده است.

حلگر صریح<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت، زمان استپ‌های مختلف مطابق با شرایط آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. به منظور مدل‌سازی اصطکاک از روش تماس عمومی<sup>۲</sup> در نرم افزار بهره برده شد و با توجه به مجزا بودن هندسه و جنس ابزار، از دو ضریب اصطکاک متفاوت برای تماس میان این دو بخش با ابزار استفاده شد، از مدل اصطکاک خشک کولمب بهره گرفته شده و ضریب اصطکاک بین قسمت فولادی ابزار و قطعه کار برابر با  $0.47$  و ضریب اصطکاک بین قسمت آلومینیومی ابزار و قطعه کار برابر با  $1$  در نظر گرفته شده است [۱۳]. تولید حرارت<sup>۳</sup> در اثر اصطکاک در مدل به کار گرفته و نسبت تبدیل اصطکاک به حرارت برابر  $1$  منظور شد.

<sup>1</sup> Explicit

<sup>2</sup> General Contact

<sup>3</sup> Heat Generation

جدول ۲- خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ AA6061-T6 [۱۲]

T (°C)	E (Gpa)	$\nu$	$C_p$ (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kgm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> °c <sup>-1</sup> )
20	66.94	0.33	945	2690	23.5
100	63.21	0.334	978	2690	24.6
149	61.32	0.335	1000	2670	25.7
204	56.80	0.336	1030	2660	26.6
260	51.15	0.338	1052	2660	27.6
316	47.17	0.36	1080	2660	28.5
371	43.51	0.4	1100	2630	29.6
327	28.71	0.41	1130	2630	30.7
482	20.02	0.42	1276	2600	31.2

جدول ۳- پارامترهای جانسون-کوک آلیاژ AA6061-T6 [۱۲]

T <sub>ref</sub> (°C)	T <sub>melt</sub> (°C)	m	n	C	B (Mpa)	A (Mpa)
24	583	1.34	0.42	0.002	114	324

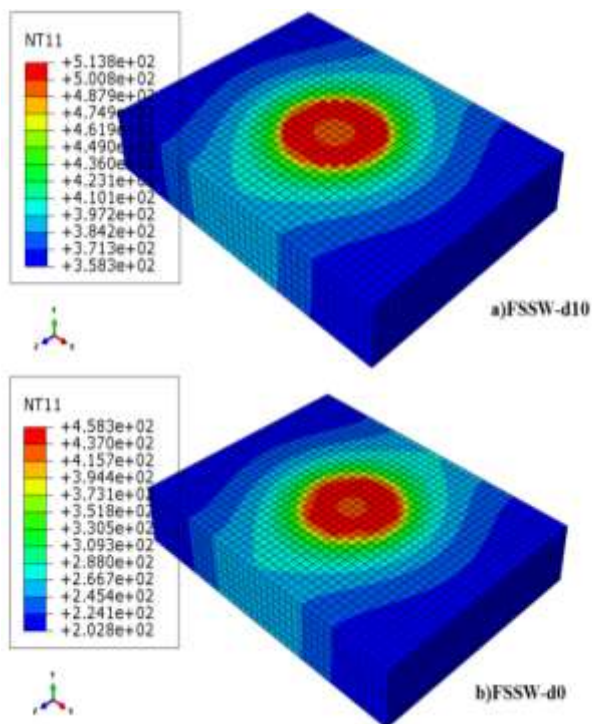
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی توزیع دما

