

# بررسی اثر نانو ذرات سیلیکون کارباید بر استحکام برشی جوش در جوشکاری اصطکاکی

## اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵

حجت ثمری خلج<sup>۱</sup>، علی نیک‌بخت<sup>۲\*</sup>، مجتبی صدیقی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- استادیار، پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

\* تهران، ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، anikbakht@aut.ac.ir

### چکیده

در این مقاله به بررسی عددی و تجربی بیشینه استحکام برشی اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت لبه روی هم در حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید در ناحیه اتصال پرداخته شده و نتایج با جوشکاری بدون حضور نانو ذرات مقایسه شده است. بدین منظور پارامترهای تاثیرگذار در استحکام برشی اتصال شامل سرعت خطی و دورانی ابزار، شکل پین ابزار (مربعی و رزوه مخروطی)، عمق فرورفتگی و زاویه انحراف ابزار مطالعه شده‌اند. آزمایشات تجربی با استفاده از علم آمار استنباطی به روش تاگوچی طراحی و یک مدل المان محدود سه بعدی نیز با بکارگیری دو نرم افزار دفرم و آباکوس به صورت متوالی توسعه داده شده که نتایج حاصل از آن با آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. اعتبارسنجی مدل عددی نشان می‌دهد که نتایج مدل عددی دارای تطابق مناسبی برای تخمین و پیش‌بینی رفتار فرآیند مذکور می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که حضور نانو ذرات باعث افزایش استحکام برشی اتصال جوشکاری شده حداکثر تا ۲۴ درصد نسبت به جوشکاری بدون این ذرات می‌شود. استفاده از ابزار با پین رزوه مخروطی باعث افزایش استحکام ۴ الی ۵ درصدی در عدم حضور ذرات تقویت کننده و ۴ الی ۷/۵ درصدی در حضور نانوذرات نسبت به ابزار با پین مربعی شده است. موثرترین پارامتر بر استحکام برشی قطعه جوشکاری شده، سرعت دورانی ابزار می‌باشد. همچنین زاویه انحراف ابزار تاثیر اندکی بر استحکام قطعه دارد.

### کلمات کلیدی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم ۷۰۷۵، شبیه‌سازی المان محدود، نانو ذرات سیلیکون کارباید، روش تاگوچی.

استفاده از آلومینیوم در صنایع مختلف، به علت داشتن خواص مطلوب مانند نسبت استحکام به وزن بالا، انعطاف پذیری و شکل پذیری مناسب، مقاومت به خوردگی بالا و بالا بودن هدایت الکتریکی و حرارتی، همواره مورد توجه طراحان و مهندسان بوده است. بکارگیری آلومینیوم در صنایعی مانند هوافضا، اتومبیل و حمل و نقل، منجر به ساخت سازه‌ها و توسعه تحقیقات در زمینه استفاده از آلومینیوم و آلیاژهای آن شده است.

با وجود کاربرد فراوان آلومینیوم، به علت وجود عیوب موجود در جوشکاری آلیاژهای آن (به خصوص آلیاژهای مرتبط با صنایع هوافضا)، استفاده‌ی گسترده از روش‌های مناسب برای جوشکاری در جهت ایجاد اتصال در سازه‌های آلومینیومی امکان پذیر نبوده است. برخی آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ساختار منجمد شده با استحکام بسیار پایین و بوجود آمدن عیوبی مانند تخلخل در منطقه ذوب به طور کلی به عنوان آلیاژهای غیرجوش پذیر طبقه بندی شده بودند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> یک روش جوشکاری در حالت جامد است که برای جوشکاری آلومینیوم‌هایی که جوش پذیر نبوده (گروه‌های ۲xxx، ۶xxx و ۷xxx) معرفی شده است [۱-۳]. آمار نشان می‌دهد که پس از معرفی این روش به عنوان فرآیند جهت اتصال دهی آلیاژهای سبک از جمله آلیاژهای آلومینیوم، نسبت تقاضا به عرضه محصولات پایه همانند ورق و شمش به شدت افزایش یافته و منجر به افزایش قیمت این فلز پرکاربرد شده است [۳].

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از یک ابزار چرخشی غیر مصرفی در یک دستگاه مشابه دستگاه فرز استفاده می‌شود. ابزار با اعمال فشار و حرکت هم‌زمان دورانی و خطی در طول محور تماس دو قطعه، باعث بوجود آمدن حرارت و تغییر شکل پلاستیک موضعی در ناحیه جوش شده و منطقه اتصال را به حالت خمیری در می‌آورد. در اثر حرکت دورانی بین ابزار، مواد خمیری شده با یکدیگر مخلوط گشته و در نتیجه شکل‌گیری اتصال میان قطعه‌ها امکان پذیر می‌شود.

از دستاوردهای اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌توان به اعوجاج پایین، حذف عیوب مربوط به ذوب و استحکام اتصال بالا اشاره نمود. با استفاده از این روش حتی موادی که با تکنیک‌های معمولی غیرقابل جوش در نظر گرفته می‌شوند، قابل جوشکاری می‌باشند [۳].

در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با توجه به هندسه‌های مختلف ابزار، حرکت مواد در اطراف بین ابزار می‌تواند کاملاً پیچیده باشد. این حرکت مواد باعث تغییر شکل پلاستیک شدید در درجه حرارت بالا در منطقه اتصال می‌گردد. این تغییر شکل پلاستیک ممکن است با تاثیرگذاری منفی بر روی کیفیت ریزساختار نهایی منطقه اتصال، باعث کاهش استحکام جوش حاصله گردد [۴-۷]. یکی از راهکارهای تضمین کیفیت ریزساختار ناحیه اتصال در جوشکاری اصطکاکی آلومینیوم، استفاده از مفهوم کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی<sup>۲</sup> است. این دسته از مواد مرکب گزینه‌ای بسیار عالی برای برنامه‌های کاربردی در صنایعی مانند صنایع هوافضا، خودرو و به طور کلی مناسب در حمل و نقل به حساب می‌آیند؛ چرا که این مواد دارای مزایایی از قبیل نسبت بالای استحکام به وزن، سختی بالا، چقرمگی شکست بالا، خواص بهبود یافته در دمای بالا، انبساط حرارتی پایین و مقاومت در برابر سایش بالا می‌باشند. با در نظر گرفتن این قابلیت‌ها می‌توان انتظار داشت که بکار بردن یک ماده ثانویه همچون سیلیکون کارباید<sup>۳</sup> و یا اکسید آلومینیوم<sup>۴</sup> در ناحیه جوش، کیفیت اتصال حاصله را افزایش دهد.

قابلیت‌های بی‌نظیر جوشکاری اصطکاکی و کیفیت جوش حاصله در حضور مواد ثانویه، توجه مهندسان و محققان بسیاری را به خود جلب نموده به گونه‌ای که تحقیقات گسترده‌ای توسط پژوهشگران بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفته است. از طرفی برای کاهش هزینه‌های طراحی و آزمایش قطعات جوشکاری شده، محققین از روش‌های عددی و المان محدود برای شبیه‌سازی و مطالعه پارامترهای موثر در فرآیند جوشکاری استفاده نموده‌اند. با توجه به پژوهش‌های به عمل آمده در زمینه شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، دو نگرش برای شبیه‌سازی این فرآیند به شرح زیر وجود دارد [۸]:

<sup>1</sup> Friction Stir Welding (FSW)

<sup>2</sup> Aluminum Matrix Composites (AMCs)

<sup>3</sup> Silicon Carbide (SiC)

<sup>4</sup> Aluminum Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

۱) شبیه‌سازی مکانیکی - حرارتی به کمک روش المان محدود  
۲) مدل تحلیلی و تولید شار حرارتی در حین فرآیند جوشکاری

نخستین تلاش‌ها در زمینه‌ی مدل‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به وسیله سانگ و کواچویچ (۲۰۰۳)، انجام شده است. ایشان برای شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، یک مدل عددی حرارتی با در نظر گرفتن نیروهای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک به‌منظور استخراج گرمای تولید شده در حین فرآیند را مورد استفاده قرار داده‌اند [۹].

چاو و همکاران (۲۰۰۳)، یک مدل حرارتی-مکانیکی را توسعه دادند که در آن نیروهای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک در حین فرآیند به‌منظور استخراج گرمای تولید شده لحاظ شده است [۱۰]. ماندال و همکاران (۲۰۰۷) یک مدل سه بعدی المان محدود را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> ارائه کرده و به مطالعه فرآیندهای حرارتی درگیر در مرحله غوطه‌وری پرداخته‌اند. در این مدل نرخ کرنش و قانون مواد جانسون-کوک<sup>۲</sup> وابسته به دما، در روش المان محدود بکار گرفته شده است. هم‌چنین ایشان برای کاهش به‌هم‌خوردگی و اعوجاج مش‌ها از تحلیل اولیری-لاگرانژی اختیاری استفاده کرده‌اند؛ با این وجود در تحلیل ماندال و همکاران اثر پین ابزار در تداخل بین ابزار و قطعه کار در نظر گرفته نشده است [۱۱].

بویا و همکاران (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱) [۸، ۱۲، ۱۳] و صادقی و همکاران (۲۰۱۳) [۱۴]، شبیه‌سازی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را از طریق نرم‌افزار دفرم<sup>۳</sup> انجام داده‌اند. این نرم‌افزار با کاهش زمان فرآیند شبیه‌سازی، مشکلات تحلیل الاستیک-پلاستیک در جوش اصطکاکی اغتشاشی را برطرف می‌سازد. در مدل‌سازی با دفرم قطعه کار به عنوان یک قطعه ویسکوپلاستیک و ابزار جوشکاری نیز صلب در نظر گرفته شده‌اند. هم‌چنین بویا و همکاران (۲۰۱۳)، در تحقیقی دیگر با استفاده از نرم‌افزار دفرم یک شبیه‌سازی ترمومکانیکی بر مبنای تحلیل لاگرانژی صریح برای مدل‌سازی اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم آلیاژ تیتانیوم انجام داده‌اند که با استفاده از فرآیند تجربی صحه گذاری شده است [۱۵].

صادقیان و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی توزیع حرارت در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از روش المان محدود پرداخته است. حل حرارتی برای این مسئله از دو روش حل حالت پایدار و نیز حل حالت گذرا استفاده شده و دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی انجام شده، مدل عددی با استفاده از آزمایش‌های تجربی صحه گذاری شده و تاریخچه حرارتی در طول فرآیند اندازه‌گیری شده است [۱۶].

محمدی لندی و همکاران [۱۷] به بررسی اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی استحکام مکانیکی ورق آلومینیومی، با زمینه چند لایه آلومینیوم و کامپوزیت الیافی کربن یا شیشه، شبیه‌سازی ایشان با نرم‌افزار المان محدود انسیس<sup>۴</sup> انجام شده است. گام‌های اولیه به منظور بررسی حضور ذرات در ناحیه جوش در بررسی الیس و همکاران (۱۹۹۶) برداشته شده است. در پژوهش ایشان مشخص شد که اضافه کردن یک ماده ثانویه در ناحیه جوش، باعث بهبود ریزساختار و در نتیجه افزایش استحکام اتصال می‌گردد [۱۸]. چشینی و همکاران (۲۰۰۷) پژوهشی بر روی جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۷۰۰۵ تقویت‌شده با ۱۰٪ از ذرات اکسید آلومینیوم انجام داده و اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ریزساختار و در نتیجه، بر رفتار کششی و خستگی نمونه حاصل را تشریح نموده‌اند. بررسی ریزساختاری جوش حاصله نشان می‌دهد که در منطقه جوش، با کاهش اندازه ذرات ماده ثانویه اصلاح قابل توجهی در اندازه‌ی دانه‌های زمینه‌ی آلومینیوم رخ داده است [۱۹].

تاثیر پارامترهای مرتبط با فرآیند جوشکاری بر اتصال حاصله در حضور ماده ثانویه نیز موضوع تحقیق برخی از پژوهشگران بوده است. ژانگ و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی اثر شانه ابزار بدون پین در جوشکاری اصطکاکی ورق‌های نازک آلومینیوم در حضور و عدم حضور دو تقویت‌کننده (پودر سیلیکون و ورقه مسی) پرداخته‌اند. نتایج ایشان نشان می‌دهد شکست در تمامی آزمایش‌ها که در حضور تقویت‌کننده انجام شده، در ورق بالای و جایی دور از خط جوش رخ می‌دهد و در اثر عدم حضور پین روی ابزار، شانه ابزار نقش مهمی در خواص جوش حاصله خواهد داشت [۲۰].

<sup>1</sup> ABAQUS

<sup>2</sup> Johnson-Cook Law

<sup>3</sup> DEFORM

<sup>4</sup> ANSYS

آهان و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی اثر ذرات سیلیکون کارباید و تعداد پاس جوشکاری بر روی منطقه جوشکاری اغتشاشی چندپاسه آلومینیوم ۵۰۸۳ در حضور سیلیکون کارباید پرداخته‌اند. نتایج ایشان، نشان می‌دهد که سیلیکون کارباید موجود در پاس‌های پیشین نه تنها باعث ریز شدن دانه در منطقه اغتشاش می‌شوند بلکه باعث افزایش سختی منطقه مذکور نیز می‌گردد [۲۱].

