E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 12, Number 1, 2026



A novel approach to enhance the joints performance of AA1100 joints fabricated by friction stir welding (FSW)

M. Taheri[1] ,Gh. Azimiroeen[2*]

1-Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2-Center of Engineering and Technical Skills Training, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Received 10 April 2026 ; Accepted 2 June 2026

Abstract

In this study, the effect of an additional pass using a pinless tool on the microstructure and mechanical properties of friction stir welding (FSW) AA1100 butt joints was investigated. The microstructure was characterized using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM), while the mechanical properties were evaluated by tensile and Vickers microhardness tests. The results indicated that applying additional passes led to grain refinement of the microstructure and a reduction in grain size to approximately 1 µm in the stir zone. Moreover, the microhardness in the upper stir zone increased from about 30 HV in the initial joint to nearly 55 HV in the processed sample. Tensile test results also revealed an improvement in mechanical properties, with the ultimate tensile strength (UTS) increasing from 86 MPa to 101 MPa, corresponding to an enhancement of approximately 17%. This improvement was mainly attributed to grain refinement and the increased grain boundary density.

Keywords: Al alloy, Friction Stir Process, Microstructure, Mechanical properties.

*Corresponding Author: Gh. Azimiroeen, azimi_gh@iut.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



رویکردی نوین برای افزایش عملکرد اتصالات آلیاژ آلومینیوم سری 1100 ایجاد شده توسط جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW)

مهدی طاهری[1]، قاسم عظیمی رویین[2*]

1- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران.

2- مرکز آموزش مهارت‌های فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران

دریافت مقاله: 1405/01/21 ؛ پذیرش مقاله: 1405/03/12

چکیده

در این پژوهش، تأثیر اعمال پاس اضافی توسط ابزار بدون پین بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب‌به‌لب آلومینیوم 1100 تولیدشده به روش جوشکاری همزن اصطکاکی بررسی شد. ارزیابی ریزساختار با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و خواص مکانیکی با آزمون کشش و ریزسختی ویکرز انجام گرفت. نتایج نشان داد که اعمال پاس اضافی موجب ریزدانه شدن ساختار و کاهش اندازه دانه‌ها تا حدود 1 میکرومتر در ناحیه همزده می‌شود. همچنین، مقدار ریزسختی در ناحیه همزده بالایی از حدود 30 به 55 ویکرز افزایش یافت. آزمون کشش نیز بهبود خواص مکانیکی را نشان داد؛ به طوریکه استحکام کششی نهایی از 86 به 101 مگاپاسکال افزایش یافت که معادل بهبود حدود 17 درصدی است. این بهبود به ریزدانه شدن ساختار و افزایش تعداد مرزدانه‌ها نسبت داده می‌شود.

کلمات کلیدی: آلیاژ آلومینیوم، فرایند همزن اصطکاکی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: قاسم عظیمی رویین، azimi_gh@iut.ac.ir.

1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم سری 1xxx به دلیل ویژگی‌هایی همچون چگالی کم، سهولت در ساخت، شکل‌پذیری عالی و هدایت الکتریکی بالا، در بسیاری از صنایع مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [1]. این آلیاژها به طور فزاینده‌ای در صنایع گوناگون از جمله خودروسازی کاربرد دارند [2]. نسبت بالای استحکام به وزن، استحکام کششی مناسب، خواص مکانیکی مطلوب و مقاومت به خوردگی، آلیاژهای آلومینیوم را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در سازه‌های مهندسی بدل کرده‌است. با این حال، چالش‌های مرتبط با جوشکاری این آلیاژها، به‌ویژه در اتصالات غیرهمجنس، موجب محدودیت در کاربرد آن‌ها شده‌است. جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم به علت تفاوت در خواص مکانیکی، فیزیکی و دمای ذوب آن‌ها با دیگر فلزات، فرایندی دشوار و چالش‌برانگیز است. ایجاد چنین اتصالاتی می‌تواند مزایایی از قبیل کاهش آلایندگی محیط زیست، کاهش هزینه، انعطاف‌پذیری طراحی و کاهش وزن سازه به همراه داشته باشد. با این وجود، نرخ سریع گرمایش و سرمایش در حین جوشکاری ذوبی ممکن است منجر به بروز نقص‌هایی نظیر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

تخلخل و حفره در جوش شود. در برخی موارد نیز نیاز به استفاده از روش‌های پرهزینه برای محافظت از حوضچه مذاب وجود دارد که موجب افزایش هزینه‌های فرایند می‌گردد. از این‌رو، جوشکاری در حالت جامد می‌تواند به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم مطرح شود [3-5].

یکی از روش‌های اتصال در حالت جامد، جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) است که در سال 1991 توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان معرفی شد. این روش به علت ایجاد اتصال با عیب کمتر، پیچیدگی پایین و کیفیت اتصال بالا، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، با استقبال زیادی مواجه شده‌است [3،6و7]. فرایند همزن اصطکاکی (FSP)، با بهره‌گیری از تغییر شکل پلاستیک آنی، منجر به ریزدانه‌سازی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود. یکی از پیشرفت‌های جدید در این حوزه، فرایند همزن اصطکاکی بدون پین (PFSP) است. این روش با حذف پین، نقص‌های ناشی از حفره کلیدی را از بین برده و عملکرد بهتری در جوشکاری و بهبود سطح مواد نشان داده‌است. استفاده از این روش در بهبود خواصی نظیر سختی، استحکام کششی، مقاومت به خستگی، سایش و خوردگی، همچنین اصلاح ریزساختار سطحی و یکنواختی ترکیب، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌است [8-10]. شانگ و همکاران [11]، اثر پاس اضافی فرایند همزن اصطکاکی بدون پین را بر روی اتصال آلیاژ منیزیم که با روش جوشکاری همزن اصطکاکی ایجاد شده بود، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پاس اضافی FSP منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود که این بهبود ناشی از ریزدانه شدن ساختار به واسطه پدیده دوقلویی است. همچنین آن‌ها گزارش کردند که سختی ناحیه تحت تاثیر ابزار بدون پین در اتصالاتی که تحت FSP اضافی قرار گرفته‌اند، به دلیل ریزدانه شدن بیشتر، به‌طور محسوسی بالاتر از سختی اتصالات معمولی حاصل از FSW است.