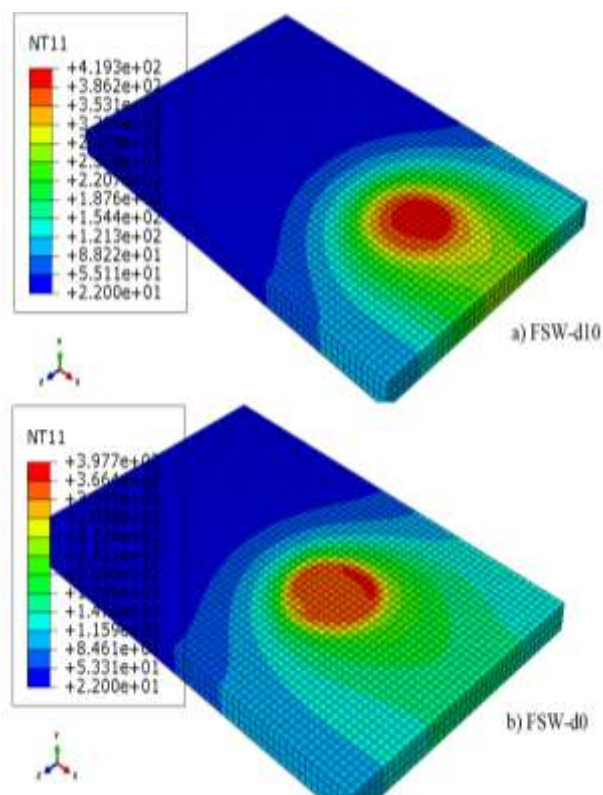
پیش‌بینی صحیح از نحوه توزیع دما و پیک دمایی موجود در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سبب تسریع و تسهیل ایجاد اتصالی با کیفیت و عاری از عیوب خواهد گردید. در شکل ۳ و شکل ۴ به ترتیب کانتور توزیع دمای فرایند FSSW و FSW شبیه سازی شده مربوط به دو حالت ابزار d0 و d10 به نمایش در آمده است.

با توجه به تصاویر، افزایش میزان قطر قطعه آلومینیمی داخلی ابزار سبب افزایش تولید حرارت ایجاد شده می‌شود که دلیل آن افزایش ضریب اصطکاک موجود بین ابزار و قطعه کار می‌باشد، با توجه به دو شکل ۳ و ۴، با افزودن یک بخش داخلی همجنس با قطعه کار در ابزار به قطر ۱۰ میلیمتر در فرایند FSSW و FSW به ترتیب ۱۲ و ۵ درصد بیشینه دمای

قطعه کار خارج می‌شود؛ اما همچنان برای حصول تاریخچه دمایی قطعه کار، گام زمانی تا زمان ۲۵۰ ثانیه ادامه خواهد داشت، در شبیه سازی FSW نیز از یک گام زمانی ۱۰ ثانیه‌ای جهت مرحله نفوذ و یک گام ۵ ثانیه‌ای جهت مرحله اسکان و یک گام ۶۰ ثانیه‌ای جهت مرحله حرکت خطی حرکت ابزار در راستای شکاف دو قطعه و اتصال دو ورق استفاده شد. یوانگ و همکارانش برای ثبت دمای نمونه‌های FSSW از ترموکوپل‌های مدل K در عمق ۳ میلیمتری قطعه کار و در مرکزیت آن استفاده نمودند و برای FSW نیز از ترموکوپل در عمق ۱/۵ میلیمتری در مرکز قطعه کار بهره بردند [۱۰]. در شبیه سازی عددی حاضر نیز به دلیل ایجاد شرایط مقایسه و بررسی، تاریخچه دمایی ثبت شده نقاط مشابه مورد نظر حاصل و با نتایج تجربی، مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۳- کانتورهای دماهای شبیه‌سازی شده FSSW