بهرامی و همکاران (۲۰۱۴) اثر اندازه نانوذرات سیلیکون کارباید را بر بهبود خواص مکانیکی اتصال حاصله از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ در اتصال لب به لب بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید که قبل از فرآیند جوشکاری به منطقه جوش تزریق می‌شود، استحکام کششی، درصد ازدیاد طول، عمر خستگی و سختی اتصال فوق‌العاده بهبود می‌یابد. از طرفی اثر هندسه پین بر ماکروساختار، ریزساختار و خواص مکانیکی جوش حاصله بررسی شده است. نتایج ایشان بیانگر این مطلب است که خواص مکانیکی در هندسه‌های مختلف پین متفاوت می‌باشد [۲۲-۲۴].

بررسی پارامترهای موثر بر استحکام برشی اتصال آلومینیوم ۷۰۷۵ توسط ثمری خلج و همکاران (۲۰۱۸) انجام شده است. در پژوهش ایشان مشخص گردید که افزایش سرعت دورانی، کاهش سرعت خطی جوش و افزایش زاویه انحراف ابزار باعث افزایش استحکام برشی شده است. در این تحقیق یک مدل عددی بر اساس تحلیل مکانیکی - حرارتی فرآیند جوشکاری به کمک روش المان محدود توسعه داده شده است. بررسی نتایج مشخص کرد که تطابق خوبی بین مدل عددی ایجاد شده و نتایج تجربی وجود دارد. به همین منظور، استفاده از مدل عددی برای تخمین استحکام برشی در اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی پارامتریک مساله امکان پذیر است [۲۵].

ربیعی زاده و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اتصال غیرهمجنس آلومینیوم‌های ۵۷۵۴ به ۶۰۰۶۳ در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حضور و عدم حضور نانو لوله کربنی پرداخته‌اند. به منظور حصول اطمینان از عیوب جوشی، اتصال‌های بوجود آمده تحت آزمون‌های غیرمخرب قرار گرفته و سپس خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده است. افزایش سختی در حضور نانو ذرات مشاهده شده است. همچنین برای توزیع بهتر نانو ذرات در ناحیه جوش، فرآیند جوشکاری به صورت دو پاسه انجام گرفته است. بررسی خواص فیزیکی نشان داد که، یکنواختی در سختی، کاهش ضریب اصطکاک در حین جوشکاری و افزایش استحکام کششی در جوشکاری دو پاسه صورت پذیرفته است [۲۶].

بررسی جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی به منظور بهینه‌سازی شرایط فرآیند توسط سورش و همکاران (۲۰۲۱) مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقات ایشان نانو ذرات سیلیکون کارباید به عنوان تقویت‌کننده ناحیه جوش وارد سوراخ جوش شده و پارامترهای فرآیند به منظور بهبود استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یک طراحی آزمایش به روش تاگوچی با آرایه‌های  $L_{16}$  توسعه داده شده است. مشخص شد که افزایش قطر سوراخ در منطقه جوش، به علت افزایش حجم نانو ذرات موجود، بیشترین تاثیر بر بهبود استحکام اتصال را دارد [۲۷].

قابلیت‌های منحصر به فرد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ایجاد اتصال بین ورق‌های آلومینیومی، استفاده از این روش را در کانون توجه مهندسين و طراحان در صنایع مختلف قرار داده است. از طرف دیگر استفاده از یک ماده تقویت‌کننده در ناحیه جوش کیفیت اتصال ایجاد شده را به مراتب افزایش می‌دهد. با این وجود با بررسی پژوهش‌های پیشین، مشخص گردید که بررسی تاثیر نانو ذرات تقویت‌کننده و توسعه مدل عددی با استفاده از دو نرم افزار به صورت متوالی، جهت اندازه‌گیری استحکام برشی اتصال جوشی آلومینیوم ۷۰۷۵ صورت نگرفته است.

در مقاله حاضر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت لبه روی هم، در حضور و عدم نانو ذرات سیلیکون کارباید، با هدف بررسی استحکام برشی اتصال حاصله و همچنین تاثیر بکارگیری ماده تقویت شده بر آن مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور فرآیند جوشکاری و اغتشاش حاصل از آن با استفاده از نرم‌افزار دفرم به صورت یک مدل سه بعدی شبیه‌سازی شده و تاریخچه حرارتی فرآیند جوشکاری به عنوان خروجی این نرم‌افزار استخراج شده است. تاریخچه حرارتی به عنوان ورودی نرم‌افزار آباکوس بکار رفته و فرآیند خنک‌سازی در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. سپس نمونه خنک شده در نرم‌افزار آباکوس تحت کشش قرار گرفته و استحکام برشی جوش حاصله اندازه‌گیری شده است. همچنین ساختار ناحیه اتصال در حضور و عدم حضور نانو ذرات به صورت شرایط مرزی در آباکوس اعمال شده است. در ادامه جهت اعتبار سنجی مدل عددی، بیشترین استحکام برشی حاصل از شبیه‌سازی اندازه‌گیری و با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی صحت‌گذاری شده است.

علاوه بر ایجاد یک مدل عددی جهت تخمین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی استحکام برشی در مدل عددی، مطالعه پارامترهای موثر بر استحکام برشی به عنوان دیگر هدف تحقیق در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شکل پین ابزار، عمق فرو رفتگی ابزار، سرعت دورانی، سرعت خطی و زاویه انحراف ابزار لحاظ شده است که به منظور کنترل بهینه این عوامل، از دانش طراحی آزمایش استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش فعالیت‌های تجربی در جهت بررسی استحکام برشی سازه در ناحیه جوش پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تشریح شده است. آزمایش‌ها، یک‌بار در حضور و یک‌بار در عدم حضور سیلیکون کارباید به عنوان ماده تقویت‌کننده انجام شده و در نهایت آزمون کششی برشی به منظور بررسی استحکام برشی ناحیه جوش، انجام شده است.

در راستای انجام آزمایش‌های تجربی، ابتدا ورق‌های از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ (در ضخامت ۳ میلی‌متر) و هم‌چنین نانو پودر سیلیکون کارباید تهیه شده است. برای بررسی صحت مواد و بدست آوردن نتایجی با دقت بالاتر، ورق آلومینیومی آنالیز جنس شده است. ترکیب شیمیایی پودر سیلیکون کارباید و ورق آلومینیومی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ لیست شده‌اند.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا ورق آلومینیومی در ابعاد  $110 \times 80$  میلی‌متر مربع و با ضخامت ۳ میلی‌متر، جهت انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برش زده شده است. به منظور حصول اطمینان از به‌هم‌خوردگی پودر سیلیکون کارباید در ناحیه جوش، روی هر ورق و در راستای جوش شیاری به طول ۶۰ میلی‌متر، عرض ۱ میلی‌متر و عمق ۲ میلی‌متر ماشین‌کاری شده است. شیاری‌ها ایجاد شده روی قطعه از پودر پر شده‌اند تا آزمایش‌ها با حضور پودر در ناحیه جوش انجام گردد. برای پر کردن شیاری‌ها از پودر سیلیکون کارباید ابتدا مقداری از پودر با الکل مخلوط گردید؛ تا حالت خمیری پیدا کنند. سپس شیاری‌ها از پودر سیلیکون کارباید پر شده و با استفاده از یک ورق نازک عمل فشردگی پودر در شیاری‌ها انجام می‌گردد.

قدم بعدی، انتخاب ماده مناسب برای ساخت ابزار جوشکاری است. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، دستیابی به جوش سالم مستلزم داشتن ابزاری با مشخصات هندسی، فیزیکی و متالورژیکی مناسب است. از آن جایی که ابزار تحت تأثیر مستقیم تنش‌های حرارتی و مکانیکی به طور هم‌زمان قرار می‌گیرد، انتخاب جنس مناسب که بتواند خواص مکانیکی و متالورژیکی خوبی در دماهای بالا نشان دهد، از ملزومات ساخت ابزار است. در این فرآیند، جنس ابزار با توجه به جنس ماده‌ی پایه جوشکاری تعیین می‌گردد [۲۸]. در واقع با توجه به این که دمای تولید شده در فرآیند، از طریق اصطکاک بین ابزار و قطعه کار به‌وجود آمده و منجر به اتصال در ناحیه جوش می‌شود؛ جنس ابزار با توجه به دمای کاری متناسب با قطعه کار، مشخص می‌گردد. برای بررسی اثر شکل ابزار بر استحکام جوش، دو هندسه مربعی و مخروطی برای ابزار طراحی و ساخته شده است (شکل ۱). در مقاله حاضر، بر اساس پژوهش‌های پیشین، جنس ابزار فولاد گرم‌کار ۱،۲۳۴۴ انتخاب شده [۲۹] که مشخصه‌های ابعادی هر یک از ابزارها در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین با انجام یک عملیات حرارتی روی ابزار، سختی ابزار تا ۵۳ راکول-سی<sup>۱</sup> افزایش یافته است.

در این عملیات حرارتی ابتدا دمای قطعه کار تا دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  بالا برده شده و سپس در این دما به مدت ۱۳ دقیقه حرارت داده می‌شود. در مرحله بعدی، قطعه کار از کوره بیرون آورده شده و در مجاورت هوا تا رسیدن به دمای محیط قرار داده شده است. پس از رسیدن به دمای محیط، ابزار مجدداً در دمای  $530^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶۰ دقیقه حرارت داده شده و پس از گذشت زمان در مجاورت هوا خنک می‌شود [۲۹].

به منظور بررسی تأثیر حضور ماده تقویت‌کننده، هر کدام از آزمایش‌های لیست شده در جدول ۳ در دو سری، یک سری در حضور پودر سیلیکون کارباید در ناحیه جوش و سری دوم در عدم حضور پودر در ناحیه جوش، انجام شده‌اند. برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از یک ماشین فرز سنتی به عنوان دستگاه انجام آزمایش استفاده شده است. با توجه به امکانات ماشین‌های فرز سنتی، اعمال نیروی محوری ابزار در حین فرآیند جوشکاری، امکان‌پذیر نیست. لذا برای جبران این وضعیت ابزاری طراحی شده است که با تماس کف شانه ابزار با سطح جوش، مقداری از ابزار در ناحیه اتصال نفوذ کند. شکل ۲ نمایی از قطعه‌های بسته شده و ابزار را در حالت شماتیک (شکل ۲-الف) و حین جوشکاری (شکل ۲-ب) نشان داده است.

<sup>۱</sup> Rockwell-C

جدول ۱: ترکیب شیمیایی پودر سیلیکون کارباید [۲۲]

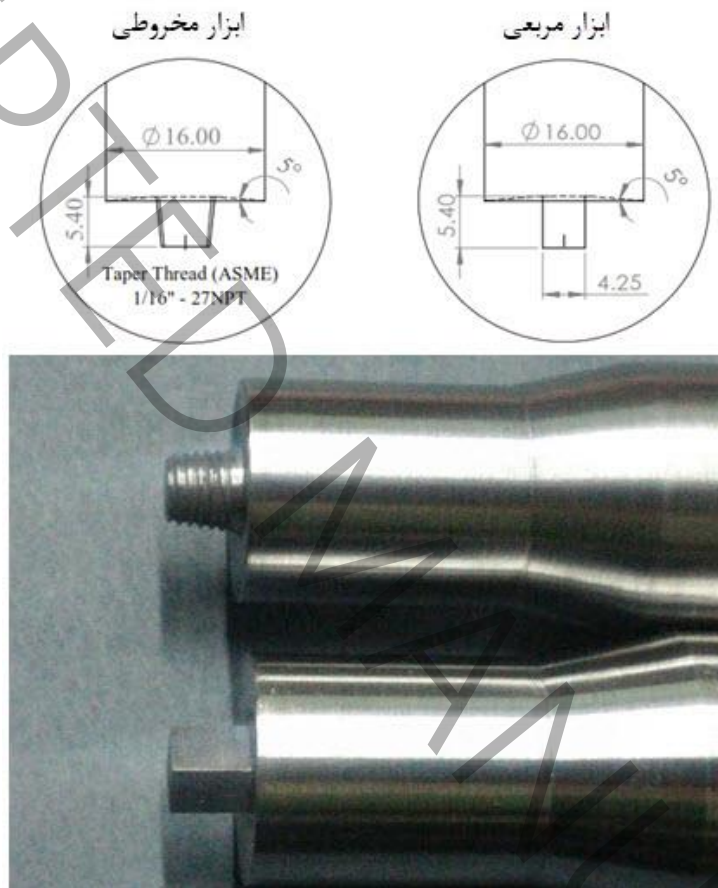
Table 1: Chemical composition of silicon carbide powder [22]

سیلیس خالص	کربن خالص	چگالی جرمی (g/cm <sup>3</sup> )	اندازه ذرات (nm)	خلوص
۰/۲۴٪	۰/۷۶٪	۰/۰۵	۶۰ الی ۴۰	۹۹٪

