

## تحلیل اثر سرعت خطی و دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر جریان مواد اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

حسام الدین آقاجانی درازکلا

ناصر کردانی\*

حامد آقاجانی درازکلا

دانش آموخته، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران، مازندران، ایران

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

### چکیده

افزایش استحکام و توسعه سازه‌های هوایی از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. در این مقاله به منظور بررسی اتصال T شکل فلز آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شدند و همچنین شبیه سازی نرم افزاری برای آگاهی از مقادیر مناسب اثرات دینامیکی ابزار و درک بهتر از تولید و توزیع گرما در فرآیند جوشکاری با استفاده از نرم افزار تجاری Fluent انجام شد. به همین منظور اتصال آلومینیوم ۶۰۶۱ با سرعت‌های خطی و سرعت‌های دورانی مختلف ابزار مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به پارامترهای انتخاب شده در این فرآیند مستحکم ترین اتصال در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۶۸ میلیمتر بر دقیقه بدست آمد. محل شکست تمامی نمونه‌های تست کشش، در سمت زائده T شکل آلومینیوم قرار داشت. عمده عیوب داخلی ایجاد شده در درون اتصالات عیب تولنی بود که با افزایش گرمای ورودی و سرعت خنک شوندگی همزمان به منطقه اتصال، از بین رفتند. بیشینه استحکام تولید شده در این آزمایشات ۱۸۸ مگاپاسکال می‌باشد که نزدیک به استحکام فلز پایه‌ی آلومینیومی است. **واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم ۶۰۶۱، اتصال T شکل، خواص مکانیکی، خواص متالورژیکی.

## Linear and rotational velocities effects of friction stir welding tool on AA6061-T6 aluminum alloy T-joint

H. Aghajani Derazkola

N. Kordani

H. Aghajani Derazkola

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Nour Branch, Nour, Iran.

Department of Mechanical Engineering, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran

Young Researchers and Elites club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract

Increase of strength and development of aerial structures has long been of interest to researchers. In this study, to investigate the T-joint T6-6061 aluminum alloy using friction stir welding process, laboratory samples were made, and also the software simulations were performed to find out the appropriate amounts of tools dynamic effects. Fluent commercial software has been used to better understand heat generation and distribution in the welding process. For this purpose, the T6-6061 aluminum joint with different linear and rotational tools speeds was studied. Depending on the selected parameters in the process, the strongest connection was produced in the 1600 rpm rotational speed and 68 mm/min linear velocity. The failure place of all tensile samples was located on the aluminum T appendage. Tunnel void was the major defect in the joints which disappeared with increasing heat input and simultaneous cooling rate to the joint. The maximum strength produced in these experiments is 188 MPa which is close to the strength of the aluminum base metal.

**Keywords:** Friction stir welding, AA6061 aluminum alloy, T-Joint, Mechanical properties, Metallurgical properties.

از گرم شدن قطعه‌کار در امتداد فصل مشترک پیشروی می‌کند [۳]. با این روش جوشکاری انواع طرح‌های اتصال را می‌توان تولید کرد. یکی از حساس‌ترین نوع اتصال که در بدنه و بال انواع هواپیماها کاربرد دارد، اتصال T شکل است [۴].

محققان اندکی در زمینه اتصالات T شکل به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پرداختند. فراتینی و همکاران به تاثیر پارامترهای هندسی و فناوریانه‌ای بر جریان مواد در اتصال T شکل آلومینیوم ۶۰۸۲ به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و مدلسازی المان محدود پرداختند. در پژوهشی که توسط آنها انجام گرفت، تاثیر پارامترهای هندسی و فناوریانه‌ای با شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت [۵]. بویا و همکاران، به تجزیه و تحلیل تجربی و عددی

### ۱- مقدمه

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرآیند توسعه یافته‌ای از جوشکاری اصطکاکی است که در سال ۱۹۹۱ جهت اتصال آلومینیوم و آلیاژهای آن اختراع شد [۱]. با توسعه این فرآیند انعطاف پذیر، اتصالات همجنس و غیر همجنس بسیاری از فلزات دیگر مانند فولاد، مس، برنز و آلیاژهای تیتانیوم هم با این روش به یکدیگر پیوند داده شدند [۲]. در این فرآیند، ابتدا قطعه‌کارها توسط نگهدارنده‌ای که صفحه‌ی پشتی نامیده می‌شود، مهار می‌شوند تا از حرکت آنها در جهات مختلف در حین جوشکاری جلوگیری شود. سپس ابزار چرخان در فصل مشترک قطعات تا جایی که شانه سطح قطعه کار را لمس کند، نفوذ کرده و پس

حاصل از آنالیز شیمیایی و نیز خواص فیزیکی این آلیاژ در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱- درصد ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