شکل ۴- کانتورهای دماهای شبیه‌سازی شده FSW

شبیه سازی و داده های تجربی حاصل از ترموکوپل ها با یکدیگر مقایسه شده و درصد خطا موجود برای همه حالات FSSW با ابزارهای مختلف نمایش داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی این نکته مشخص شد که میزان دمای قطعه کار در FSSW در همه حالات مورد بررسی بین ۱۶ تا ۲۲ درصد نسبت به FSW بالاتر است و دلیل آن را می توان مدت زمان اسکان طولانی تر و عدم ایجاد جریان انتقالی مواد علاوه بر جریان دورانی آن دانست؛ زیرا به دلیل عدم وجود حرکت انتقالی ابزار جریان افقی مواد از بین رفته و انتقال مواد به نقاط دورتر از مکان هندسی پین و منطقه اغتشاش به سختی صورت می پذیرد، بنا به دلایل ذکر شده تجمیع حرارت بالاتر در منطقه کوچک تری اتفاق می افتد و میزان دمای ناحیه اغتشاش به طور چشمگیری نسبت به FSW افزایش می یابد، اما با وجود این مورد همچنان دمای فرایند کمتر از دمای ذوب قطعه کار است.

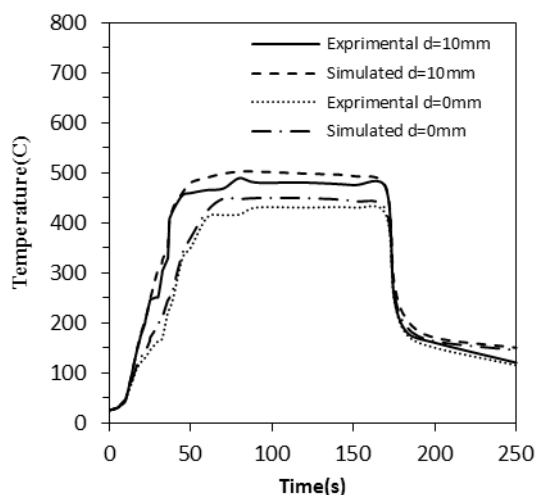
### ۳-۲- نیروی عکس العمل وارد بر ابزار

نیروی عمودی وارد بر ابزار مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقش کلیدی در انتخاب ابزار دارد؛ زیرا ابزار باید توانایی تحمل این چنین نیرویی را در طول فرایند داشته باشد و دچار تغییر شکل پلاستیک نشود، در مطالعه تجربی صورت گرفته توسط یوانگ و همکارانش [۸] تاریخچه زمانی نیروی عمودی وارد بر ابزار در حالت FSSW ثبت و ارایه شد. در پژوهش حاضر نیز به واسطه روش شبیه سازی عددی با استفاده از رویکرد CEL این پارامتر حیاتی بررسی و

### جدول ۵- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی شده

Tool	Temperature(c)			FSW Present work
	FSSW Present work	Measured Temp [8]	Error (%)	
d0	449.3	430	4.4	386.21
d3	458.4	434	5.6	388.59
d6	471.8	455	3.6	403.43
d10	502.1	480	4.6	412.61

فرایند افزایش می یابد. مطابق داده های موجود، ماکزیمم دمای ثبت شده در نمونه ها در قسمت حاشیه ای سطح درگیر ابزار و قطعه کار و در سطح آن اتفاق می افتد، نکته قابل ذکر این مسأله است که دمای سطح قطعه کار مقداری از دمای ثبت شده توسط ترموکوپل ها که در عمق سه میلیمتری قرار دارند متفاوت است و این مسأله کاملاً متناسب با ماهیت فرایند است؛ زیرا با فاصله از سطح تماس ابزار و قطعه کار مقدار دما کاهش می یابد. شکل ۵ نمودار تاریخچه زمانی دمایی FSSW برای نتایج تجربی نقاط ثبت شده توسط ترموکوپل ها و داده های حاصل از شبیه سازی عددی برای دو حالت ابزار d0 و d10 را نمایش می دهد.