سن و همکاران [12]، اتصال ورق نازک آلومینیومی AA6061-T6 به ضخامت 0/8 میلی‌متر را با ابزار بدون پین به روش FSW بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، بهترین خواص مکانیکی در سرعت چرخش 3000 دور بر دقیقه و سرعت جوشکاری 100 میلی‌متر بر دقیقه حاصل می‌شود. در این شرایط، استحکام برشی اتصال 230 مگاپاسکال و ریزسختی 92 ویکرز (HV) گزارش شد. نتایج نشان داد که ابزار بدون پین می‌تواند اتصال‌هایی با خواص مکانیکی مطلوب و حداقل عیوب سطحی ایجاد کند. ژانگ و همکاران [13]، به بررسی اصلاح سطحی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از فرایند همزن اصطکاکی با ابزار بدون پین پرداختند. نتایج نشان داد که با اعمال این فرایند، ساختار سطحی آلیاژ به‌طور قابل توجهی ریزدانه شده و ذرات فاز دوم به‌خوبی پراکنده شده‌اند. در سرعت چرخش 1000 دور بر دقیقه، خواص مکانیکی بهینه حاصل شد؛ به‌طوری که استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی به‌ترتیب 35 و 30 درصد افزایش یافتند و میزان ازدیاد طول تا شکست به 22 درصد رسید. همچنین مقاومت به خوردگی لایه اصلاح‌شده به‌شکل چشمگیری بهبود یافته است.

با این وجود به دلیل نو پا بودن این ایده، یعنی استفاده از پاس اضافی با ابزاز بدون پین، تحقیقات بسیار کمی در این زمینه به ویژه در مورد تاثیر آن برروی اتصالات جوشی چه ذوبی و چه غیرذوبی وجود دارد. همچنین تا جایی‌که ارائه کنندگان این پژوهش اطلاع دارند گزارشی در زمینه تاثیر استفاده از پاس اضافی با ابزاز بدون پین برروی اتصالات آلیاژ آلومینیوم سری 1100، به عنوان یک آلیاژ عمومی و پرکاربرد در صنعت، وجود ندارد. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر پاس اضافی توسط ابزار بدون پین به عنوان یک رویکرد نوین، بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب‌به‌لب ورق‌های آلومینیوم سری 1100 ایجاد شده توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) است.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش ورق‌های آلیاژ آلومینیوم سری 1100 تولیدی شرکت آلومینیوم اراک به ضخامت 5 میلی‌متر با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول (1) به عنوان فلزپایه مورد استفاده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

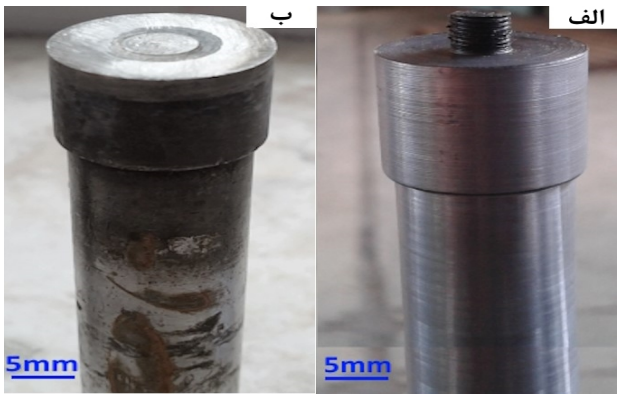
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

قرار گرفتند. برای ایجاد اتصال ورق‌ها قبل از استفاده با ابعاد مشخص $210\times75\ mm^2$ بریده شدند. به منظور بررسی اثر پاس اضافی توسط ابزار بدون پین، دو نوع نمونه جوشکاری شده، آماده گردید.

جدول 1- ترکیب شیمیایی ورق آلیاژ آلومینیوم 1100 اولیه (درصد وزنی).

عنصر	Al	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
آلیاژ آلومینیوم 1100 اولیه	پایه	0/0097	0/004	0/002	0/006	0/012	0/27	0/206

نمونه‌های نوع اول شامل ورق‌هایی بودند که به صورت لب‌به‌لب توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال داده شدند. در این فرایند، از یک پین استوانه‌ای (شکل 1-الف) ساخته شده از فولاد H13 استفاده شد که ویژگی‌های ابعادی آن در جدول (2) آورده شده‌است. نمونه‌های نوع دوم پس از انجام فرایند FSW و ایجاد اتصال، با یک پاس اضافی تحت FSP قرار گرفتند. این پاس اضافی با استفاده از ابزاری بدون پین (شکل 1-ب) با عمق فرورفتگی 0/9 میلی‌متر و ویژگی‌های ابعادی مندرج در جدول (2)، انجام گرفت.



شکل 1- پین‌های استفاده شده در
الف- جوشکاری همزن اصطکاکی و ب- فرایند همزن اصطکاکی.

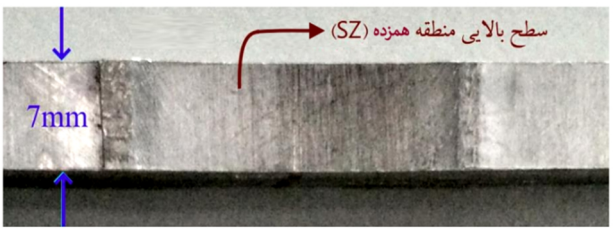
در این پژوهش، برای ارزیابی ریزساختاری مقاطع عرضی اتصالات، نمونه‌هایی با استفاده از دستگاه برش سیم داغ تهیه شدند. نمونه‌ها به‌صورت متوالی با سنباده‌های شماره 320 تا 5000 صیقل داده شدند و سپس با محلول ذرات معلق آلومینای 0/3 میکرومتر در آب مقطر، برای دستیابی به سطحی براق و عاری از خط و خش جلا داده شدند. در نهایت، نمونه‌ها به مدت 18 تا 20 ثانیه با دو محلول ترکیبی حکاکی شدند که شامل ترکیبات زیر است:

- محلول اول: 1 میلی‌لیتر H_2O، 6 میلی‌لیتر HNO_3، 1 میلی‌لیتر HF
- محلول دوم: 12 میلی‌لیتر HF، 25 میلی‌لیتر HNO_3، 1 گرم H_2CrO_4، 10 میلی‌لیتر H_2O

جدول 2- ویژگی‌های ابعادی پین‌ها و متغیرهای فرایندهای FSW و FSP.