عنصر	درصد وزنی
Al	۹۵/۸
Cr	۰/۳۵
Cu	۰/۴
Mg	۱/۲
Mn	۰/۱۵
Si	۰/۸
Ti	۰/۱۵
Fe	۰/۷
Zn	۰/۲۵

جدول ۲- خواص فیزیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

خواص مکانیکی	آلومینیوم ۶۰۶۱
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	۲۲۸
$\sigma_Y$ (MPa)	۱۰۳
Shear Strength (MPa)	۱۵۳
Elongation (%)	۱۷
Hardness (HV)	۶۰
$\rho$ (Kg/m3)	۲۷۹۶



شکل ۱- نمونه های آماده سازی شده جهت انجام جوشکاری

در مرحله بعد ورق ها درون فیکسچر از قبل طراحی شده در محل مناسب خود قرار گرفتند تا جوشکاری انجام شود. ابزار مورد استفاده در این فرآیند دارای بین مخروطی با ۶ میلیمتر ارتفاع تهیه گردید. قطر کف ابزار ۶ میلیمتر، قطر نوک آن ۲ میلیمتر همچنین شانه ابزار ۱۸ میلیمتر و زاویه تقعر شانه ابزار ۲ درجه در نظر گرفته شده است. جهت دوران ابزار خلاف جهت گردش عقربه‌های ساعت بود. زاویه ابزار ۲ درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. جهت بدست آوردن افست مناسب، ابزار جوشکاری به اندازه‌های ۱/۲ میلیمتر در سمت پیشرو افست داده شد. با توجه به امکانات دستگاه فرز انتخاب شده، ابزار فرآیند دارای سرعت‌های دورانی ۹۳۰، ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۶۸، ۴۰ و ۸۰ میلیمتر بر دقیقه بود. قابل ذکر است که در سرعت های دورانی کمتر از ۹۳۰ دور در دقیقه، فرآیند جوش قابل

جریان مواد در اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم AA2024-T4 به روش FSW پرداختند [۶]. آنها اعلام کردند خط اتصال واقعی در قسمتی مرز بین ورق افقی و عمودی در اتصال T به وجود می‌آید و جریان موادی که در پوسته اتفاق افتاد شبیه اتصال لب به لب در FSW بود. دوناتی موفق به تولید مفصل T شکل آلیاژ آلومینیوم AA6082-T6 توسط FSW با استفاده از فلز پرکننده شدند [۷].

آستاریتا و همکاران، اتصال T شکل آلیاژهای ناهمسان آلومینیوم AA2198-T3 و AA6056T4 به روش FSW مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصل از کار آنها نشان داد که هندسه و زاویه انحراف ابزار نقش مهمی در ایجاد یک اتصال سالم و باکیفیت ایفا می‌کند [۸]. در پژوهشی دیگر زو و همکاران به بررسی ساختار میکروسکوپی و رفتار کششی اتصال T شکل ورق ۳ میلیمتری آلیاژ AA6061-T4 به روش FSW پرداختند و تاثیر پارامترهای فرایند بر ساختار میکروسکوپی، عیوب، سختی پروفیل و استحکام کششی بطور خاص مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد پارامترهای مختلف فرایندهای تاثیر زیادی در ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی اتصال ندارند [۹]. کرسنوسکی به بررسی تجربی اتصال T شکل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از آلیاژ آلومینیوم AA6082-T6 و رفتار آنها تحت بارهای استاتیکی پرداخت. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که در سرعت‌های پایین ابزار و تولید گرمای کم، مشابه با اتصالات لب‌به‌لب عیوب قابل توجهی مانند حفره، تشکیل می‌شود [۱۰]. دووس و همکاران به بررسی و تحلیل عیوب به وجود آمده در منطقه جوش اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم AA5456 پرداختند. اثرات پارامترهای جوشکاری مانند سرعت چرخش، سرعت خطی، عمق غوطه‌وری ابزار بر روی کیفیت جوش آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. آنها نتیجه گرفتند که عیب بوسه‌ای در سرعت پیشروی بالاتر از ۱۱۰ میلیمتر بر دقیقه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین جوش ناقص در ابتدای کار وقتی رخ می‌دهد که گرمای ورودی کم است. این عیوب را می‌توان با تاخیر در حرکت ابتدای جوشکاری و ثابت ماندن ابزار در شروع حرکت خطی به ۳۰ ثانیه، کاهش سرعت پیشروی و افزایش سرعت دورانی برطرف کرد [۱۱].

هدف این مقاله بررسی امکان سنجی اتصال T شکل آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و تاثیرات پارامترهای دینامیکی روی استحکام اتصال است.