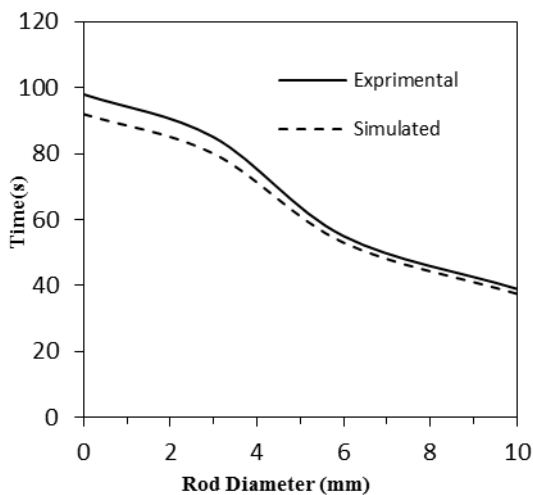
شکل ۵- تاریخچه دمایی FSSW با استفاده از ابزارهای مختلف

با توجه به نمودار مشاهده می شود که در طول مرحله نفوذ، نرخ افزایش دما مقدار اندکی است و دمای قطعه کار به حدود ۵۰ درجه سانتیگراد می رسد، سپس با شروع مرحله اسکان دما با یک شیب و نرخ بالا به سرعت افزایش می یابد و در نهایت به حدود ۴۲۰ درجه برای حالت d0 و ۴۵۵ درجه برای ابزار d10 خواهد رسید، سپس با یک نرخ رشد پایین دما در پیک خود به ۴۳۰ درجه برای ابزار d0 و ۴۸۰ درجه برای حالت ابزار d10 می رسد. همانطور که مشاهده شد، داده های شبیه سازی در توافق بالایی با داده های آزمایشگاهی قرار دارند و با اختلاف اندکی توزیع دما و تاریخچه زمانی دمایی به درستی پیش بینی شده است، در جدول ۴ داده های حاصل از



است، بدین ترتیب فرایند نرم شدگی قطعه کار در یک بازه زمانی طولانی‌تر صورت می‌پذیرد.

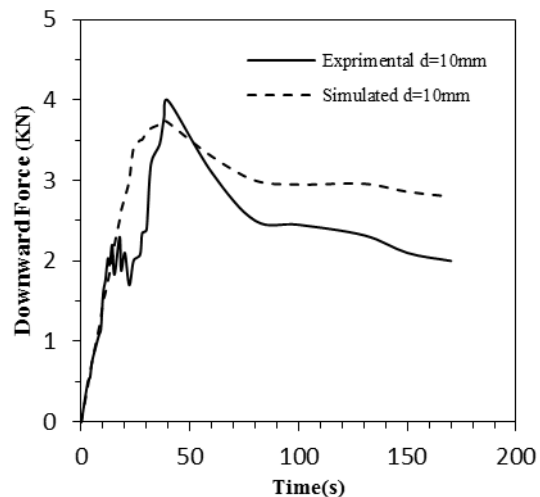
مطابق شکل ۶ نیروی وارد بر ابزار پس از اتمام مرحله نفوذ همچنان روند و شیبی افزایشی را تا زمان ۴۰ ثانیه تجربه می‌کند. نکته قابل توجه این مسأله است که چنانچه از ابزاری بدون هسته آلومینیومی تعبیه شده استفاده شود (ابزار d0)، پیک نیرویی در زمان‌های بالاتری (حدود ۱۰۰ ثانیه پس از شروع فرایند) رخ خواهد داد که این موضوع به دلیل کاهش در میزان ضریب اصطکاک سطحی و کاهش میزان حرارت ایجاد شده توسط تماس بین ابزار و قطعه کار است که باعث تأخیر زمانی در نرم شدگی قطعه کار و افزایش زمان نوسانات نیرویی خواهد شد. هرچه از ابزاری با قسمت آلومینیومی تعبیه شده با قطر بزرگ‌تر استفاده شود، با توجه به افزایش ضریب اصطکاک محلی زمان مورد نیاز برای پایدار شدن ابزار از لحاظ نیرویی و مقدار ماکزیمم نیروی عکس العمل وارد بر ابزار کاهش می‌یابد. در شکل ۷ نمودار مربوط به زمان‌های ایجاد پیک نیروی عکس العمل بر طبق قطر قسمت آلومینیومی تعبیه شده همراه با زمان‌های محاسبه شده از شبیه سازی به نمایش در آمده است و روند تغییرات این پارامتر با افزایش میزان قطر قسمت تعبیه شده آلومینیومی به تصویر در آمده است.