مشخصات	متغیرها	FSW	FSP
ابزار	قطر شانه (mm)	10	10
	قطر پین (mm)	5	-
	ارتفاع پین (mm)	4	-
	عمق رزوه‌ها (mm)	0/5	-
	زاویه رزوه‌ها (°)	30	-
فرایند	زاویه پیشروی (°)	3	3
	سرعت چرخشی (rpm)	280	1400
	سرعت پیشروی (mm/min)	20	40
	تعداد پاس	1	1

برای بررسی ریزساختار اتصالات، از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. جهت بررسی اثر پاس اضافی FSP بر خواص مکانیکی اتصالات، نمونه‌ها در جهت طولی و به طول 20 میلی‌متر بر اساس استاندارد ISO 6892-1 ماشین‌کاری شدند.



شکل 2- نمونه آزمایش توموگرافی اشعه ایکس.

آزمون استحکام کششی اتصالات با نرخ کرنش 0/001 بر ثانیه انجام گرفت و برای هر نمونه، سه بار تکرار شد. علاوه بر این، آزمون ریزسختی اتصالات به منظور بررسی میزان سختی در سطح مقطع هم در راستای طول و هم در راستای عرض با استفاده از سختی‌سنج ویکرز، با بار 200 گرم‌نیرو (gf) و زمان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

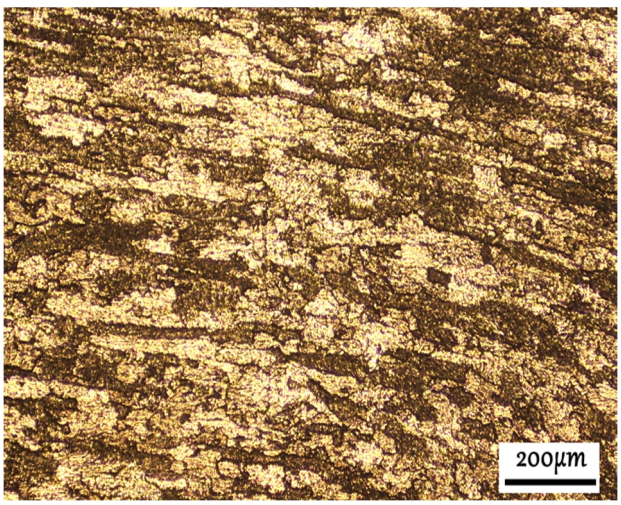
نشست 10 ثانیه انجام شد. همچنین از توموگرافی اشعه ایکس مدل 3-D Microtomograph Nanoton 180 ساخت کشور آلمان جهت کنترل کیفیت و بررسی عیوب موجود در منطقه اتصال استفاده شد. در شکل (2)، تصویری از نمونه تهیه شده جهت توموگرافی اشعه ایکس ارائه شده‌است.

3- نتایج و بحث

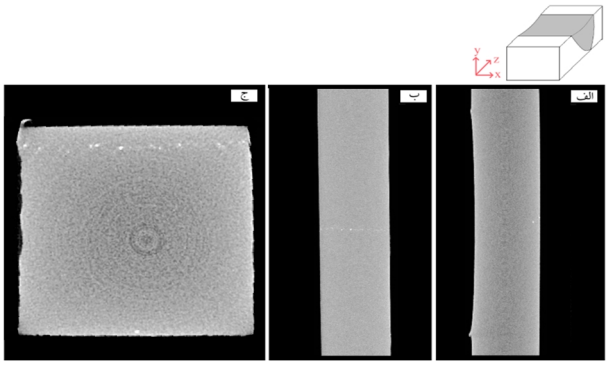
3-1- بررسی ساختار اتصالات

شکل (3)، تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار آلیاژ AA1100 را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، این آلیاژ، یک آلیاژ کارشده با مورفولوژی دانه‌های کشیده در جهت نورد می‌باشد.

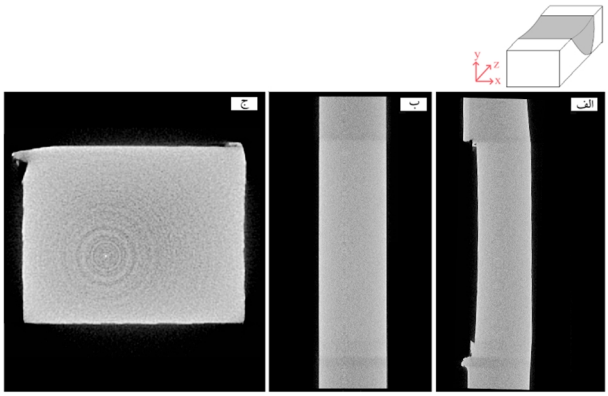
در شکل‌های (4) و (5)، به ترتیب توموگرافی اشعه ایکس اتصال اولیه و اتصال فرآوری‌شده با پاس اضافی توسط ابزار بدون پین، در سه جهت x، y و z ارائه شده‌است. تصاویر حاصل از آنالیز توموگرافی اشعه ایکس در سه جهت نشان می‌دهد که هر دو اتصال اولیه و فرآوری‌شده سالم و بدون عیب می‌باشند. از آنجاییکه بررسی و تفسیر عیوب فقط با آنالیز دو بعدی ممکن است گمراه کننده باشد، لذا از آنالیز توموگرافی اشعه ایکس سه بعدی نیز برای بررسی اتصالات استفاده شده که نتایج آن در شکل (6) ارائه شده‌است. همانطور که در شکل (6- الف و ب) مشاهده می‌شود آنالیز سه بعدی هم، سالم و بدون عیب بودن هر دو اتصال را تایید می‌کند.