## ۲- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، ورق آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به ابعاد ۱۰۰۰ میلیمتر در ۵۰۰ میلیمتر با ضخامت ۴ میلیمتر تهیه شد و بعد از اندازه‌گذاری و خط کشی توسط دستگاه گیوتین به ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ میلیمتر (به منظور تهیه ورق بالایی اتصال) و ۱۵۰×۵۰ میلیمتر (به منظور تهیه ورق زائده T اتصال) در خلاف جهت نورد بریده و آماده سازی گردید. شکل ۱ نمونه ورق های بریده شده قبل از انجام فرایند جوشکاری را نشان می‌دهد. قبل از انجام تست لبه‌های قطعه‌کارها با فرچه‌ی سیمی کاملاً تمیز شد. جهت اعتبارسنجی رفتار مکانیکی و متالورژیکی آلومینیوم ۶۰۶۱ از لحاظ، درصد ترکیبات شیمیایی فلزات پایه با استفاده از دستگاه آنالیز مواد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج

در معادله فوق  $i$  بیانگر جهت های اصلی  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  است. معادله ی بقای مومنوم ابزار که در خط اتصال (محور  $X$ ) دارای سرعت ثابت رو به جلو می باشد، بصورت زیر تعریف می شود [۱۳]:

$$\rho \frac{\partial s_i s_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial F}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial s_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial s_j}{\partial x_i} \right) - \rho V_1 \frac{\partial s_j}{\partial x_1} \quad (2)$$

ضریب نسبت تنش سیلان موثر ( $\sigma_e$ ) به نرخ کرنش موثر ( $\dot{\epsilon}$ ) را نشان می دهد و بصورت زیر تعریف می شود [۱۴]:

$$\mu = \frac{\sigma_e}{3\dot{\epsilon}} \quad (3)$$

همانطور که گفته شد  $\sigma_e$  تنش سیلان موثر و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش موثر است که با توجه به خواص ماده بصورت زیر تعریف می شوند [۱۵]:

$$\sigma_e = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arc} \sinh \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

در این رابطه ( $\alpha$ )،  $A$ ،  $n$  و ضرایب ثابت مربوط به فلز پایه می باشند که در مورد آلیاژ آلومینیوم 6061 به ترتیب برابر ۱،  $5/11 \times 10^{10}$  و ۵/۶۶ هستند. پارامتر  $Z$  ضریب زن- هولومن است که بصورت زیر تعریف می شود [۱۵]:

$$Z = \epsilon \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) \quad (5)$$

معادله ی بقای انرژی گرمایی برای سیال غیر نیوتنی در جهت های  $X$  و  $Y$  بصورت زیر معرفی می شود [۱۲]:

$$\rho C_p \frac{\partial (s_i T)}{\partial x_1} = -\rho C_p V_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_i + Q_v \quad (6)$$

در معادله ی فوق  $s_i$  سرعت مواد در جهت های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  تعریف می شوند.

در این مدل سازی، دمای هوا و دمای اولیه ی سیال ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. ورود و خروج هریک از سیال ها از نوارهای مرزی ورودی و نوارهای خروجی تعیین شده است. شرایط مکانیکی بین قطعه کارها و ابزار تنها در فصل مشترک بین آنها حاکم است و بقیه ی مرزها از این قانون مستثنی هستند. در طول فرآیند شبیه سازی سرعت های ابزار مطابق با تست های تجربی انتخاب شدند. گرمای اصطکاکی تولید شده در فصل مشترک ابزار و قطعه کارها ( $Q_i$ ) بصورت زیر تعریف شد [۱۲]:

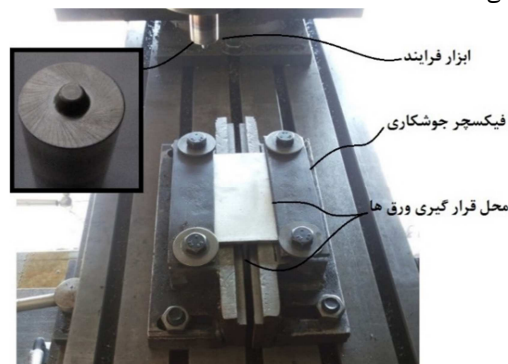
$$Q_i = [(1 - \delta)\eta\tau + \delta\mu_f F](\omega r - V_1 \sin \theta) \quad (7)$$

در معادله ی (۷)،  $\theta$  زاویه با جهت منفی در راستای خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت تعریف می شود.  $\eta$  راندمان مکانیکی است که بر اساس پژوهش های قبلی ۰/۵ در نظر گرفته می شود [۱۲].  $\delta$  نسبت سرعت چرخش مواد به سرعت چرخشی در فصل مشترک ابزار و قطعه کار،  $\mu_f$  ضریب اصطکاک است که در این پژوهش ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