شکل ۷- زمان پیک نیرویی برای حالات مختلف ابزار

همانگونه که در شکل ۷ مشخص است، با افزایش میزان قطر هسته آلومینیومی ابزار زمان حادث شدن پیک نیرویی

اندازه‌گیری شده است. در شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود و نتایج تجربی حاصل از حالت ابزار d10 نمایش داده شده است؛ همچنین در جدول ۵ نتایج پیک نیرویی حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود FSSW و نتایج حاصل از پژوهش یوانگ و اختلاف این نتایج به نمایش درآمده است.



شکل ۶- نیروی عکس العمل عمودی در شرایط عددی و تجربی

جدول ۶- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی شده

DOWNWARD FORCE(KN)			
FSSW			
Tool	Present work estimated	Measured Force[8]	Error(%)
d0	4.21	4.30	2.0
d3	4.18	4.21	0.7
d6	4.18	4.23	1.1
d10	3.85	3.90	1.2

در فرایند FSSW انجام شده با توجه به ضخامت بالای قطعه کار نسبت به عمق نفوذ و عدم وجود پین و عدم وجود حرکت انتقالی ابزار در راستای شکاف، میزان نیروی عمودی عکس‌العمل وارد بر ابزار در طی یک زمان طولانی‌تر به یک وضعیت پایدار خواهد رسید که به دلیل تأخیر زمانی موجود در انتقال حرارت مناسب به بخش‌های تحتانی قطعه کار

همچنین الگوی توزیع دمایی مناسب و صحیحی در همه حالات حاصل شد.

- مقدار پیک دمایی حادث در قطعه کار در FSSW در همه حالات مورد بررسی بین ۱۶ تا ۲۲ درصد نسبت به FSW بالاتر است که این موضوع هم در شبیه سازی و هم در داده های تجربی مشخص است، اما همچنان این دمای ایجاد شده در هر دو فرایند در سطحی پایین تر از دمای ذوب ماده است.
- بالاترین نرخ افزایش و رشد دمای حادث در قطعه کار در فرایند FSW و FSSW در مرحله اسکان روی داد.
- با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود بر پایه استفاده از تکنیک CEL پیش بینی مناسبی از نیروی عکس العمل وارد بر ابزار ارایه شد و نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی نزدیکی و توافق بالایی دارند.
- با استفاده از ابزار با قطر بزرگتر قسمت تعبیه شده آلومینیومی میزان نیروی عکس العمل برآیند در بزرگترین قطر مورد استفاده (d10) تا ۱۰ درصد کاهش می یابد و این نیروی ماکزیمم در زمان کوتاه تری (حدوداً ۶۰ درصد کمتر) از آغاز فرایند اتفاق می افتد که این موضوع به دلیل بالا رفتن اصطکاک و ایجاد حرارت به وسیله این چنین ابزارهایی است، هرچه قطر قسمت تعبیه شده افزایش یابد، میزان این کاهش شدیدتر خواهد بود.

#### ۵- مراجع

- [1] Mishra RS, Mahoney MW (2007) Friction stir welding and processing. ASM International Materials Park, Ohio 44073-0002.
- [2] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes (1991) GB Patent Application No. 9,125,978.8.
- [3] He J, Ling Z, Li H (2016) Effect of tool rotational speed on residual stress, microstructure, and tensile properties of friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy thick plate. Int J Adv Manuf Tech 84(9-12): 1953-1961.
- [4] Simar A, Pardo T, de Meester B (2007) Effect of rotational material flow on temperature distribution