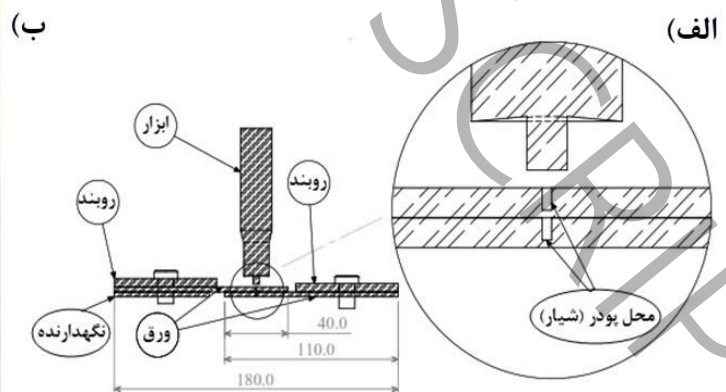
جدول ۲: ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۷۰۷۵

Table 2: Chemical composition of aluminum 7075

AL	Ti	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Mg	Zn	عناصر
مابقی	۰/۰۲	۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۳	۱/۳۷	۱/۸۷	۶/۳۲	درصد



شکل ۱: ابزارهای جوشکاری اصطکاکی طراحی و ساخته شده (تمامی ابعاد برحسب میلی‌متر است)  
Figure 1: Designed and fabricated friction stir welding tools (all dimensions are in mm)



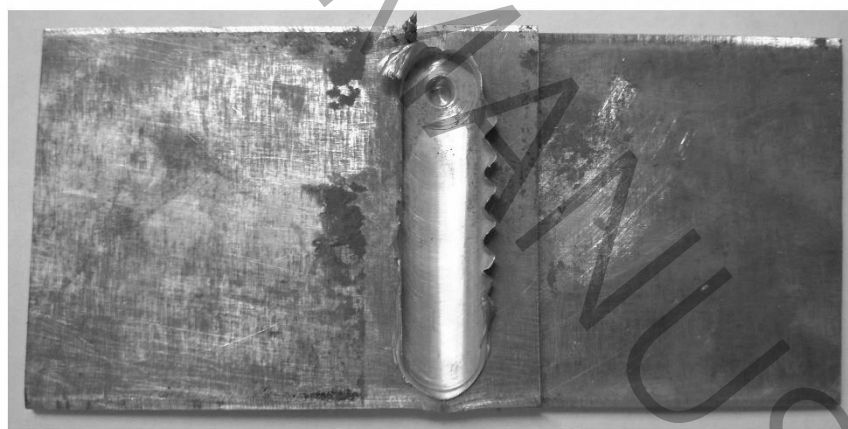
شکل ۲: الف) شماتیک فرآیند جوشکاری در فیکسچر، ب) آزمایش تجربی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لبه روی هم  
Figure 2: a) Schematic of the welding process in the fixture, b) Experimental test of friction stir lap welding

به عنوان اولین قدم در انجام فرآیند جوشکاری، ابزار تا تماس سطح شانه به قطعه کار درون آن فرو برده می‌شود. بدین منظور و برای جلوگیری از به‌وجود آمدن عیب تونلی<sup>۱</sup>، ابزار به مقدار معین داخل قطعه کار فروبرده شده تا سطح مقعر طراحی شده روی پین به خوبی با سطح قطعه کار در تماس قرار گیرد. در واقع با انجام این کار عمل فورجینگ<sup>۲</sup> به منظور جلوگیری از عیب تونلی انجام می‌گردد [۲۸، ۳۰]. برای جلوگیری از شکل‌گیری عیب مذکور، ابزار پس از فرورفتن، در نقطه شروع به مدت ۶۰ ثانیه بدون حرکت در راستای خط جوش دوران داده شده است. پس از تکمیل این مرحله، ابزار مسافت ۶۰ میلی‌متری را در راستای عرض قطعه طی کرده و با انجام مراحل ذکر شده اتصال ایجاد می‌شود. شکل ۳-الف نشان دهنده قطعه جوشکاری شده است.

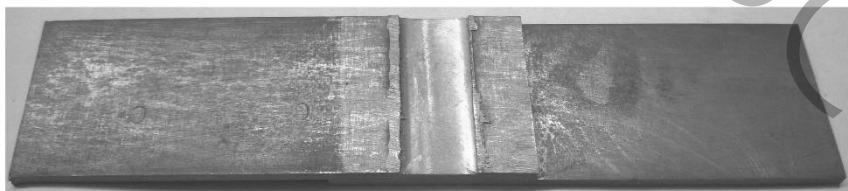
پس از انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و به‌منظور بررسی استحکام برشی اتصال حاصل و تاثیر حضور پودر سیلیکون کارباید بر روی استحکام برشی ناحیه جوش، ابتدا قطعه‌ها تمیز شده و سپس مناطق اضافه با استفاده از سمباده شماره ۴۰۰، سمباده زنی می‌شوند. این کار برای زودودن اضافات بوجود آمده بر اثر برخورد ابزار و قطعه کار در حین فرآیند جوشکاری انجام می‌گیرد. سپس قطعه‌های جوش خورده در ابعاد  $40 \times 180$  میلی‌متر مربع، بر اساس استاندارد AWS/D8.9-97 برش داده شده‌اند [۳۱]. برای ایجاد یک برش دقیق، از ماشین‌های وایرکات استفاده شده است. نمونه قطعه نهایی آماده برای آزمون کششی برشی در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

برای بررسی استحکام برشی، قطعه‌های جوش خورده مطابق شکل ۴ داخل گیره دستگاه آزمون کشش قرار داده شده‌اند. از طرفی برای به حداقل رساندن تنش‌های خمشی در حین اجرای فرآیند، قطعه‌های اضافی مانند شکل ۴ برای پر کردن نواحی خالی بین گیره‌ها قرار داده می‌شوند. این کار باعث یکسان شدن فاصله بین گیره‌ها و قرارگیری آن‌ها در یک راستا می‌گردد. برآیند این موضوع حصول اطمینان از عدم تاثیر تنش خمشی بر نتایج مربوطه به بررسی استحکام برشی می‌باشد. در آزمایش‌های تجربی، نرخ کرنش در آزمون کششی برشی برابر  $3 \text{ mm/min}$  در نظر گرفته شده است.

الف)



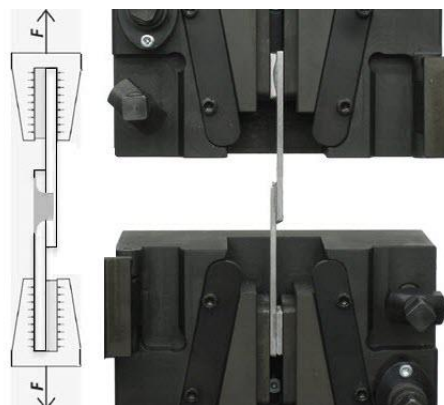
ب)



شکل ۳: الف) قطعه جوشکاری شده، ب) نمونه برش خورده برای بررسی استحکام برشی  
Figure 3: a) welded part, b) cut sample for measuring shear strength

<sup>1</sup> Tunneling Defect

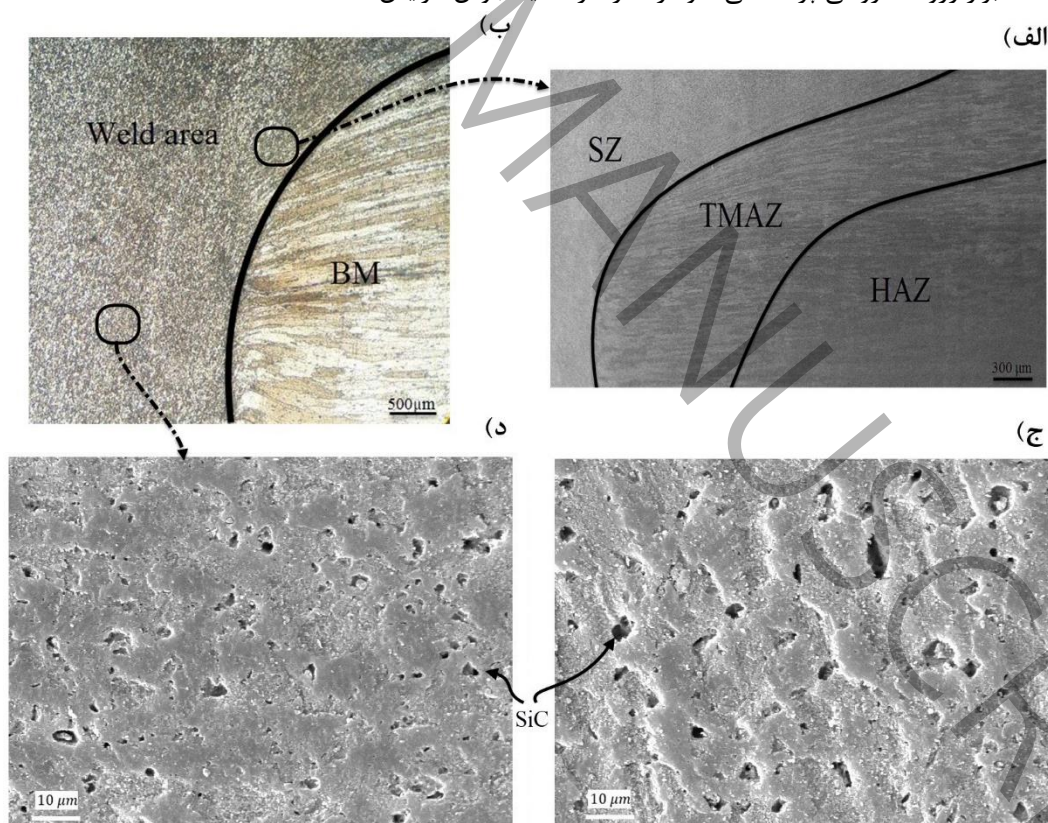
<sup>2</sup> Forging



شکل ۴: شماتیک قرارگیری نمونه‌های جوشکاری شده در دستگاه آزمون کششی برشی

Figure 4: Schematic placement of the welded samples in the tensile shear test machine

به منظور بررسی نحوه توزیع ذرات سیلیکون کارباید در ناحیه جوش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. در شکل ۵ نقاط مختلف جوش در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است شکل ۵-الف و ب نواحی مختلف اتصال را به تفکیک نشان داده‌اند. حضور پودر سیلیکون کارباید در مرکز ناحیه جوش در شکل ۵-ج و د نشان داده شده است. در این شکل، مناطق به هم چسبیده سیلیکون کارباید به رنگ تیره ظاهر شده و بخش‌های غنی و فقیر از ذرات سیلیکون کارباید در ناحیه اغتشاش یافته در کنار یکدیگر مشاهده می‌شوند. شکل ۵-ج نشان دهنده ناحیه جوش با استفاده از ابزار مربعی و شکل ۵-د مختص به ابزار با پین رزوه مخروطی است. نحوه‌ی توزیع نانو ذرات در این شکل نشان می‌دهد که استفاده از ابزار مربعی باعث افزایش مناطق تجمع نانو ذرات می‌گردد. این در حالی است که ابزار رزوه مخروطی پراکندگی نانو ذرات را در ناحیه جوش افزایش داده است.



شکل ۵: ساختار ناحیه اتصال: الف) SZ, TMAZ و HAZ, ب) نواحی کلی اتصال و فلز پایه به همراه مناطق استخراج اطلاعات، ج) در حضور پودر سیلیکون کارباید با ابزار مربعی و د) ابزار مخروطی.

Figure 5: Structure of the joint region; a) SZ, TMAZ and HAZ, b) general bonding and base metal areas with information extraction areas, c) in the presence of silicon carbide powder with square tool and d) conical tool.



### ۳- شبیه‌سازی المان محدود

امروزه با توجه به گسترش فرآیندهای مکانیکی و ترمومکانیکی و هم‌چنین لزوم بهره‌برداری بهتر از منابع مالی و زمان، توجه صنایع به استفاده از فرآیندهای شبیه‌سازی به‌جای روش‌های تجربی مبتنی بر سعی و خطا افزایش یافته است. یکی از فرآیندهای تولید که شبیه‌سازی آن همواره مد نظر محققان بوده، فرآیند جوشکاری می‌باشد. این فرآیند با تغییر شکل پلاستیک غیرخطی بسیار بزرگ همراه است. از طرفی کارآیی روش‌های شبیه‌سازی فرآیندهایی که با تغییر شکل شدید پلاستیکی همراه می‌باشند متفاوت است. بدین منظور در این پژوهش برای حصول اطمینان از دقت شبیه‌سازی، دو نرم‌افزار دفرم و آباکوس (به صورت متوالی) برای شبیه‌سازی حرارتی- مکانیکی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بکار گرفته شده‌اند. در این راستا، ابتدا توزیع درجه حرارت بر اثر اغتشاش مکانیکی در نرم‌افزار دفرم بدست آمده و سپس این توزیع حرارتی به عنوان ورودی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده تا استحکام برشی قطعه حاصل بررسی شود. در شبیه‌سازی انجام شده، اثر ابزار جوش (شانه و پین ابزار) و تداخل بین ابزار و قطعه کار لحاظ شده تا نقایصی که در شبیه‌سازی‌های قبیل وجود داشته است برطرف شود [۳۰]. علاوه بر این، در جهت کاهش زمان فرآیند شبیه‌سازی، تداخل بین ابزار و قطعه کار در نرم‌افزار دفرم صورت گرفته است. به دلیل مشکلات موجود در مورد تداخل بین ابزار و قطعه کار، مدل قطعه کار به صورت یک جسم ویسکوپلاستیک لحاظ شده است. استفاده از این نوع جسم به‌جای جسم الاستیک-پلاستیک بدون تاثیر گذاشتن بر صحت نتایج، منجر به کاهش شدید زمان تحلیل از چند ماه به چند روز می‌شود [۳۰].