در معادله (۶)،  $Q_v$  برابر نرخ گرمای تولید شده در واحد حجم می باشد که از تغییر شکل پلاستیک مواد در ناحیه خارج از فصل مشترک قطعه کار و ابزار تولید می شود [۱۲]. این مقدار گرما در حدود ۴/۴ درصد حرارت کل فرآیند است که بصورت زیر تعریف می شود [۱۲]:

$$Q_v = \frac{d\epsilon_p}{dv} = \beta\mu\dot{\phi} \quad (8)$$

انجام نبود و در دوره های بالای ۱۶۰۰ دور در دقیقه نیز به دلیل ارتعاش بیش از حد ابزار، فرآیند جوشکاری قابل انجام نبود. شکل ۲ فیکسچر، محل قرارگیری قطعه کارها و ابزار مورد استفاده در این فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۲- فیکسچر جوشکاری

جهت راستی آزمایشی نتایج، به ازای هر پارامتر فرآیند، ۳ مرتبه جوشکاری بر روی ۳ نمونه مجزا انجام شد (به ازای هر پارامتر ۳ نمونه جوشکاری تولید شد) و در نهایت نتایج میانگین نمونه ها در این پژوهش گزارش شد. جهت ثبت دما از دوربین گرما سنج نقطه ای لیزری مدل Raytec-Rauenger (ST) استفاده گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است. برای ثبت داده های دما، گرمای ایجاد شده در پیشروی پس از مدت یک دقیقه در محیط اطراف ابزار اندازه گیری شد. جهت بررسی جریان داخلی مواد از میکروسکوپ نوری و تست رادیوگرافی استفاده شد.



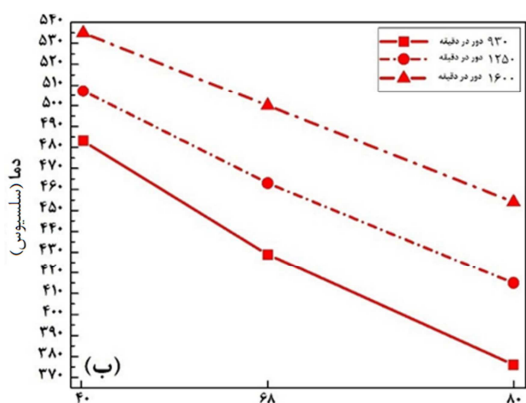
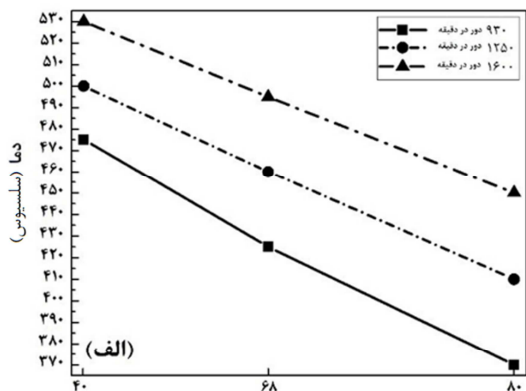
شکل ۳- دوربین گرما سنج نقطه ای لیزری مدل Raytec-Rauenger (ST) مورد استفاده در این پژوهش

### ۳- شبیه سازی فرآیند

در تحلیل ریاضی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، گرمای اصطکاکی تولید شده توسط ابزار، نیرو های وارد شده بر قطعه کارها و آمیختن جریان مذاب اصلی ترین معادلات حاکم بر فرآیند به شمار می روند. در شبیه سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به روش مکانیک سیالات محاسباتی، جریان و دمای مذاب با حل معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی برای مذابی که به عنوان سیالات غیر نیوتنی (تراکم ناپذیر) فرض شده است، بدست می آید. بر اساس فرضیات فوق معادله ی پیوستگی را می توان بصورت زیر نوشت [۱۲]:

$$\frac{\partial s_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

حرارت ورودی به محل اتصال، بیانگر جریان و اغتشاش بیشتر مواد است که با بیشتر شدن سرعت دورانی رخ می‌دهد. از طرف دیگر با افزایش سرعت خطی دمای تولید شده کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده در گذر سریعتر منبع گرما از منطقه جوش و ماندگاری کمتر آن در محل اغتشاش است. در سرعت دورانی ۱۲۵۰ دور در دقیقه، بیشینه دمای تولید شده به ۵۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، گرمای تولید شده در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این دما حدود ۵۳۰ درجه سلسیوس است که در حدود ۷ درجه از مقدار واقعی دمای ثبت شده توسط دستگاه دما سنج در این سرعت دورانی کمتر است.