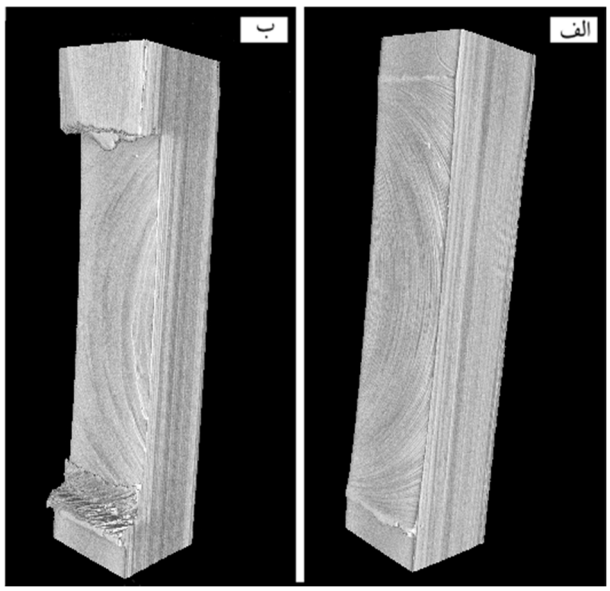
شکل3- ریزساختار فلز پایه (AA1100).



شکل 4- آنالیز توموگرافی اشعه ایکس برای اتصال ایجاد شده با فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی در سه جهت x، y و z.



شکل 5- آنالیز توموگرافی اشعه ایکس برای اتصال فرآوری‌شده با پاس اضافی توسط ابزار بدون پین در سه جهت x، y و z.



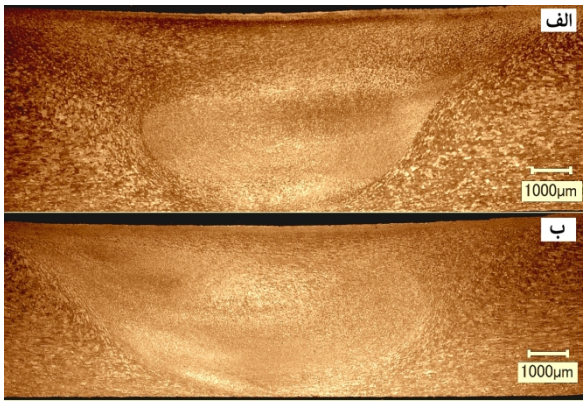
شکل 6- آنالیز توموگرافی اشعه ایکس سه بعدی برای، الف- اتصال اولیه و ب- اتصال فرآوری شده.

شکل‌های (7-الف) و (7-ب)، بترتیب تصاویر میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی پایین از سطح مقطع عرضی اتصالات اولیه و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

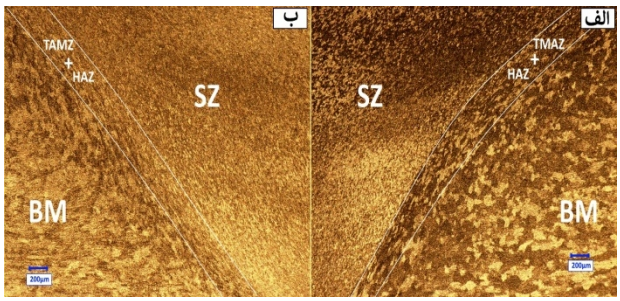
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

فرآوری شده را نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در سرعت چرخشی 1400rpm و سرعت انتقالی 40mm/min یک ناحیهٔ همزده عاری از هرگونه عیب و تخلخلی برای هر دو نمونه بدست آمده‌است. ناحیه همزده در هر دو نمونه به وضوح از فلز پایه قابل تشخیص است. همانطور که در بالا ذکر شد، فلز پایه نمونه نورد شده شامل دانه‌های کشیده‌است (شکل 3). با این حال، ناحیه همزده هر دو نمونه از دانه‌های بسیار ریز تشکیل شده‌اند. این تصاویر هم تایید کننده نتایج حاصل از توموگرافی اشعه ایکس می‌باشند (بدون عیب بودن اتصال) و از طرفی هم می‌توان بیان کرد که ابزار و پارامترهای جوشکاری به درستی انتخاب شده‌اند. با مقایسه تصاویر الف و ب در این شکل (شکل 7) به نظر می‌رسد که در نمونه فرآوری شده به ویژه در مناطق نزدیک به سطح ساختار ریزدانه‌تر شده‌است. شکل‌های (8-الف) و (8-ب) نیز تصاویر میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی بالا از سطح مقطع عرضی اتصالات اولیه و فرآوری شده را نمایش می‌دهند که نواحی مختلف جوشکاری در آن‌ها به‌طور واضح قابل رویت هستند: ناحیه همزده (SZ)، ناحیه متأثر از حرارت(HAZ)، ناحیه ترمومکانیکی (TMAZ) و فلزپایه (BM).



شکل 7- تصاویر میکروسکوپی نوری (بزرگنمایی پایین) از سطح مقطع عرضی اتصالات الف-اولیه و ب- فرآوری شده.

ناحیه SZ که در مرکز اتصال قرار دارد، تحت بیشترین میزان حرارت و تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد. این شرایط موجب وقوع تبلور مجدد دینامیکی در این ناحیه شده و در نتیجه دانه‌های ریز و هم‌محوری شکل می‌گیرند که اندازه متوسط آن‌ها نسبت به BM کاهش چشمگیری دارد.



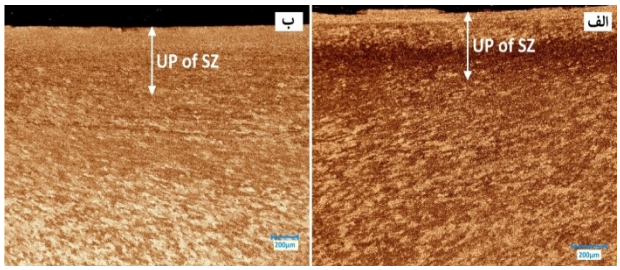
شکل 8- تصاویر میکروسکوپی نوری (بزرگنمایی بالا) از سطح مقطع عرضی اتصالات الف- اولیه و ب- فرآوری شده.