#### ۳-۱- شبیه‌سازی در نرم‌افزار دفرم

نرم‌افزارهای قدرتمندی مثل آباکوس قابلیت شبیه‌سازی تداخل مناسب ابزار و چرخش آن را در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل به‌هم‌خوردگی شدید مش‌ها را نداشته و اعوجاج مش‌ها مانع از اجرای کامل شبیه‌سازی و در نهایت توقف آن می‌گردد [۳۰]. پس برای ادامه کار شبیه‌سازی نیاز به مش‌زنی مجدد<sup>۱</sup> به صورت اتوماتیک می‌باشد. یکی از ویژگی‌هایی که نرم‌افزار دفرم را برای تحلیل‌های مکانیکی-حرارتی با تغییر شکل‌های بزرگ و مسائلی که اعوجاج مش‌ها قابل توجه است، درخور استفاده کرده قابلیت مش‌زنی مجدد اتوماتیک آن می‌باشد.

در مش‌بندی قطعه کار باید به نواحی از قطعه که در ناحیه اتصال قرار دارند توجه خاصی شود. دلیل این امر حساسیت این نواحی نسبت به توزیع تنش و حرارت‌های موجود و هم‌چنین چگالی حرارتی در آن‌ها است. از این‌رو مش ریز برای نواحی نزدیک به خط جوش با توجه به حساسیت‌های موجود در آن، و مش درشت برای نواحی دورتر در جهت کاهش زمان تحلیل، لازم است.

با استفاده از کتابخانه مواد موجود در نرم‌افزار دفرم، ورق آلومینیومی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و جنس ابزار از فولاد گرم‌کار ۱،۲۳۴۴ انتخاب شده‌اند. از آن جایی که در فرآیندهای حالت جامد مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، دمای کاری به مراتب پایین‌تر از جوشکاری در حالت ذوبی است، مشکلات تعریف خواص مواد در دماهای بالا (عدم دسترسی به خواص دقیق در دماهای بالا)، به خودی خود رفع شده و بروز خطا در نتایج شبیه‌سازی این فرآیند وجود ندارد. بنابراین می‌توان با حفظ دقت در نتایج، از کتابخانه مواد موجود در نرم‌افزار دفرم استفاده نمود.

قطعه کار به صورت جسم ویسکوپلاستیک و ابزار و صفحه‌ی پشتی<sup>۲</sup> هر دو به صورت جسم صلب در نظر گرفته شده‌اند. خواص قطعه کار مطابق پژوهش [۲۵] در نظر گرفته شده است. در این مرحله از شبیه‌سازی، اثر پودر تقویت‌کننده در خواص مواد وارد نشده است؛ زیرا حضور پودر تاثیری بر انتقال حرارت در ناحیه اتصال ندارد [۲۸].

در شبیه‌سازی صورت گرفته، رابطه تنش-کرنش قطعه کار با شرایط جانسون-کوک و معیار از تسلیم فون‌میسز<sup>۳</sup> لحاظ شده است. هم‌چنین ضریب اصطکاک سطح تماس بین ابزار و قطعه در طول فرآیند جوشکاری ۰/۴۶ در نظر گرفته شده است [۳۲].

<sup>1</sup> Re-mesh

<sup>۲</sup> در شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم‌افزار دفرم برای ایجاد تبادل حرارتی (موجود بین ورق و میز دستگاه در واقعیت) و جلوگیری از پارگی ورق در اثر تغییر شکل شدید که به واسطه‌ی تداخل بین ابزار و قطعه کار رخ می‌دهد، از صفحه‌ی پشتی استفاده می‌شود.

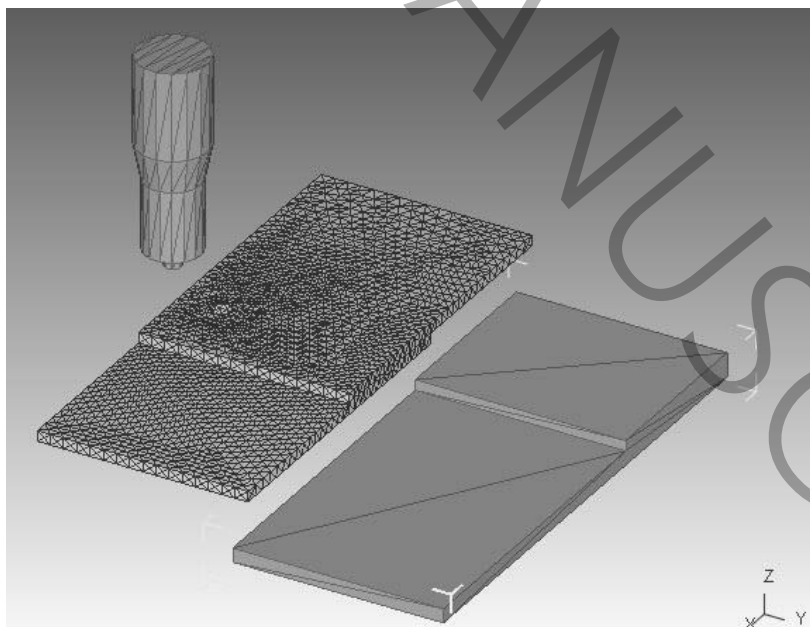
<sup>3</sup> Von Mises

قطعه‌های بکار رفته در شبیه‌سازی با نرم‌افزار دفرم در شکل ۶ نشان داده شده است. تبادل دما با محیط و با توجه به ضریب جابه‌جایی به عنوان شرایط مرزی برای هر سه قطعه (قطعه کار، ابزار و ورق پشتی) در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که در اجرای آزمایش تجربی از فیکسچر برای نگهداری قطعه و جلوگیری از حرکت آن استفاده می‌شود، قطعه کار در سه جهت برای نزدیک کردن هرچه بیشتر شرایط شبیه‌سازی به شرایط آزمایش، ثابت فرض شده است. سطح‌هایی که قطعه کار با ابزار و صفحه پشتی در تماس هستند، مشخص شده تا تماس بین آن‌ها معنا پیدا کند. چگونگی تعریف تماس بین قطعه کار با ابزار و قطعه کار با صفحه پشتی شامل تعریف ضریب اصطکاک بین بخش‌های مذکور و همچنین میزان تبادل حرارتی بین آن‌ها است. در شبیه‌سازی انجام شده، شرایط مرزی حرارتی نیز به صورت جریان همرفت سطوح مختلف ابزار، قطعه کار و صفحه‌ی پشتی لحاظ شده است. تمامی مراحل جوشکاری مطابق با فرآیند تجربی در این نرم‌افزار انجام گرفته است.

### ۳-۲- شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

شبیه‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار آباکوس در سه مرحله انجام شده است. مرحله جوشکاری، مرحله خنک‌سازی و مرحله کششی برشی، مرحله‌ی هستند که در گام دوم شبیه‌سازی انجام شده‌اند [۲۵]. برای تعریف خواص مواد در نرم‌افزار آباکوس، قطعه به دو قسمت تقسیم شده است؛ منطقه اتصال که در آن ماده تقویت کننده وجود دارد و قسمت‌های خارج از منطقه اتصال که ماده تقویت کننده در آن وجود ندارد. درون ناحیه اتصال، خواص مواد با استفاده از پردازش تصاویر ریزساختار (شکل ۵) و با بکارگیری قانون مخلوطها<sup>۱</sup> تعیین شده است.

در ادامه با استفاده از مطالعه ساختاری و حصول اطمینان از توزیع نانو ذرات سیلیکون کار باید در ناحیه جوش بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال بدست آمده، یک کران بالا و یک کران پایین برای خواصی از قبیل مدول الاستیک، چگالی جرمی و غیره در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن توزیع نانو ذرات و استفاده از روش مخلوطها، خواص مکانیکی جوش به صورت تئوری اندازه‌گیری شد. مقادیر اندازه‌گیری شده، با نتایج تجربی پژوهش‌های پیشین [۲۸] و آزمایش‌های تجربی این پژوهش مقایسه شده و پس از تایید مطابقت نتایج این روش و نتایج تجربی، این مقادیر به صورت داده‌های اولیه در نرم‌افزار آباکوس وارد شده است. در خارج از ناحیه اتصال نیز ماده بکار رفته آلومینیوم ۷۰۷۵ تعریف شده است.



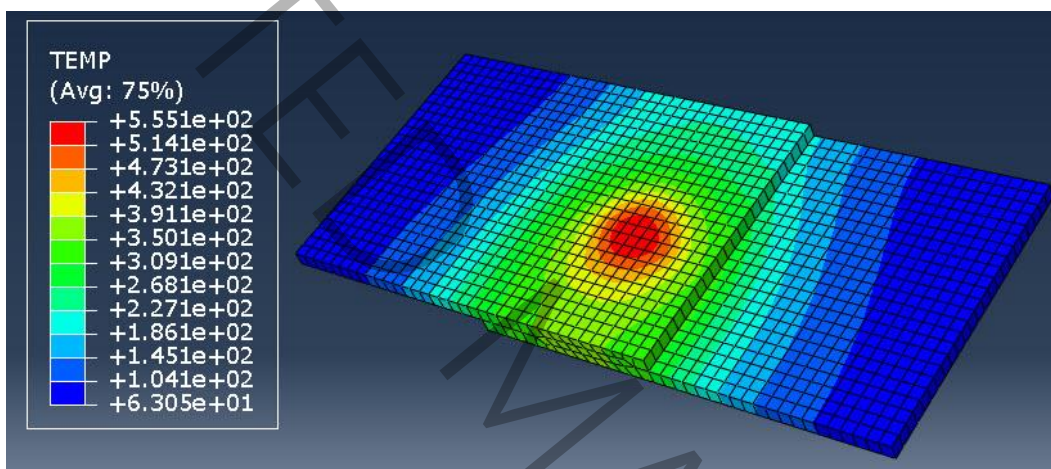
شکل ۶: قطعه‌ها در شبیه‌سازی نرم‌افزار دفرم

Figure 6: Parts in Deform software simulation

<sup>۱</sup> Rule of mixtures

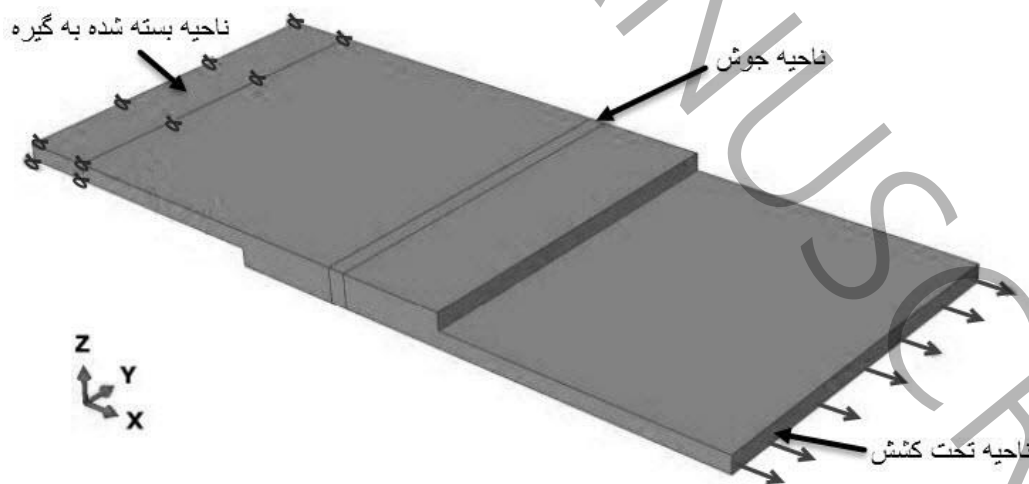
در مرحله جوشکاری، داده‌های خروجی از نرم‌افزار دفرم به صورت شرایط مرزی برای نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است. پس از تعیین خواص مواد و ایجاد شرایط مرزی، گام‌هایی به تعداد خروجی‌های دفرم ایجاد می‌شود. گام‌ها به گونه‌ای تعریف شده‌اند که هر گام متاثر از گام‌های قبلی می‌باشد. پس از اجرای یک تحلیل حرارتی، داده‌های مرحله‌ی جوشکاری به عنوان شرایط مرزی اولیه‌ی در مرحله‌ی خنک‌سازی قرار داده شده‌اند. شکل ۷ نشان دهنده‌ی نمایی از توزیع حرارتی در شبیه‌سازی پژوهش حاضر می‌باشد.