شکل ۵- الف) مقایسه حداکثر گرمای تولید شده در حین فرایند بر حسب سرعت ابزار و ب) حداکثر گرمای تولید شده در شبیه‌سازی بر حسب سرعت ابزار

۲-۴- تاثیر توزیع داخلی گرما بر شکل گیری عیوب

جریان داخلی مواد در سرعت های دورانی مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در سرعت دورانی ۹۳۰ دور در دقیقه به علت تولید گرمای کم و نفوذ کم گرما به قسمتهای زیرین محل اتصال، عیب تونلی شکل بزرگ درون اتصال ایجاد شده است. این عیب را در شکل ۶-الف می‌توان مشاهده کرد. با افزایش سرعت دورانی و تولید گرمای بیشتر در سرعت دورانی ۱۲۵۰ دور در دقیقه، این عیوب کوچکتر می‌شود و نفوذ مواد به درون منطقه

در معادله ی (۸)،  $\mu$  ضریب اصطکاک بین سطوح،  $\beta$  کسری از کار تغییر شکل پلاستیک است که به صورت گرما تلف می‌شود و  $\varepsilon'$  نرخ کرنش موثر است که عبارت است از [۱۲]:

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}\right)} \quad (9)$$

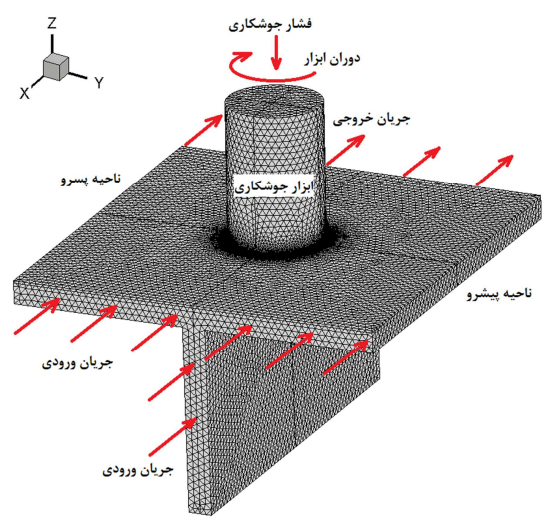
انتقال گرما بین سطح قطعه کارها و محیط اطراف ابزار به صورت تابشی و رسانشی انجام می‌شود که آنها را نیز به صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{Top} = \beta \varepsilon (T^4 - T_a^4) + h(T - T_a) \quad (10)$$

$h$  ضریب انتقال گرما در سطح است که در این شبیه‌سازی،  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  در ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال گرما در کف نیز بصورت زیر تعریف می‌شود که در آن  $h_b$  بیانگر ضریب انتقال گرما در کف قطعه کار است که  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  در ۳۰۰ در نظر گرفته شد.

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{Bottom} = h_b (T - T_a) \quad (11)$$

شکل ۴ مدل مش بندی شده این فرایند را نشان می‌دهد.



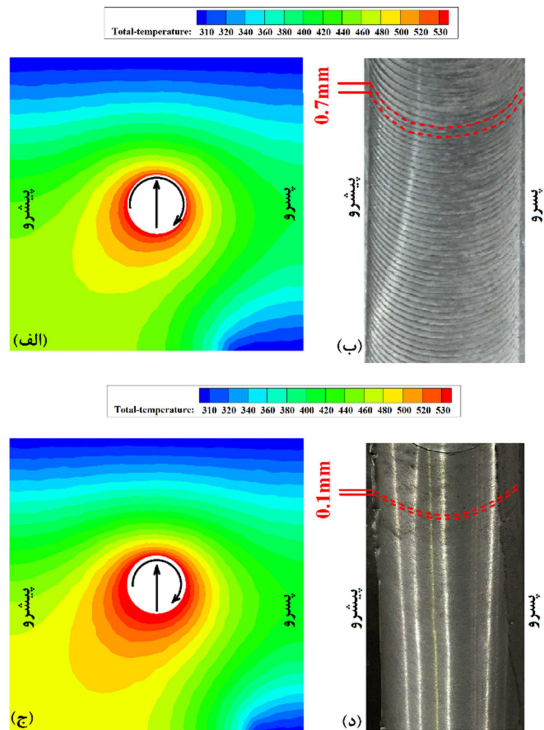
شکل ۴- مدل مش بندی شده فرایند

۴- بحث و نتایج

۴-۱- تاثیرات سرعت ابزار بر میزان گرمای تولید شده در حین فرایند

گرمای ورودی به محل اتصال مهمترین عامل تغییرات جوش به حساب می‌آید که سبب بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌شود. شکل ۵ مقایسه نتایج عملی ثبت شده در حین فرایند و شبیه سازی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان داد حرارت اصطکاکی تولید شده با سرعت دورانی ابزار ارتباط مستقیم دارد. بگونه ای که با افزایش سرعت دورانی مقدار گرمای تولید شده در منطقه جوش، افزایش و با افزایش سرعت خطی نیز کاهش می‌یابد. براساس نتایج ثبت شده، بیشینه گرمای تولید شده در سرعت دورانی ۹۳۰ دور در دقیقه، ۴۸۰ درجه سلسیوس بود که در سرعت خطی ۴۰ میلیمتر در دقیقه حاصل شد. روند افزایش