ناحیه TMAZ که مجاور ناحیه SZ است، تحت تغییر شکل پلاستیک متوسط و دماهای کمتر قرار دارد؛ بنابراین، تبلورمجدد در این ناحیه به صورت ناقص و جزئی صورت می‌گیرد. در این ناحیه دانه‌ها کشیده‌تر و درشت‌تر از SZ بوده و پدیده بازیابی دینامیکی غالب است که مانع تبلور کامل می‌شود. در ناحیه HAZ، تغییر شکل پلاستیک تقریباً رخ نمی‌دهد و تغییرات ریزساختاری عمدتاً ناشی از تأثیر گرمای ورودی است که منجر به رشد دانه‌ها می‌شود. این افزایش اندازه دانه در HAZ می‌تواند اثر منفی بر خواص مکانیکی اتصال داشته باشد [14-17]. پاس اضافی در فرایند FSP با ابزار بدون پین تأثیر قابل‌توجهی بر ریزساختار ناحیه فرآوری‌شده دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بازیابی دینامیکی مکانیزم غالب در فرایند ریزدانه‌سازی طی FSP است؛ زیرا ناحیه فرآوری‌شده تحت تأثیر نرخ کرنش بالا و دماهای اوج قرار می‌گیرد. در این شرایط، اجرای پاس‌های اضافی با اعمال مکرر حرارت و کرنش، موجب تحریک پی‌درپی فرایند تبلور مجدد دینامیکی شده و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌ها و بهبود یکنواختی ریزساختار را به همراه دارد [18و19].

مطابق شکل‌های (9-الف) و (9-ب)، تصاویر میکروسکوپی نوری ارائه‌شده، ساختار اتصال فرآوری‌شده در تمامی نواحی نسبت به اتصال اولیه دارای دانه‌های ریزتری است. ناحیه همزده در این اتصال به دو بخش همزده بالایی (UZ) و همزده پایینی (LZ) تقسیم می‌شود. در مقایسه با اتصال اولیه، ریزدانه بودن اتصال فرآوری‌شده در ناحیه UZ به وضوح قابل مشاهده است که نشان‌دهنده وقوع تغییر پلاستیک شدید و تبلور مجدد

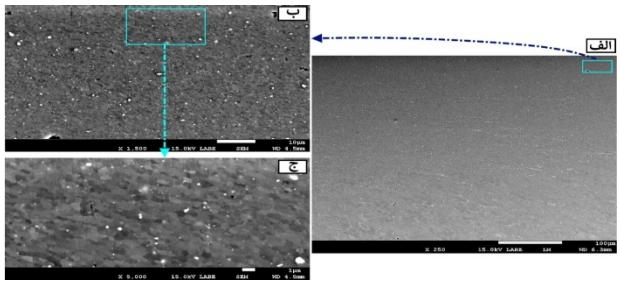
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

دینامیکی کامل در این ناحیه می‌باشد.



شکل 9- مقایسه‌ای بین نواحی SZ در اتصالات الف- اولیه و ب- فرآوری شده.

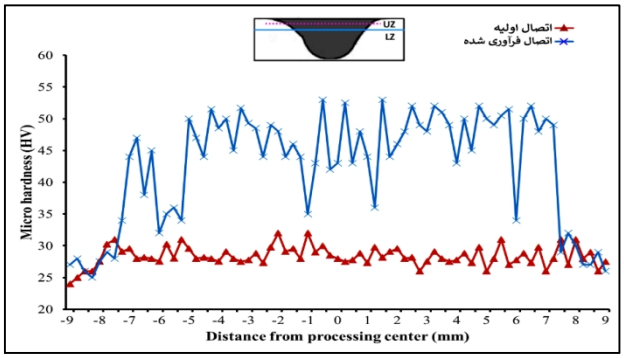
شکل (10)، تصاویر SEM از سطح مقطع اتصال فرآوری‌شده را در بزرگنمایی‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه دانه‌ها در ناحیه UZ اتصال فرآوری‌شده به حدود 1 میکرومتر کاهش یافته و نسبت به اتصال اولیه به‌طور قابل‌توجهی ریزتر شده‌اند. این ریزدانه‌شدن نتیجه تأثیر فرایند FSPبدون پین و وقوع مکانیزم تبلورمجدد دینامیکی در ناحیه فرآوری‌شده است. در واقع چرخش ابزار بدون پین برروی سطح و ورود جزئی آن به سطح باعث حرارت اصطکاکی و تغییرشکل پلاستیکی موضعی شدید می‌شود.



شکل 10- تصاویر SEM (با بزرگنمایی‌های متفاوت) از سطح مقطع اتصال فرآوری شده.

3-2- خواص مکانیکی اتصالات

شکل‌های (11) و (12)، به ترتیب نتایج آزمون ریزسختی ویکرز را به‌عنوان تابعی از فاصله از مرکز جوش در اتصالات اولیه و فرآوری‌شده در نواحی UZ و LZ نشان می‌دهند. برای مقایسه قابل ذکر است که میانگین سختی مربوط به زمینه آلومینیومی استفاده شده در این تحقیق HV 21 می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است ایجاد جوش توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی باعث افزایش سختی در اتصال می‌شود. مطابق با تصاویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی اتصالات اولیه و فرآوری‌شده در شکل (8)، ساختار نواحی SZ، TMAZ وHAZ در اتصال فرآوری‌شده نسبت به اتصال اولیه ریزدانه‌تر است. فرایند FSP با ابزار بدون پین منجر به ایجاد



شکل 11- توزیع ریزسختی ویکرز به‌عنوان تابعی از فاصله، برای مقایسه دو اتصال اولیه و فرآوری‌شده در ناحیه UZ.