در مرحله‌ی خنک‌سازی، ابتدا قیود مرحله‌ی قبلی از روی قطعه کار برداشته شده و با توجه به خواص حرارتی ماده و گذشت زمان، دمای قطعه به دمای محیط بازمی‌گردد. پس از رسیدن به دمای محیط داده‌های این مرحله به عنوان شرایط مرزی برای مرحله کشش قطعه قرار داده شده است. در مرحله کششی برشی با توجه به شرایط آزمایش کشش، نواحی مختلف قطعه کار تعیین شده است. هم‌چنین قیودی با توجه به شرایط آزمون کششی برشی روی قطعه تعبیه شده است. نرخ کرنش در شبیه‌سازی‌ها کششی برشی برابر  $mm/min$  ۳ لحاظ گردید. برای جلوگیری از هرگونه بار خمشی در شبیه‌سازی مقدار جابجایی در راستای عرض و ضخامت نمونه در تمامی قطعه صفر در نظر گرفته شده است. نواحی مختلف قطعه و قیود تعیین شده در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷: توزیع دمایی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Figure 7: Temperature distribution of friction stir welding process



شکل ۸: نواحی مختلف قطعه در شبیه‌سازی مرحله‌ی کشش در نرم‌افزار آباکوس

Figure 8: Different areas of the part in the simulation of the tension stage in Abaqus software

#### ۴- طراحی آزمایش

یکی از علل گسیختگی و شکست اتصال‌های جوش، نیروی برشی وارده به ناحیه اتصال می‌باشد. از این رو در جوشکاری مواد آلومینیومی در حالت لبه روی هم، استحکام برشی اتصال از اهمیت فراوانی برخوردار است. عوامل مؤثر بر استحکام برشی در این ناحیه، پارامترهای فرآیند جوش اصطکاکی اغتشاشی از قبیل: سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی ابزار، شکل و هندسه بین ابزار، نیروی عمودی ابزار و زاویه انحراف ابزار می‌باشد. این پارامترها هر کدام به نوعی در استحکام برشی حاصل از اتصال تأثیر گذارند. از این بین، شکل بین، سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی ابزار، عمق فرورفتگی ابزار و زاویه‌ی انحراف آن عواملی هستند که در جهت مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی استحکام برشی، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

در این مقاله، از روش طراحی عاملی آزمایش<sup>۱</sup> برای تعیین مقادیر بهینه این پارامترها استفاده شده است. این روش یکی از تکنیک‌های رایج برای شناسایی عوامل مؤثر در فرآیندها و کنترل و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها می‌باشد. در این تکنیک با استفاده از روش‌های آماری (با توجه به نوع مسئله) به شناسایی عوامل مؤثر و کاهش عوامل غیرقابل کنترل پرداخته می‌شود. بر این اساس و با توجه به عوامل مؤثر بر استحکام برشی جوش، آزمایش‌هایی بر مبنای روش تاگوچی<sup>۲</sup> طراحی شده‌اند. از آنجایی که همه عوامل دارای تعداد سطح یکسان نیستند، از سطوح مختلط<sup>۳</sup> در روش تاگوچی برای طراحی عوامل در این طراحی آزمایش استفاده شد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته و شرایط آزمایشگاهی موجود، مقادیری از پارامترهای فرآیند به‌عنوان سطوح انتخاب شده است که با استفاده از آن‌ها تأثیر عوامل بر استحکام برشی نشان داده شود. این مقادیر در جهت شناسایی بهتر تأثیر عوامل در سطوح مختلفی طراحی شده است. سرعت دورانی ابزار برحسب rpm دارای چهار سطح با مقادیر ۶۳۰-۸۰۰-۱۰۰۰-۱۲۵۰ انتخاب شده است. سرعت خطی ابزار یا همان سرعت جوشکاری در چهار سطح ۱۰۰-۷۵-۵۰-۲۵ برحسب mm/min و عمق فرورفتگی در دو سطح ۰/۱ و ۰/۳ برحسب میلی‌متر در نظر گرفته شده است. زاویه انحراف ابزار در دو سطح و با مقادیر ۰ و ۳ درجه مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی اثر شکل و هندسه بین ابزار بر روی استحکام برشی اتصال جوشی، دو ابزار با بین‌های رزوه مخروطی و مربعی در نظر گرفته شده‌اند.

مشخصات آزمایش‌هایی که با استفاده از نرم افزار مینی تب<sup>۴</sup> و به روش سطوح مختلط<sup>۵</sup> تاگوچی طراحی شده‌اند به صورت یک آرایه متعامد<sup>۶</sup> L<sub>16</sub>، در جدول ۳ لیست شده‌اند. از اینجای متن به بعد، مشخصات آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، با شماره‌های ردیف جدول ۳ مشخص شده و مورد ارجاع قرار خواهند گرفت. شکل بین ابزار در طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته نشده است؛ این بدان معناست که تمامی ۱۶ آزمایش طراحی شده یک بار با بین مربعی و یک بار با بین مخروطی انجام گرفته‌اند.

#### ۵- نتایج و بحث

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی در حالت حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید، ابتدا با مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحت‌گذاری نتایج مدل عددی انجام گرفته است. سپس، بررسی اثر پارامترهای جوشکاری بر استحکام ناحیه اتصال برحسب MPa تشریح شده‌اند. آزمایش‌های طراحی شده و نتایج بدست آمده در داده‌های جدول ۳ نشان داده شده‌اند. بحث و ارزیابی پارامترها با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳ می‌باشند.

<sup>1</sup> Design of Experimental (DoE)

<sup>2</sup> TAGUCHI

<sup>3</sup> Mixed Levels

<sup>4</sup> Minitab

<sup>5</sup> Mix Levels

<sup>6</sup> Orthogonal Array

با توجه به پژوهش پیشین در مرجع [۲۵]، مشخص گردید که مدل عددی ایجاد شده، دارای تطابق خوبی با نتایج تجربی در عدم حضور نانو ذرات می‌باشد. در ادامه بررسی‌های به عمل آمده، به منظور بررسی شرایط حضور نانو ذرات در ناحیه جوش انجام شده‌اند. با توجه به داده‌های جدول ۳، مشخص شد که خطای مدل عددی نسبت به آزمایش‌های تجربی در حدود ۱۱ الی ۱۵ درصد می‌باشد.

علت اصلی اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی، عوامل متالورژیکی موثر بر خواص قطعه می‌باشد که در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته لحاظ نشده است. علاوه بر این، در کرنش‌های یکسان، تنش پیش‌بینی شده توسط مدل المان محدود کمتر از تنش مربوط به آزمون تجربی است. در نتیجه مدل عددی ایجاد شده دارای تطابق ایمن و مناسبی به منظور تخمین خواص قطعه جوشکاری شده در حالت عدم حضور [۲۵] و حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید است.

نمودار تنش برشی-کرنش برشی برای برخی آزمایش‌ها در قالب شکل ۹ ارائه شده است. این شکل بیانگر آنست که حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید، باعث افزایش ازدیاد طول و مقاومت در برابر نیروی برشی در ناحیه اتصال شده است. همانطور که در شکل ۹ پیداست، مدل المان محدود به خوبی با روند تجربی در حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید، تطابق دارد.

توجه در روند تغییرات شکل ۹، نشان می‌دهد که در عدم حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید رفتار مواد به صورت شکست ناگهانی بوده و حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید در منطقه اتصال باعث افزایش مقاومت برشی شده و بیشترین تنش برشی قابل دستیابی را افزایش داده است.

#### ۵-۲- بررسی تاثیر ذرات تقویت کننده

با توجه به نتایج بدست آمده، مشخص شد که حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید، باعث افزایش ۲۱ الی ۲۴ درصدی در استحکام کششی اتصال شده است. علت این امر کاهش اندازه دانه‌ها در اثر حضور نانو سیلیکون کارباید می‌باشد [۲۸]. این امر به دلیل تقویت و پالایش دانه در ناحیه جوش رخ می‌دهد. طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ماده تحت تغییر شکل پلاستیک شدیدی است. در این حالت دانه‌های جدیدی پدیدار می‌شوند که عاری از نابجایی‌ها می‌باشند. به این دانه‌ها که در اثر پدیده تبلور مجدد دینامیکی<sup>۱</sup> ایجاد می‌شوند، دانه‌های تبلور مجدد یافته<sup>۲</sup> گفته می‌شود. از آنجا که حرکت مرز دانه‌ها یک پدیده نفوذی است، حرارت وارده به قطعه طی فرآیند جوشکاری بر رشد دانه‌ها تاثیر دارد.

جدول ۳: آزمایش‌های طراحی شده و نتایج بدست آمده

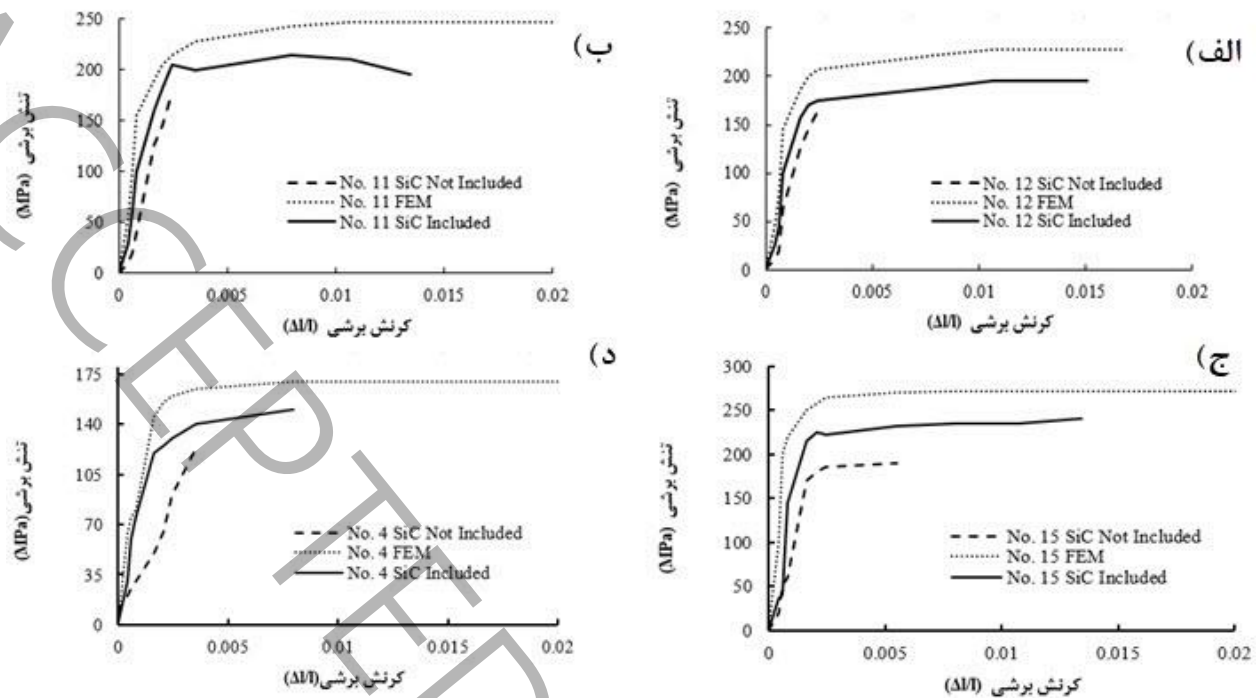
**Table 3: designed experiments and obtained results**