از حرکت مواد از جلو ابزار (لبه پیشرو) به سمت پشت ابزار (لبه پستی) است. این خطوط که به حلقه های جریان نیز شهرت دارند وابستگی مستقیم با گرمای ورودی به محل اتصال و سرعت خطی آن دارند. همانطور که در شکل مشاهده میشود فاصله خطوط جریان از  $0.7$  میلیمتر به  $0.1$  میلیمتر از سرعت  $930$  دور در دقیقه به  $1600$  کاهش یافت. کاهش فاصله خطوط جریان حاکی از تغییر حالت بیشتر ماده اولیه از حالت جامد به حالت پلاستیک است که سبب پر شدن کامل منطقه اغتشاش و نیز از بین رفتن عیوب داخلی منطقه اغتشاش می-شود.

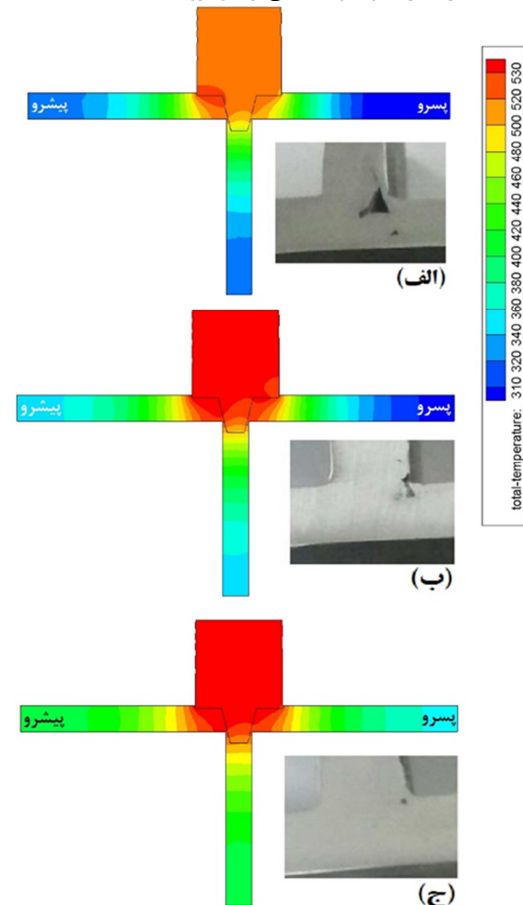


شکل ۷- (الف) توزیع سطحی گرمای حاصل از شبیه سازی و (ب) جریان سطحی مواد برای جوشکاری با سرعت دورانی  $930$ ، (ج) توزیع سطحی گرمای حاصل از شبیه سازی و (د) جریان سطحی مواد برای جوشکاری با سرعت دورانی  $1600$

#### ۴-۴- تاثیرات سرعت ابزار بر نرخ کرنش

با توجه به نتایج حاصل می‌توان دریافت که با کاهش سرعت خطی و افزایش سرعت دورانی سرعت اغتشاش مواد در اطراف ابزار افزایش می‌یابد. سرعت مواد در اطراف ابزار بیانگر نرخ کرنش مواد در محل اتصال نیز می‌باشد. نرخ کرنش مواد برابر مقدار جابجایی مواد خمیری در واحد زمان تعریف می‌شوند. بیشینه نرخ کرنش فلز آلومینیوم  $6061$  در اطراف ابزار برابر با  $5/6 \text{ s}^{-1}$  بود که در سرعت دورانی  $1600$  دور در دقیقه و سرعت خطی  $40$  میلیمتر در دقیقه حاصل شد. نرخ کرنش مواد تابعی از جابجایی مواد در اطراف ابزار است. باتوجه به نتایج حاصل می‌توان دریافت که همانند سرعت مواد در اطراف ابزار با کاهش سرعت خطی و افزایش سرعت دورانی نرخ کرنش مواد در اطراف ابزار افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی، کمینه نرخ کرنش مواد در سرعت دورانی  $930$  دور در دقیقه و سرعت خطی

اغتشاش به شکل یکنواخت تری انجام گرفت که در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود. در سرعت دورانی  $1600$  دور در دقیقه، تولید حرارت بالاتر رفته و نرم تر شدن دو ورق را به دنبال دارد. همانطور که در شکل ۶-ج مشاهده می‌شود، به علت تولید گرما و کار مکانیکی بیشتر توسط شانه ی ابزار سبب شده تا ناحیه ی وسیع تری از آلومینیوم  $6061$  به حالت خمیری درآید و عیوب داخلی از بین برود.