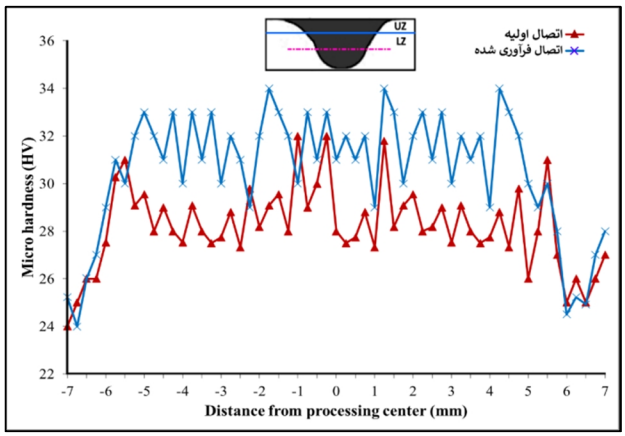
تغییر شکل پلاستیک شدید و کارسختی در سطح اتصال می‌شود که این امر باعث وقوع تبلورمجدد دینامیکی و در نتیجه ریزدانه شدن ساختار به ویژه در نواحی نزدیک به سطح می‌گردد. ریزدانه شدن موجب افزایش کسر حجمی مرزدانه‌ها شده و این افزایش، مانع حرکت نابجایی‌ها شده و تنش اصطکاک شبکه‌ای را بالا می‌برد؛ در نتیجه، سختی ماده افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در نواحی TMAZ و HAZ نیز به دلیل وقوع تبلورمجدد جزئی، ساختار نسبت به فلز پایه ریزدانه‌تر شده و سختی در این نواحی نسبت به BM افزایش می‌یابد، گرچه مقدار سختی آن‌ها هنوز کمتر از ناحیه SZ است که شدیدترین تغییر شکل را تجربه کرده‌است [20و21]. همچنین با مشاهده نمودارها در شکل‌های (11) و (12) دیده می‌شود که در نمونه فرآوری شده، سختی در ناحیه UZ نسبت به ناحیه LZ افزایش چشمگیری داشته‌است که برای بررسی دقیق‌تر، میزان سختی از پایین درز اتصال تا سطح اتصال (در وسط منطقه همزده) اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (13) ارائه شده‌است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، از ابتدای مسیر اندازه‌گیری (قسمت تحتانی درز اتصال) تا مرز بین نواحی UZ و LZ، مقادیر سختی در هر دو نمونه تقریباً مشابه بوده و در محدوده 28 تا 33 واحد ویکرز باقی می‌ماند. با این حال، در ناحیه UZ،

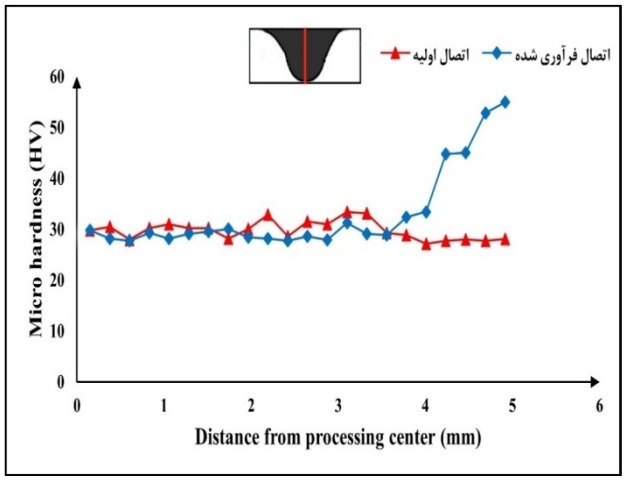
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

اتصال فرآوری‌شده به‌دلیل ریزدانه‌تر شدن ساختار ناشی از فرایند FSP، روند افزایشی قابل توجهی در مقدار سختی از پایین به بالا نشان می‌دهد و مقدار سختی تا 55 واحد ویکرز افزایش می‌یابد. این در حالی است که اتصال اولیه در همین ناحیه تغییر محسوسی در مقدار سختی ندارد و تقریباً مقدار ثابتی را حفظ کرده‌است. می‌توان نتیجه گرفت که کار سطحی انجام شده بر روی درز اتصال موجب افزایش قابل توجه سختی در سطح و نواحی نزدیک به سطح شده‌است.



شکل 12- توزیع ریزسختی ویکرز به‌عنوان تابعی از فاصله، برای مقایسه دو اتصال اولیه و فرآوری‌شده در ناحیهLZ.



شکل 13- توزیع ریزسختی ویکرز به‌عنوان تابعی از فاصله، از پایین به بالا دو اتصال اولیه و فراوری شده.

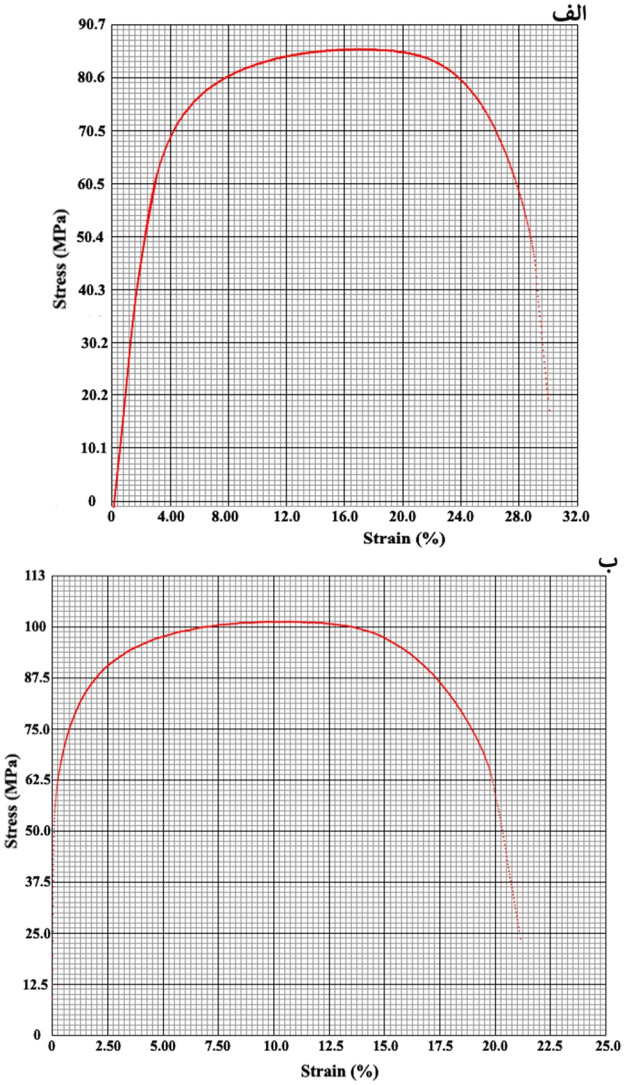
شکل‌های (14-الف) و (14-ب)، به ترتیب منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به اتصالات اولیه و فرآوری‌شده را نمایش می‌دهند. همانطور که در شکل دیده می‌شود اتصال فرآوری شده دارای استحکام نهایی 101 مگاپاسکال می‌باشد که از استحکام اتصال اولیه (86 مگاپاسکال)، بالاتر است. جالب است این نکته ذکر شود که منحنی تنش-کرنش مهندسی اتصال فرآوری شده نشان می‌دهد که این اتصال انعطاف‌پذیری خوبی هم از خود نشان داده‌است (کرنش شکست بیش از 21/1 درصد). این عقیده وجود دارد که این امر به بهبود ساختار مرتبط است.