<sup>1</sup> Dynamic Recrystallization

<sup>2</sup> Recrystallized Grains

نتایج استحکام برشی (MPa)				آزمایش‌های طراحی شده					
حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید			عدم حضور نانو ذرات	عمق فرورفتگی	زاویه انحراف ابزار	سرعت خطی	سرعت دورانی	ردیف	نوع ابزار
اختلاف (%)	شبه سازی	تجربی	تجربی	mm	Degree	mm/min	rpm		
۱۳/۰۴	۱۹۲/۲۲	۱۶۷/۱۵	۱۳۸/۷	۰/۱	۰	۲۵	۶۳۰	۱	شکل پین مربعی
۱۳/۷۹	۱۸۱/۵۶	۱۵۶/۵۱	۱۳۰/۰۷	۰/۱	۰	۵۰	۶۳۰	۲	
۱۱/۵	۱۷۷/۲۶	۱۵۶/۸۷	۱۳۰/۱۴	۰/۳	۳	۷۵	۶۳۰	۳	
۱۱/۱۱	۱۶۸/۱۴	۱۴۹/۴۶	۱۲۳/۸۷	۰/۳	۳	۱۰۰	۶۳۰	۴	
۱۱/۵	۲۲۷/۵	۲۰۱/۳۳	۱۶۶/۶۵	۰/۳	۰	۲۵	۸۰۰	۵	
۱۱/۹۷	۲۱۵/۱۲	۱۸۹/۳۷	۱۵۶/۳۲	۰/۳	۰	۵۰	۸۰۰	۶	
۱۲/۵۱	۲۱۲/۰۹	۱۸۵/۵۶	۱۵۲/۹۵	۰/۱	۳	۷۵	۸۰۰	۷	
۱۳/۲۷	۱۹۸/۷۶	۱۷۲/۳۸	۱۴۱/۸۹	۰/۱	۳	۱۰۰	۸۰۰	۸	
۱۳/۲۲	۲۵۵/۷	۲۲۱/۹۱	۱۸۴/۲	۰/۱	۳	۲۵	۱۰۰۰	۹	
۱۳/۰۴	۲۴۸/۸۶	۲۱۶/۴۰	۱۷۹/۳۲	۰/۱	۳	۵۰	۱۰۰۰	۱۰	
۱۳/۲۷	۲۴۷/۳۵	۲۱۴/۵۳	۱۷۸/۵۵	۰/۳	۰	۷۵	۱۰۰۰	۱۱	
۱۳/۱۲	۲۲۸/۲۴	۱۹۸/۳۰	۱۶۵	۰/۳	۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۲	
۱۴/۸۹	۲۸۹/۳۱	۲۴۶/۲۲	۲۰۲/۶۵	۰/۳	۳	۲۵	۱۲۵۰	۱۳	
۱۴/۹۷	۲۷۴/۲۲	۲۳۳/۱۸	۱۹۲	۰/۳	۳	۵۰	۱۲۵۰	۱۴	
۱۴/۵۳	۲۷۱/۲۹	۲۳۱/۸۷	۱۹۰/۸۱	۰/۱	۰	۷۵	۱۲۵۰	۱۵	
۱۴/۶۸	۲۵۴/۸۲	۲۱۷/۴۳	۱۷۹/۱	۰/۱	۰	۱۰۰	۱۲۵۰	۱۶	
۱۳/۱۹	۲۰۲/۸۶	۱۷۶/۱۸	۱۴۴/۵۳	۰/۱	۰	۲۵	۶۳۰	۱۷	
۱۲/۵۱	۱۸۹/۸۵	۱۶۶/۱۰	۱۳۵/۹۲	۰/۱	۰	۵۰	۶۳۰	۱۸	
۱۲/۷۱	۱۸۹/۴۶	۱۶۵/۳۸	۱۳۵/۷۴	۰/۳	۳	۷۵	۶۳۰	۱۹	
۱۲/۲۷	۱۷۹/۴۵	۱۵۷/۴۳	۱۲۹/۰۷	۰/۳	۳	۱۰۰	۶۳۰	۲۰	
۱۳/۳	۲۴۵/۰۳	۲۱۲/۴۴	۱۷۴/۱۵	۰/۳	۰	۲۵	۸۰۰	۲۱	
۱۳/۷	۲۳۱/۲۳	۱۹۹/۴۸	۱۶۳/۲	۰/۳	۰	۵۰	۸۰۰	۲۲	
۱۴/۱۳	۲۲۸/۲۹	۱۹۶/۰۴	۱۶۰/۱۴	۰/۱	۳	۷۵	۸۰۰	۲۳	
۱۱/۱۵	۲۰۳/۷۶	۱۸۱/۰۴	۱۴۷/۹۹	۰/۱	۳	۱۰۰	۸۰۰	۲۴	
۱۱/۹۱	۲۷۱/۷۸	۲۳۹/۴۱	۱۹۳/۷۸	۰/۱	۳	۲۵	۱۰۰۰	۲۵	
۱۲/۶۸	۲۶۶/۲۹	۲۳۲/۶۱	۱۸۸/۱۱	۰/۱	۳	۵۰	۱۰۰۰	۲۶	
۱۲/۶۹	۲۶۵/۴۹	۲۳۱/۷۹	۱۸۷/۸۳	۰/۳	۰	۷۵	۱۰۰۰	۲۷	
۱۳/۳۴	۲۴۶/۴۴	۲۱۳/۵۶	۱۷۲/۸۲	۰/۳	۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۲۸	
۱۳/۲۷	۳۰۴/۹۴	۲۶۴/۴۸	۲۱۳/۲۹	۰/۳	۳	۲۵	۱۲۵۰	۲۹	
۱۳/۱۹	۲۸۷/۴۵	۲۴۹/۵۲	۲۰۱/۳۹	۰/۳	۳	۵۰	۱۲۵۰	۳۰	
۱۲/۶۸	۲۸۳/۹۸	۲۴۷/۹۸	۲۰۰/۲۶	۰/۱	۰	۷۵	۱۲۵۰	۳۱	
۱۳/۴۹	۲۶۸/۵۷	۲۳۲/۳۳	۱۸۷/۷	۰/۱	۰	۱۰۰	۱۲۵۰	۳۲	

شکل پین رزوه مخروطی



شکل ۹: نمودار تنش- کرنش برشی، الف) آزمایش ۱۲، ب) آزمایش ۱۱، ج) آزمایش ۱۵ و د) آزمایش ۴.  
**Figure 9: Shear stress-strain diagram, a) test 12, b) test 11, c) test 15 and d) test 4.**

با توجه به پژوهش‌هایی که با محوریت بررسی ساختار متالورژیکی ناحیه جوش در حضور نانو ذرات انجام شده است؛ انتظار می‌رود که پدیده‌های مشابهی در آزمایش‌های تجربی پژوهش حاضر رخ داده باشند. در عدم حضور ذرات تقویت کننده (نانو ذرات سیلیکون کارباید) در ناحیه اتصال، عامل تعیین کننده اندازه دانه‌ها میزان حرارتی است که ماده در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تجربه می‌کند. اما عوامل دیگری در اثر حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید در ناحیه اتصال بر اندازه دانه‌ها تاثیر می‌گذارند. توزیع تصادفی یا تقریباً یکنواخت عنصر افزودنی در شبکه کریستالی باعث افزایش استحکام و حد تسلیم می‌شود [۳۳]. همچنین حضور ذرات تقویت کننده علاوه بر اینکه با ایجاد اعوجاج در آرایش اتمی در شبکه کریستالی باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد، به عنوان یک عامل جوانه‌زا باعث افزایش مکان‌های مستعد جوانه‌زنی تبلور مجدد شده و طبق رابطه اثر هال-پیچ<sup>۱</sup> ریز ساختار نهایی ریزدانه‌تر می‌شود. در واقع وجود ذرات تقویت کننده مانند مانعی در مسیر حرکت مرزدانه‌ها قرار گرفته و از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کنند. ممانعت از رشد دانه به کمک ذرات تقویت کننده به اثر قفل کنندگی<sup>۲</sup> معروف است.

در طی تغییر شکل پلاستیک، دانه‌ها شکسته می‌شوند و تعداد زیادی مرزدانه کم زاویه به وجود می‌آید. چنین مرزدانه‌هایی، مکان‌های مناسبی برای جوانه زنی تبلور مجدد یافته به شمار می‌روند. در خلال تبلور دینامیکی، مرزدانه‌های کم زاویه به نوع پر زاویه تبدیل شده و جوانه‌زنی دانه‌های جدید در نواحی اصلی اتفاق می‌افتد. در این حین باتوجه به انرژی قابل توجهی که در مرزدانه‌ها ذخیره می‌شود؛ دانه‌های جدید رشد می‌کنند [۳۳]. در واقع حضور ذرات تقویت کننده در ناحیه جوش باعث شکسته شدن دانه‌های اولیه و ایجاد زمینه مستعد در رشد دانه با اندازه ریز می‌شود.

نمونه‌های قطعه‌های کشیده شده آزمایش ۳۲ (سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm، سرعت خطی ۱۰۰ mm/min، زاویه انحراف صفر درجه و عمق فرورفتگی ۰/۱ mm)، در شکل ۱۰ به همراه تصاویری از مقاطع شکست هریک، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ قسمت الف، مشخص است که در عدم حضور نانو ذرات تقویت کننده، شکست کامل باعث از کار افتادگی<sup>۳</sup> اتصال شده است. در واقع شکست به

<sup>1</sup> Hall - Petch effect

<sup>2</sup> Pinning Effect

<sup>3</sup> Fail

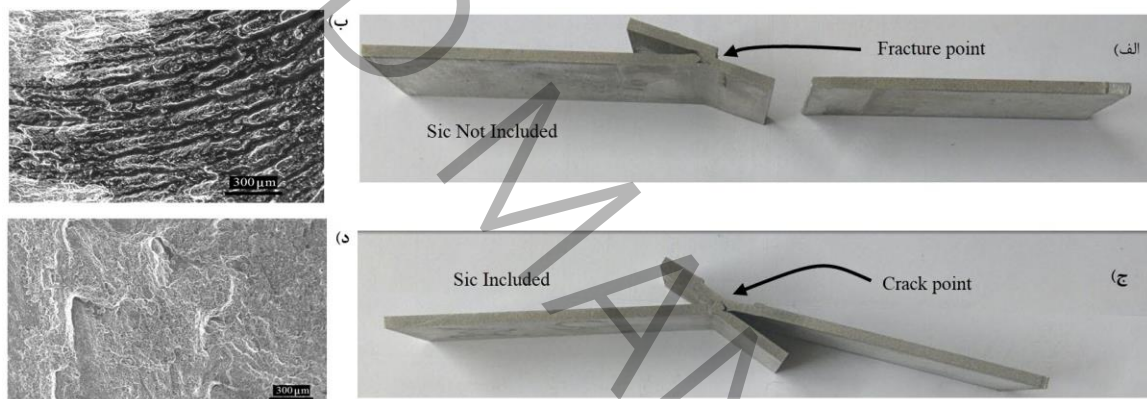
صورت شکست ناگهانی انجام شده است. شکل ۱۰-ب، رفتار ناگهانی شکست ترد نشان داده شده است. با دقت در شکل ۱۰-ب، مشخص است که کشیدگی در ساختار صورت نگرفته و شکست دانه‌ها ناگهانی بوده است.

این در صورتی است که از کار افتادگی در حضور نانو ذرات سیلیکون کاربرد به صورت رشد ترک بوده و منجر به شکست کامل در ناحیه اتصال نشده است (شکل ۱۰-ج). با دقت در شکل ۱۰-د، که مربوط به سطح شکست قطعه در حضور نانو ذرات است؛ مشخص است که از کار افتادگی قطعه ناگهانی نبوده و قطعه رفتاری یکنواخت تا مرحله شکست را داشته است.

### ۳-۵- تاثیر پارامترهای فرآیند

به منظور بررسی پارامترهای فرآیند، از داده‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۳ استفاده شده است. تحلیل پارامترها در روش تاگوچی به صورت بیشتر بهتر<sup>۱</sup> تنظیم شده است. از طرف دیگر، با دقت در نتایج جدول ۳ مشخص است که داده‌های اندازه‌گیری شده در نتایج شبیه سازی و تجربی روند یکسانی دارند؛ لذا تنها نتایج فرآیندهای تجربی در بررسی‌های آتی در نظر گرفته شده است.

در علم آمار استنباطی با بررسی نرخ سیگنال به نویز<sup>۲</sup> هر یک از پارامترها، میزان تاثیر گذاری هر یک مشخص می‌شود [۳۴، ۳۵]. با توجه به داده‌های بدست آمده مشخص شد که پارامترهای سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی ابزار، عمق فرورفتگی و زاویه انحراف ابزار به ترتیب بیشترین تاثیر را بر استحکام برشی اتصال داشته‌اند. همچنین، با دقت در نتایج جدول ۳ مشخص شد که اتصال‌های ایجاد شده با ابزار پین رزوه مخروطی، استحکام بالاتری را نسبت به اتصال‌های ایجاد شده با پین مربعی تجربه کرده‌اند. در ادامه هر پارامتر به صورت مجزا در حضور و عدم حضور نانو ذرات مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۱۰: قطعه‌های تحت کشش برشی مرتبط با آزمایش شماره ۳۲، الف) قطعه نهایی و ب) سطح شکسته شده در عدم حضور نانو ذرات، ج) قطعه نهایی و د) سطح شکسته شده در حضور نانو ذرات

**Figure 10: Sections under shear tension related to test number 32, a) final section and b) broken surface in the absence of nanoparticles, c) final section and d) broken surface in the presence of nanoparticles**

### ۳-۵-۱- سرعت دورانی ابزار

دقت در نتایج بدست آمده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی، در منطقه اتصال اغتشاش بهتر و در نتیجه خواص مواد بهینه‌تر می‌گردد. در واقع رابطه بین سرعت دورانی ابزار و استحکام برشی به صورت مستقیم است. افزایش سرعت دورانی باعث افزایش اصطکاک در ناحیه اتصال بین ابزار و قطعه کار می‌شود. این امر افزایش حرارت ورودی و در ادامه اغتشاش بهتر در ناحیه اتصال را به دنبال دارد. در واقع با افزایش سرعت دورانی مخلوط شدن ناحیه خمیری اغتشاش، بهبود یافته است. از طرف دیگر افزایش سرعت دورانی در این فرآیند باعث کاهش تنش پسماند در ناحیه اتصال می‌گردد [۳۶، ۳۷]؛ لذا با افزایش سرعت دورانی، استحکام برشی ناحیه اتصال به علت کاهش تنش‌های پسماند و اغتشاش بهتر ناحیه جوش، افزایش می‌یابد.