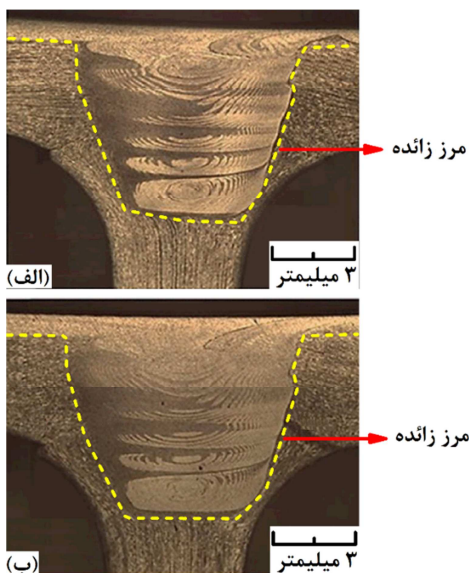


شکل ۶- ارتباط توزیع داخلی حرارت با عیوب داخلی به ترتیب برای سرعت های دورانی (الف)  $930$ ، (ب)  $1250$  و (ج)  $1600$  دور بر دقیقه

#### ۴-۳- اثر سرعت خطی بر جریان سطحی مواد

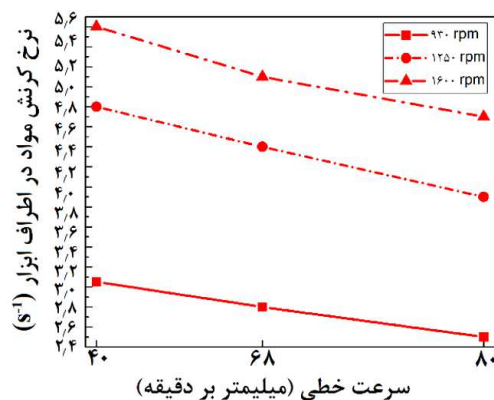
شکل ۷ توزیع سطحی گرما را در سطح قطعه کارهایی نشان می‌دهد که در سرعت دورانی  $930$  و  $1600$  دور در دقیقه و سرعت خطی  $40$  میلیمتر در دقیقه جوشکاری شدند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، توزیع گرما در ناحیه پیشرو بیشتر از ناحیه پسرو است. از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی و بالا رفتن گرما حاصل از اصطکاک حرارت منطقه پیشرو نیز بیشتر می‌شود. این روند از سرعت ابزار نیز تاثیر می‌پذیرد. با افزایش سرعت دورانی دما در منطقه اتصال افزایش پیدا میکند و در نتیجه آن توزیع سطحی حرارت نیز بیشتر می‌شود. این پدیده بر روی جریان سطحی خط جوش تاثیر مستقیم دارد. سطح جوشکاری شده با سرعت های دورانی  $930$  و  $1600$  دور بر دقیقه در شکل ۷ نشان داده شده است. مهمترین اثر گرمای ورودی را بر روی خطوط جریان سطحی میتوان مشاهده کرد. این خطوط ناشی

در شکل ۸ به تصویر کشده شده‌اند. اگرچه نتایج حاصل از عیوب داخلی مواد در مقاطع برش خورده عرضی در در شکل ۶ نشان داده شده بود، هدف از این آزمون بررسی امتداد و طول عیوب احتمالی در منطقه اغتشاش بود. نتایج حاصل نشان داد به دلیل نرخ کرنش کم در منطقه اغتشاش ترک و عیوب داخلی به طور پیوسته در تمامی طول مسیر جوش، ایجاد شد. این پدیده در نمای بالای دو نمونه جوشکاری شده به وضوح قابل تشخیص است. وجود عیب ممتد داخلی سبب خالی شدن منطقه رادیوگرافی شد که در تصویر ۸-ب روشن تر از تصویر ۸-ج دیده می‌شود. این بررسی نشان داد به دلیل تولید نرخ کرنش کمتر در سرعت دورانی پایین و سرعت خطی بالای ابزار، مرز بین زائده T و ورق بالایی به اندازه کافی به حالت خمیری در نمی‌آیند و در زمان حرکت رو به جلوی ابزار، منطقه اغتشاش در ناحیه پسرو پر نمی‌شود. این پدیده سبب می‌شود تا سهم زائده T در منطقه اغتشاش که ترکیبی از ورق های بالایی و زائده است، کاهش یابد و به دنبال آن کیفیت خواص مکانیکی اتصال نیز تنزل پیدا کند. نرخ کرنش بالاتر در سرعت دورانی بالاتر حاکی از تبدیل بیشتری از حجم مواد اولیه به حالت خمیری است که سبب می‌شود اغتشاش و ترکیب ورق های بالایی و زائده T افزایش یابد. این پدیده سبب می‌شود تا ترکیب بین مواد بیشتر شده و جریان داخلی کامل تر و بهتری درون منطقه جوش شکل بگیرد. تصویر متالوگرافی از سطح مقاطع نمونه های جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه که با سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه به هم جوش شده اند در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مرز زائده T و ورق های بالایی با خط قرمز رنگ علامت گذاری شده است. علاوه بر تولید جوش سالم با افزایش نرخ کرنش مواد ابعاد منطقه اغتشاش (که با خط چین زرد رنگ مشخص شده است) نیز بزرگتر می‌شود.