در حقیقت فرآوری اتصال با ابزار بدون پین به‌عنوان یک عملیات اصلاح ریزساختار پس از جوشکاری، تأثیر قابل توجهی بر بهبود خواص مکانیکی ناحیه جوش دارد. عبور ابزار از روی سطح جوش بدون ایجاد ذوب، موجب اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و تولید حرارت کنترل‌شده می‌شود که به وقوع تبلورمجدد دینامیکی و ریزدانه‌سازی قابل توجه در نواحی سطحی منطقه همزده و ناحیه مجاور آن می‌انجامد. برطبق رابطه هال‌پیچ، استحکام‌بخشی اندازه دانه را می‌توان بصورت $kd^{-1/2}$ نوشت که d اندازه دانه و $k=74\ MPa\sqrt{\mu m}$ است [22]. در واقع مطابق با این رابطه، ساختار ریزدانه ناشی از فرایند FSP منجر به افزایش تعداد مرزدانه‌ها و ایجاد مانع در برابر حرکت نابجایی‌ها می‌شود، که نتیجه آن افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی (UTS) است و همچنین همزمان منجر به همگن‌سازی ریزساختار و کاهش عیوب احتمالی ناشی از فرایند جوشکاری اولیه می‌گردد. در نهایت می‌توان گفت فرآوری اتصال با ابزار بدون پین با ایجاد ریزدانه‌سازی سطحی گسترده‌تر، افزایش چگالی نابجایی‌ها، اصلاح ساختار و القای تنش‌های پسماند فشاری در نواحی سطحی، منجر به فعال‌سازی هم‌زمان چندین مکانیزم استحکام‌بخشی می‌شود [23و24].

همچنین قابل ذکر است که اتصال آلیاژ آلومینیوم1100 بدون فرآوری با پاس اضافی، دارای کرنش مهندسی بالایی می‌باشد. نتایجی نزدیک به نتایج این تحقیق (کرنش مهندسی بالا) را قبلا کی و همکاران [25] برای آلیاژ آلومینیوم 1060 فراوری شده با روش همزن اصطکاکی گزارش کرده‌اند. جهت توجیه کرنش مهندسی بالا می‌بایست ذکر شود که گزارش شده که تعداد کمی آخال در ریزساختار این نوع آلیاژ آلومینیوم وجود دارد، که این

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

آخال‌ها به اصلاح ساختار در طی روش همزن اصطکاکی کمک خواهند نمود [26] و در نتیجه اصلاح ساختار باعث افزایش انعطاف‌پذیری خواهد شد. در واقع فرایند همزن اصطکاکی به علت ماهیت همزدنی که دارد باعث می‌شود تا این آخال‌ها خرد شده و به صورت ذرات بسیار ریزی در ساختار منطقه همزده پراکنده شوند. اندازه بسیار ریز و توزیع یکنواخت این آخال‌ها که معمولا از ذرات سرامیکی هستند بعنوان تقویت کننده عمل کرده و لذا منجر به بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری می‌شوند.



شکل 14- نتایج آزمون اتسحکام کششی اتصالات الف) فرآوری شده، ب) اولیه.

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر اثر پاس اضافی توسط ابزار بدون پین به عنوان یک رویکرد نوین، بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب‌به‌لب ورق‌های آلومینیوم سری 1100 ایجاد شده توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

- بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که ساختار اتصال فرآوری‌شده در تمامی نواحی به ویژه در نواحی سطحی و نزدیک به سطح نسبت به اتصال اولیه دارای دانه‌های ریزتری است که نشان‌دهنده وقوع تغییر پلاستیک شدید و تبلورمجدد دینامیکی کامل می‌باشد. اجرای پاس اضافی با ابزار بدون پین موجب کاهش اندازه‌ی دانه‌های سطحی تا حدود 1 میکرومتر می‌شود.

- نتایج آزمون ریزسختی نشان داد که ساختار ریزدانه‌تر حاصل از فرایند FSP موجب افزایش قابل‌توجه سختی، به‌ویژه در ناحیه همزده بالایی (UZ) می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار سختی در این ناحیه از حدود 30 ویکرز در نمونه اولیه به حدود 55 ویکرز در نمونه فرآوری‌شده افزایش یافته‌است.

- نتایج حاصل از آزمون استحکام کششی نمونه‌های اتصال اولیه و فرآوری‌شده نشان داد که اعمال پاس اضافی توسط ابزار بدون پین، منجر به بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی اتصال شده‌است. بر اساس منحنی‌های تنش کرنش، استحکام کششی نهایی (UTS) در نمونه فرآوری‌شده از 86 به 101 مگاپاسکال افزایش یافته‌است که معادل افزایش حدود 17 درصدی در استحکام کششی اتصال است.