در حضور نانو ذرات سیلیکون کاربرد، افزایش سرعت دورانی باعث افزایش پراکندگی ذرات تقویت‌کننده در ناحیه اتصال شده و از تجمع خوشه‌ای ذرات جلوگیری می‌کند. با توجه به پراکندگی ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینوم، یک اتصال مستحکم و منسجم

<sup>1</sup> Maximum is better

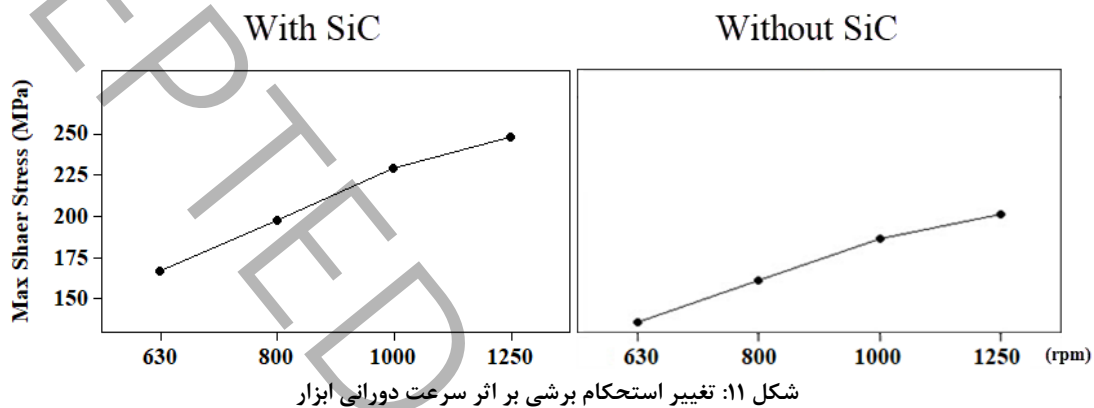
<sup>2</sup> Signal to noise ratio



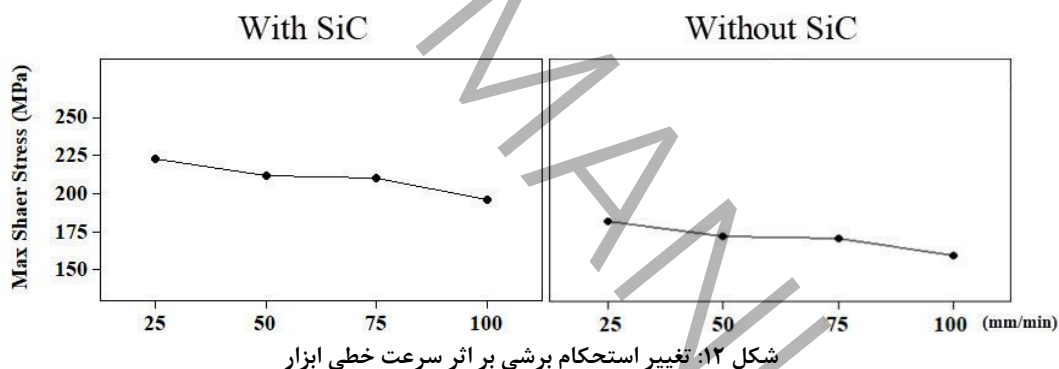
حاصل می‌شود. در واقع افزایش سرعت دورانی باعث ایجاد یک ساختار یکنواخت کامپوزیتی و در نهایت افزایش استحکام برشی شده است. علاوه بر موارد یاد شده، شایان ذکر است که در حضور ذرات تقویت کننده کاهش اندازه دانه با افزایش سرعت دورانی میسر می‌گردد [۲۸].

### ۵-۳-۲- سرعت خطی ابزار

اثر سرعت خطی ابزار بر استحکام برشی جوش حاصله در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل پیداست، افزایش سرعت خطی باعث کاهش استحکام برشی قطعه می‌گردد. با توجه به شکل ۱۲، روند تغییر به اینگونه است که با افزایش سرعت خطی ابزار استحکام برشی اتصال جوشی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱: تغییر استحکام برشی بر اثر سرعت دورانی ابزار  
Figure 11: Change of shear strength due to the rotational speed of the tool



شکل ۱۲: تغییر استحکام برشی بر اثر سرعت خطی ابزار  
Figure 12: Change of shear strength due to the linear speed of the tool

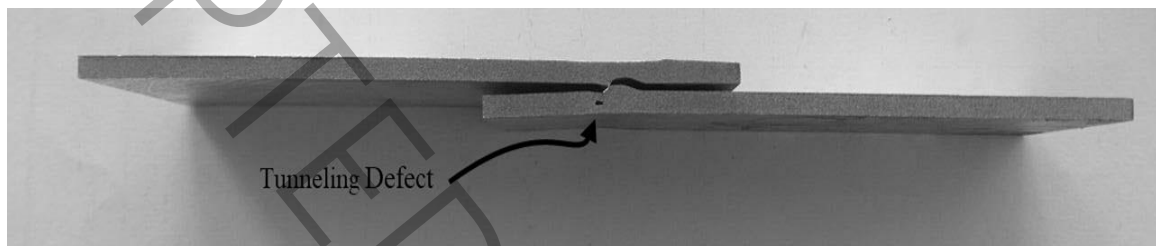
با دقت در شیب این روند مشخص است که استحکام برشی در بین سرعت خطی ۵۰ الی ۷۰ mm/min دارای حداقل تغییر است. به طوری که می‌توان گفت در این بازه تغییر خاصی نداشته است. این امر به دلیل اختلاف بسیار کم در حرارت ورودی به ناحیه جوش در بازه مذکور است. با افزایش سرعت خطی، کار مکانیکی و حرارت تولید شده در منطقه جوش کاهش می‌یابند؛ که منجر به کاهش استحکام برشی می‌شوند.

در سرعت‌های خطی پایین، به دلیل توزیع دمایی یکنواخت‌تر اتصال همگن‌تری بدست می‌آید که منجر به افزایش استحکام آن می‌گردد [۱۷]. از طرف دیگر در حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید، با کاهش سرعت خطی ابزار زمان برای همزدگی مواد بیشتر شده و پراکندگی مواد در ناحیه اغتشاش یکنواخت‌تر می‌شود. ناحیه اغتشاش یکنواخت‌تر باعث افزایش استحکام برشی ناحیه جوش شده است.

### ۵-۳-۳- عمق فرورفتگی ابزار

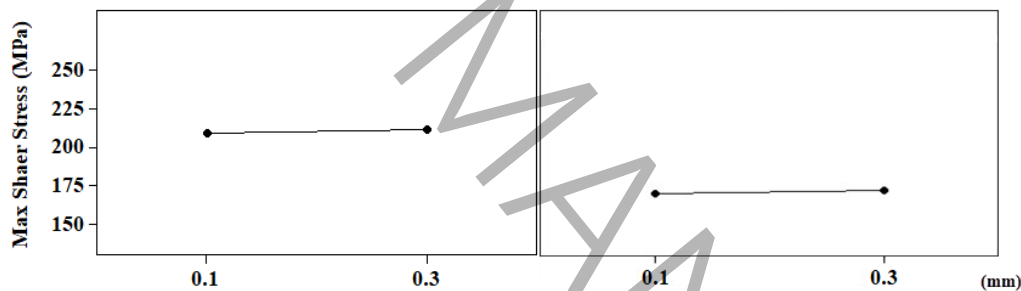
از آن جا که افزایش سرعت خطی در سرعت‌های دورانی پایین باعث ایجاد عیب تونلی و حتی تخلخل در ناحیه اغتشاش می‌شود [۱۷]، استفاده از یک نیروی عمودی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی الزامی است. حالت جوشکاری لبه روی هم که در پژوهش حاضر بررسی شده است؛ یکی دیگر از دلایل الزامی بودن نیروی عمودی کافی در حین اتصال می‌باشد. عدم اتصال مناسب و مشاهده عیب

تونلی (شکل ۱۳) در آزمایش‌های تجربی پژوهش حاضر، بررسی استفاده از نیروی عمودی به ناحیه جوش و یا استفاده از راهکاری برای جبران نیروی عمودی به منظور حصول اطمینان از اتصال عاری از عیوب را در اولویت قرار داده است. با توجه به اینکه با فرورفتگی ابزار در قطعه کار (فورجینگ ابزار)، ایجاد اتصال عاری از عیب تکنیکی حاصل می‌شود [۲۸، ۳۰]، فرورفتگی ابزار مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از فرورفتگی ابزار باعث عدم رویت عیوب تکنیکی در آزمایش‌ها شده است. از آنجا که افزایش عمق فرورفتگی ابزار باعث افزایش نیروی عمودی از سمت ابزار به قطعه کار می‌شود [۳]. افزایش عمق فرورفتگی با ایجاد یک ساختار همگن و عاری از عیب، باعث افزایش استحکام برشی اتصال شده است. مشاهده شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در نتایج اندازه‌گیری شده، افزایش عمق فرورفتگی با افزایش استحکام برشی همراه بوده است. در حضور نانو ذرات سیلیکون کاربرد افزایش عمق فرورفتگی، علاوه بر کاهش عیوب تکنیکی باعث ازدیاد عمق درگیری ابزار، نانو ذرات و قطعه کار شده و در نهایت منجر به پراکندگی بهتر نانو ذرات می‌شود.



شکل ۱۳: عدم اتصال و وجود عیب تونلی در جوشکاری بدون فرورفتگی ابزار

Figure 13: Lack of connection and presence of tunnel defect in welding without tool recess



شکل ۱۴: تغییر استحکام برشی بر اثر فرورفتگی ابزار

Figure 14: Change of shear strength due to tool recess

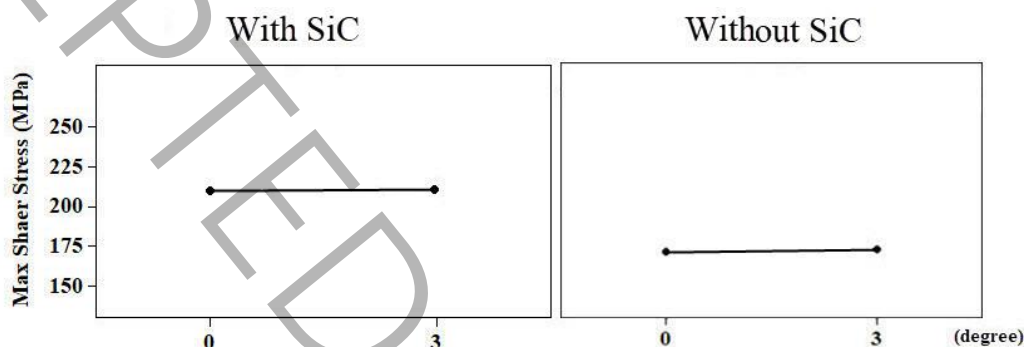
#### ۵-۳-۴- زاویه انحراف ابزار

اثر زاویه انحراف ابزار در شکل ۱۵ نشان داده شده است. دقت در نتایج این شکل نشان می‌دهد که افزایش زاویه انحراف ابزار باعث افزایش بسیار کمی در استحکام برشی ماده شده است. زاویه انحراف ابزار کمترین اثر را بر استحکام برشی قطعه جوشکاری شده دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش و یا کاهش مقدار این پارامتر تغییر قابل توجهی در مقدار استحکام برشی اتصال شده ندارد. به دلیل اینکه سطح درگیری بین ابزار و سطح قطعه کار در ناحیه اتصال و به تبع آن اصطکاک و حرارت ورودی، با تغییر زاویه انحراف، تغییر محسوسی نکرده است. لذا حرارت ورودی به ناحیه جوش، تاثیر قابل توجهی از مقدار زاویه انحراف ندارد.

#### ۵-۳-۵- شکل پین ابزار

با بررسی نتایج اندازه‌گیری شده (جدول ۳) مشخص شد که در عدم حضور نانو ذرات تقویت‌کننده، استفاده از پین با شکل رزوه مخروطی باعث افزایش ۴ الی ۵ درصدی استحکام برشی نسبت به پین مربعی شده است. دلیل این امر را می‌توان در اغتشاش موجود در ناحیه اتصال جستجو کرد [۳۸]. اغتشاش ناحیه اتصال و ادغام مواد در ناحیه مذکور ماهیت فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است [۳]. با توجه به ماهیت فرآیند مذکور، استفاده از پین رزوه مخروطی باعث افزایش اغتشاش در ناحیه اتصال شده است. در اتصال لبه روی

هم، استفاده از پین مخروطی جریان مواد در ناحیه اغتشاش را افزایش داده و مواد از صفحه پایینی به سمت صفحه بالایی جریان می‌یابند. علاوه بر این همزدگی به علت وجود رزوه روی سطح مخروطی منجر به سهولت جریان مواد در ناحیه اتصال می‌گردد. افزایش ۴ الی ۷/۵ درصدی استحکام برشی اتصال جوشی در تغییر پین از شکل مربعی به شکل رزوه مخروطی در حضور نانوذرات، اندازه گیری شده است. با توجه به اینکه، توزیع مناسب ذرات تقویت کننده در زمینه باعث کاهش مکان‌های حساس به جوانه‌زنی ترک شده که منجر به افزایش ازدیاد طول و استحکام اتصال می‌شود [۲۸]. از طرف دیگر مشخص است که حجم ذرات تقویت کننده و تجمع خوشه‌ای ذرات باعث کاهش شدید استحکام اتصال شده است [۳۹]. افزایش استحکام برشی در حضور پین رزوه مخروطی نسبت به پین مربعی به دلیل پراکندگی مناسب و ایجاد انسجام بهتر بین نانو ذرات و زمینه آلومینیومی می‌باشد. در بررسی متالورژیکی (شکل ۵) مشخص شد که نانو ذرات سیلیکون کاربرد در اتصال‌های ایجاد شده با پین رزوه مخروطی دارای پراکندگی یکنواخت‌تر و تجمع کمتر می‌باشند. همچنین افزایش جریان مواد از ورق پایینی به ورق بالایی باعث تشکیل مناسب‌تر نانو کامپوزیت شده است.