وارده بر ابزار کاسته می شود، با مقایسه دو حال d0 و d10 در این نمودار می توان دریافت که با قرارگیری هسته آلومینیومی در ابزار زمان وقوع و اعمال پیک نیرویی بر ابزار حدود ۶۰ درصد کاهش می یابد. این موضوع به دلیل نرم شدن و تسلیم شدن سریع تر قطعه کار به دلیل اعمال سطح اصطکاکی بزرگتر بین ابزار و قطعه کار است. با افزایش قطر بخش آلومینیومی تعبیه شده در ابزار سطح تماس آلومینیوم (قطعه کار) با آلومینیوم (هسته مرکزی ابزار) بیشتر شده و به دلیل همین سطح بزرگتر و با توجه به بزرگتر بودن ضریب اصطکاک آلومینیوم با آلومینیوم از ضریب اصطکاک آلومینیوم با فولاد حرارت بزرگتری در قطعه کار به وجود می آید و سبب می شود، تسلیم قطعه کار در زمان کوتاه تری از ابتدای فرایند به وجود آید و به همین دلیل پیک نیرویی نیز که ارتباط مستقیمی با حرارت تولید شده در قطعه کار و زمان وقوع تسلیم و حادث شدن و نرم شدگی در آن دارد، در زمانی نزدیک تر به ابتدا و شروع فرایند روی دهد. با مقایسه نتایج نیروی عکس العمل وارد بر هر ۴ ابزار مورد استفاده، مشخص شد که با افزایش قطر بخش آلومینیومی مرکزی، ابزار پیک نیرویی کوچکتر و در زمانهایی نزدیکتر به آغاز را تجربه می کند و وقوع شرایط پایداری نیروی عکس العمل وارد بر ابزار در زمانهای کوتاه تری از شروع فرایند رخ خواهد داد.

#### ۴- نتیجه گیری

شبیه سازی عددی بر پایه استفاده از رویکرد CEL فرایندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی FSW و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای FSSW آلیاژ آلومینیوم AA6061-T6 با استفاده از ابزار بدون پین همراه با یک قسمت آلومینیومی تعبیه شده در آن با قطرهای متفاوت صورت پذیرفت. نتایج زیر حاصل گشت:

- با توجه به بررسی ترم دمایی در حالات مختلف شبیه سازی مشخص شد که نزدیکی و همخوانی بالایی بین نتایج حاصل از شرایط آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی وجود دارد و پیک دمایی برای همه حالات با درصد خطای بین ۴ تا ۶ درصد در مقایسه با نتایج تجربی به درستی پیش بینی شد،

- strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng Fract Mech* 21(1): 31-48.
- [10] Liu X, Lan S, Ni J (2015) Thermal mechanical modeling of the plunge stage during friction-stir welding of dissimilar Al 6061 to TRIP 780 steel. *J Manuf Sci E-T ASME* 137(5): 051017
- [11] Das S, Shen L (2014) Experimental and numerical investigation of dynamic failure of sandstone under high strain rates. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23).
- [12] Leon JS, Jayakumar V (2014) Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation* 1(1): 6.
- [13] Engineering ToolBox (2004) Friction and friction coefficients. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html) [Accessed Day Mo. Year].
- in friction stir welds. *Sci Technol Weld Join* 12(4): 324-333
- [5] Schmidt H, Hattel J (2005) Modelling heat flow around tool probe in friction stir welding. *Sci Technol Weld Join* 10(2): 176-186.
- [6] Zhang Z, Liu HJ (2011) Effect of pin shapes on material deformation and temperature field in friction stir welding. *Trans Chin Weld Inst* 32: 5-8.
- [7] Al-Badour F, Merah N, Shuaib A, Bazoune A (2013) Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes. *J Mater Process Technol* 213(8): 1433-1439.
- [8] Yuang-Cherng Chiou, Chien-Te Liu, Rong-Tsong Lee (2013) A pinless embedded tool used in FSSW and FSW of aluminum alloy. *J Mater Process Tech* 213(11): 1818-1824.
- [9] Johnson GR, Cook WH (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various