- استحکام‌بخشی FSP اضافی ناشی از ریزدانه کردن و اصلاح ریزساختار می‌باشد که منجر به افزایش تعداد مرزدانه‌ها و ایجاد مانع در برابر حرکت نابجایی‌ها می‌شوند، که در نتیجه آن افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی را به همراه دارد.

در مجموع می‌توان بیان کرد که در مقایسه با سایر روش‌های بهبود اتصال، استفاده از فرآوری همزن اصطکاکی با ابزار بدون پین، می‌تواند به عنوان یک روش ساده و کاربردی برای افزایش عملکرد اتصالات آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1-Ahmed MMZ, Seleman MME-S, Eid RG, Albaijan I, Touileb K. The influence of tool pin geometry and speed

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]

microstructure, mechanical properties, tribological and corrosion behaviors: A review. *J Mater Res Technol.* 2022;20:1940-1975.
15-Chen P, Zou S, Chen J, Qin S, Yang Q, Zhang Z, et al. Effect of rotation speed on microstructure evolution and mechanical properties of nugget zone in 2195-T8 Al-Li alloy friction stir welding joints. *Mater Charact.* 2021;176:111079.
16-Saju TP, Narayanan RG. Dieless friction stir lap joining of AA 5050-H32 with AA 6061-T6 at varying pre-drilled hole diameters. *J Manuf Process.* 2020;53:21-33.
17-Moradi K, Mirsalehi SE. Dissimilar joining of low-carbon steel to 6061-T6 aluminum alloy by novel method of pinless friction stir spot welding-brazing. *Met Mater Int.* 2023;29(1):174-190.
18-Zainelabdeen H, Al-Badour FA, Suleiman RK, Adesina AY, Merah N, Ghaith FA. Influence of friction stir surface processing on the corrosion resistance of Al 6061. *Materials (Basel).* 2022;15(22):8124.
19-Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. *Prog Mater Sci.* 2021;115:100706.
20-Chu Q, Li WY, Yang XW, Shen JJ, Vairis A, Feng WY, et al. Microstructure and mechanical optimization of probeless friction stir spot welded joint of an Al-Li alloy. *J Mater Sci Technol.* 2018;34(10):1739-1746.
21-Zhang GF, Su W, Zhang J, Wei ZX, Zhang JX. Effects of shoulder on interfacial bonding during friction stir lap welding of aluminum thin sheets using tool without pin. *Trans Nonferrous Met Soc China.*
22-Yu C, Kao P, Chang C. Transition of tensile deformation behaviors in ultrafine-grained aluminum. *Acta Mater.* 2005;53:4019-4028.
23-Ren R, Fan J, Wang B, Zhang Q, Li W, Dong H. Hall-Petch relationship and deformation mechanism of pure Mg at room temperature. *J Alloys Compd.* 2022;920:165924.
24-Ahmed MMZ, El-Sayed Seleman MM, Zidan ZA, Ramadan RM, Ataya S, Alsaleh NA. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-T4/AA7075-T6 T-butt joints. *Metals (Basel).* 2021;11(1):128.
25-Ke L, Huang C, Xing L, Huang K. Al-Ni intermetallic composites produced in situ by friction stir processing. *J Alloys Compd.* 2010;503:494-499.
26-Liu L, Nakayama H, Fukumoto S, Yamamoto A, Tsubakino H. Microstructural evolution in friction stir welded 1050 aluminum and 6061 aluminum alloy. *Mater Trans.* 2004;45:2665-2668.
on the mechanical properties of the bobbin tool friction stir processed AA1050. *Materials (Basel).* 2022;15:4684.
2-Alaeibehmand S, Mirsalehi SE, Ranjbarnodeh E. Pinless FSSW of DP600/Zn/AA6061 dissimilar joints. *J Mater Res Technol.* 2021;15:996-1006.
3-Öchsner A, Altenbach H, editors. *Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design.* Cham: Springer; 2021.
4-Ge X, Jiang D, Song W, Wang H. Effects of tool plunging path on the welded joint properties of pinless friction stir spot welding. *Lubricants.* 2023;11(3):150.
5-Tamizi M, Mirsalehi SE, Bakhtiari F, Jamali A. Effects of pin length and welding parameters on metallurgical structure and mechanical behavior of AA6061 friction stir spot welded joints. *SSRN Electron J.* 2022.
6-Zhao Z, Bai P, Du W, Liu B, Pan D, Das R, et al. An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: Preparation, properties and applications. *Carbon.* 2020;170:302-326.
7-Farhang M, Farahani M, Nazari M, Daliri OS. Experimental correlation between microstructure, residual stresses and mechanical properties of friction stir welded 2024-T6 aluminum alloys. *Int J Adv Des Manuf Technol.* 2022;15(3):1-9.
8-Kumar V, Goyat V. A review on reinforcement strategies of friction stir processing to fabricate metal matrix composites. *Mater Today Proc.* 2023;82:285-294.
9-El-Zathry NE, Akinlabi S, Woo WL, Patel V, Mahamood RM. Friction stir-based techniques: An overview. *Weld World.* 2025;69(2):327-361.
10-Prangnell PB, Bakavos D. Novel approaches to friction spot welding thin aluminium automotive sheet. *Mater Sci Forum.* 2010;638-642:1237-1242.
11-Shang Q, Ni DR, Xue P, Xiao BL, Wang KS, Ma ZY. An approach to enhancement of Mg alloy joint performance by additional pass of friction stir processing. *J Mater Process Technol.* 2019;264:336-345.
12-Sen M, Puri AB. An experimental investigation on micro-friction stir welding (μFSW) process using pinless tool. *J Mater Eng Perform.* 2025.
13-Zhang H, Liu X, Wang Y, Duan J. Effect of pinless friction stir processing on microstructure and properties of surface modification layer of 2024 aluminum alloy. *Surf Topogr Metrol Prop.* 2024;12(4):045010.
14-Wu B, Ibrahim MZ, Raja S, Yusof F, Abdul Razak BB, Muhamad MRB, et al. The influence of reinforcement particles friction stir processing on

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.19]