شکل ۱۵: تغییر استحکام برشی بر اثر تغییر زاویه انحراف ابزار  
Figure 15: Change of shear strength due to change of tool tilt angle

## ۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه عددی و تجربی اثر حضور نانو ذرات سیلیکون کاربرد بر استحکام برشی جوش حاصل شده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت لبه روی هم پرداخته شده است. به همین منظور یک مدل عددی سه بعدی با استفاده از روش المان محدود توسعه داده شده است. همچنین پارامترهای سرعت دورانی و خطی ابزار، عمق فرورفتگی ابزار، شکل پین و زاویه انحراف ابزار مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در ادامه دستاوردهای پژوهش حاضر ارائه شده‌اند.

- ۱) نتایج بدست آمده، نشان داد که مدل عددی ایجاد شده تطابق معنا داری با داده‌های تجربی دارد. اختلاف ۱۱ الی ۱۵ درصدی نتایج نشان داد که مدل شبیه سازی شده به روش المان محدود، توانایی تخمین و پیش‌بینی رفتار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در حضور نانوذرات را دارد.
- ۲) مشخص شد که حضور نانو ذرات سیلیکون کاربرد، به دلیل افزایش زمینه مستعد جوانه زنی و توزیع ناخالصی در ساختار کریستالی منطقه جوش باعث افزایش ۲۱ الی ۲۴ درصدی استحکام برشی ماده شده است.
- ۳) استفاده از عمق برشی در جایگزینی نیروی عمودی وارد بر ابزار منجر به حذف عیوب تکنیکی شد.
- ۴) افزایش سرعت دورانی، عمق فرورفتگی ابزار و سرعت خطی به همراه کاهش زاویه انحراف ابزار، باعث افزایش سطح درگیری بین ابزار و قطعه کار و در نتیجه منجر به افزایش توزیع نانو ذرات سیلیکون کاربرد می‌شوند.
- ۵) افزایش توزیع نانو ذرات سیلیکون کاربرد منجر به پر رنگ شدن عامل توزیع ذرات در کاهش اندازه دانه شده [۲۸] و استحکام ناحیه اتصال و ازدیاد طول آن را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، به طور کلی این روند باعث کاهش تنش پسماند ناشی از انتقال حرارت ایجاد شده در اثر جوشکاری شده [۳۰] باعث افزایش استحکام برشی می‌گردد.
- ۶) با مطالعه ساختاری اتصال جوشی در حضور نانو ذرات سیلیکون کاربرد، مشخص شد که ابزار با پین رزوه مخروطی توزیع مناسب‌تری نسبت به ابزار مربعی دارد. در واقع مناطق تجمع‌ی کوچک‌تر در اتصال‌ها با پین رزوه مخروطی مشاهده شده است.

- (۷) در بررسی نتایج مرتبط با شکل پین ابزار مشاهده شد که استفاده از پین با رزوه مخروطی به علت توزیع بهتر نانوذرات تقویت کننده، افزایش ۴ الی ۷/۵ درصدی استحکام برشی را در مقایسه با ابزار مربعی به دنبال دارد.
- (۸) استفاده از ابزار با پین رزوه مخروطی باعث سهولت جریان مواد در ناحیه اغتشاش شده است؛ این امر باعث افزایش استحکام برشی در عدم حضور نانو ذرات تقویت کننده تا ۴ الی ۵ درصد شده است.
- (۹) بیشترین استحکام برشی در اتصال مربوط به آزمایش ۲۹ اندازه گیری شده است. این آزمایش سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm، سرعت خطی ۲۵ mm/min، زاویه انحراف ۳ درجه و عمق فرورفتگی ۰/۳ mm تنظیم و با استفاده از ابزار پین رزوه مخروطی انجام شده است. استحکام برشی در حضور نانو ذرات سیلیکون کارباید برابر ۲۶۴/۴۸ MPa و در عدم حضور ذرات تقویت کننده برابر با ۲۱۳/۲۹ MPa اندازه گیری شده است.

- [1] W. Thomas, E. Nicholas, J. Needham, M. Murch, P. Templesmith, C. Dawes, GB Patent application no. 9125978.8, International patent application no. PCT/GB92/02203, (1991).
- [2] C. Dawes, Friction Stir Joining of Aluminium Alloy, *Welding Journal*, 36 (1995) 41-45.
- [3] R.S. Mishra, Z. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials science and engineering: R: reports*, 50(1-2) (2005) 1-78.
- [4] C. Rhodes, M. Mahoney, W. Bingel, R. Spurling, C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scripta materialia*, 36(1) (1997) 69-75.
- [5] G. Liu, L. Murr, C. Niou, J. McClure, F. Vega, Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scripta materialia*, 37(3) (1997) 355-361.
- [6] S. Benavides, Y. Li, L. Murr, D. Brown, J. McClure, Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum, *Scripta materialia*, 41(8) (1999) 809-815.
- [7] K. Jata, S.L. Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scripta materialia*, 43(8) (2000) 743-749.
- [8] G. Buffa, A. Ducato, L. Fratini, Numerical procedure for residual stresses prediction in friction stir welding, *Finite elements in analysis and design*, 47(4) (2011) 470-476.
- [9] 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.
- [10] Y.J. Chao, X. Qi, W. Tang, Heat transfer in friction stir welding—experimental and numerical studies, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 125(1) (2003) 138-145.
- [11] S. Mandal, J. Rice, A. Elmustafa, Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding, *Journal of materials processing technology*, 203(1-3) (2008) 411-419.
- [12] G. Buffa, L. Fratini, S. Pasta, Residual stresses in friction stir welding: numerical simulation and experimental verification, *Powder Diffraction*, 23(2) (2008) 182-182.
- [13] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, 519(1-2) (2009) 19-26.
- [14] S. Sadeghi, M.A. Najafabadi, Y. Javadi, M. Mohammadisefat, Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates, *Materials & Design* (1980-2015), 52 (2013) 870-880.
- [15] G. Buffa, L. Fratini, M. Schneider, M. Merklein, Micro and macro mechanical characterization of friction stir welded Ti-6Al-4V lap joints through experiments and numerical simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12) (2013) 2312-2322.
- [16] B. Sadeghian, M. Ataapour, A. Taherizadeh, Thermal Simulation of Friction Stir Welding in 304 Stainless Steel to 5083 Aluminum Dissimilar Joint, *Journal of Computational Methods in Engineering*, 36(2) (2022) 101-117 (In Persian).
- [17] B. Mohammadi Landi, H. Kavooosi Balutaki, I. Golshokouh, M. Goudarzi Khoigani, Investigating the effect of friction stir welding parameters on the mechanical and metallurgical properties of the weld zone Aluminum-based composite materials, *Research in engineering sciences and nanomaterials*, 1(3) (2022) 46-55 (In Persian).
- [18] M. Ellis, Joining of aluminium based metal matrix composites, *International Materials Reviews*, 41(2) (1996) 41-58.
- [19] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, F. Tarterini, Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p composite, *Composites science and technology*, 67(3-4) (2007) 605-615.
- [20] G.-F. Zhang, S. Wei, J. Zhang, Z.-X. Wei, J.-X. Zhang, Effects of shoulder on interfacial bonding during friction stir lap welding of aluminum thin sheets using tool without pin, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(12) (2010) 2223-2228.
- [21] A. Byung-Wook, C. Don-Hyun, K. Yong-Hwan, J. Seung-Boo, Fabrication of SiCp/AA5083 composite via friction stir welding, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (2012) s634-s638.

- [22] M. Bahrami, M.K.B. Givi, K. Dehghani, N. Parvin, On the role of pin geometry in microstructure and mechanical properties of AA7075/SiC nano-composite fabricated by friction stir welding technique, *Materials & Design*, 53 (2014) 519-527.
- [23] M. Bahrami, K. Dehghani, M.K.B. Givi, A novel approach to develop aluminum matrix nano-composite employing friction stir welding technique, *Materials & Design*, 53 (2014) 217-225.
- [24] M. Bahrami, N. Helmi, K. Dehghani, M.K.B. Givi, Exploring the effects of SiC reinforcement incorporation on mechanical properties of friction stir welded 7075 aluminum alloy: fatigue life, impact energy, tensile strength, *Materials Science and Engineering: A*, 595 (2014) 173-178.
- [25] H. Samarikhalaj, A. Nikbakht, M. Sadighi, S. Sheikhan, Investigating the Shear Strength of Friction Stir Lap Welded 7075 Aluminum Alloy, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(4) (2018) 863-874 (In Persian).
- [26] A. Rabieezadeh, A. Afsari, Effect of nanoparticles addition on dissimilar joining of aluminum alloys by friction stir welding, *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, 4(2) (2019) 23-34 (In Persian).
- [27] S. Suresh, K. Venkatesan, E. Natarajan, S. Rajesh, Performance analysis of nano silicon carbide reinforced swept friction stir spot weld joint in AA6061-T6 alloy, *Silicon*, 13(10) (2021) 3399-3412.
- [28] M. Bahrami, An investigation the effect of SiC particles on mechanical properties in friction stir butt joint AA7075, *Amirkabir University, Iran*, 2012 (In Persian).
- [29] M. Miles, T. Nelson, B. Decker, Formability and strength of friction-stir-welded aluminum sheets, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35 (2004) 3461-3468.
- [30] S. Sadeghi, An investigation on residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates with ultrasonic waves, *Amirkabir University Iran*, 2013 (In Persian).
- [31] S. Babu, G.J. Ram, P. Venkitakrishnan, G.M. Reddy, K.P. Rao, Microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum alloy AA2014, *Journal of Materials Science & Technology*, 28(5) (2012) 414-426.
- [32] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, A continuum based fem model for friction stir welding—model development, *Materials Science and Engineering: A*, 419(1-2) (2006) 389-396.
- [33] H. Toyserkani, Structure, Properties and Materials Engineering, in: *Principles of Materials Science (Structure, Properties and Materials Engineering)*, Isfahan University of Technology Press, Iran, 2008, pp. 233- 342 (In Persian).
- [34] R.K. Roy, Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, *John Wiley & Sons*, 2001.
- [35] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, *John Wiley & Sons*, 2017.
- [36] K. Deplus, A. Simar, W.V. Haver, B.d. Meester, Residual stresses in aluminium alloy friction stir welds, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56 (2011) 493-504.
- [37] J. Zapata, M. Toro, D. López, Residual stresses in friction stir dissimilar welding of aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 229 (2016) 121-127.
- [38] A.K. Kadian, P. Biswas, Effect of tool pin profile on the material flow characteristics of AA6061, *Journal of Manufacturing Processes*, 26 (2017) 382-392.
- [39] K.S.A. Kumar, S.M. Murigendrappa, H. Kumar, Experimental investigation on effects of varying volume fractions of SiC nanoparticle reinforcement on microstructure and mechanical properties in friction-stir-welded dissimilar joints of AA2024-T351 and AA7075-T651, *Journal of Materials Research*, 34(7) (2019) 1229-1247.

# Investigating the Effect of SiC Nanoparticles on the Shear Strength of Friction Stir Lap Welded 7075 Aluminum Alloy

Hojjat Samarikhalaj<sup>a</sup>, Ali Nikbakht<sup>b1</sup>, Mojtaba Sadighi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>b</sup> New Technologies Research Center (NTRC), Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

## ABSTRACT

In this paper, the effect of including Silicon Carbide nanoparticles in the weld zone on the maximum shear strength of friction stir lap welded 7075 aluminum alloy is investigated, both experimentally and numerically. This objective is carried out by studying the effects of rotational and transverse speeds, tilt angle, the shape of the tool and the penetration depth. The numerical investigation is based on developing an FE model by means of Deform and ABAQUS to simulate the welding procedure, which results are verified by the experimental findings. Experimental procedure is designed based on Taguchi method. The verification of the developed FE model shows that the simulation results are in proper agreement with the experimental findings. In general, including Silicon Carbide nanoparticles in the weld zone can increase the maximum shear strength up to 24%, compared to the case of where the specimens are welded without Silicon Carbide. Furthermore, applying the threaded tapered tool leads to higher shear strength in comparison with the squared shape tool, i.e., the strength of the specimens welded by threaded tapered tool are 4 to 5% higher without Silicon Carbide inclusion and 4 to 7.5% higher with Silicon Carbide, compared to the same case welded by squared tool. In addition, while the rotational speed has the highest influence on the findings, the tilt angle does not affect the results that much.

## KEYWORDS

Friction stir welding, 7075 aluminum alloy, Finite element modeling, Silicon Carbide nanoparticles, Taguchi method.

---

<sup>1</sup> Corresponding Author: Email: anikbakht@aut.ac.ir