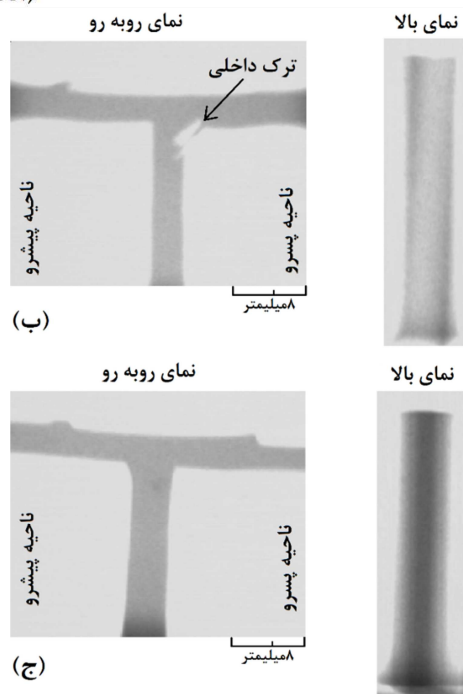


شکل ۹- تصویر متالوگرافی از منطقه اغتشاش اتصالاتی که با سرعت دورانی (الف) ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و (ب) ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شدند

۸۰ میلیمتر در دقیقه حاصل شد و مقدار آن برابر با  $2/5 \text{ S}^{-1}$  بود. نتایج آماری نرخ کرنش مواد در اطراف ابزار حاصل از شبیه سازی در شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است.

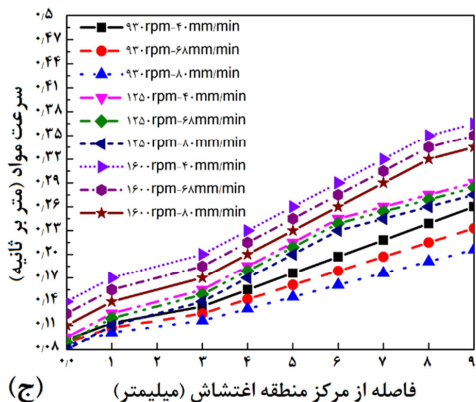


(الف)

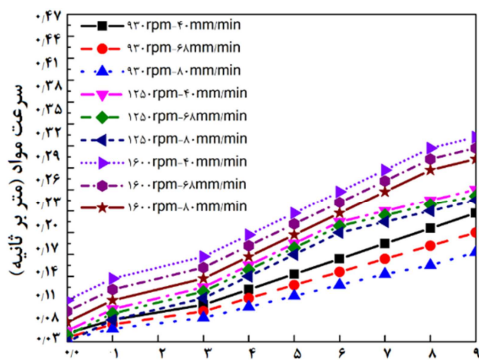


شکل ۸- (الف) نمودار نسبت سرعت خطی به نرخ کرنش مواد در اطراف ابزار، (ب) تصویر رادیوگرافی از نمای رو به رو و بالای اتصال جوشکاری شده با (الف) سرعت دورانی ۹۳۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۸۰ میلیمتر بر دقیقه و (ب) سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه

نرخ کرنش مواد متناسب با گرمای تولید شده و سرعت جریان مواد محل اغتشاش است. به دلیل وجود زائده در اتصالات T شکل، ممزوج شدن کامل مواد در ورق بالایی و زائده پایینی تضمین کننده اتصال مستحکم در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. به منظور بررسی ارتباط جریان داخلی مواد و نتایج حاصل از نرخ کرنش، دو نمونه از اتصالات تولید شده با نرخ کرنش حداقل و حداکثر در این آزمایش توسط تست غیر مخرب رادیوگرافی مورد آنالیز قرار گرفت، که



(ج) فاصله از مرکز منطقه اغتشاش (میلیمتر)



(د) فاصله از مرکز منطقه اغتشاش (میلیمتر)

شکل ۱۰- الف) شبیه سازی سرعت مواد از منطقه اغتشاش جوش که با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه، ب) شماتیک نقاط ابتدایی و انتهایی اندازه گیری سرعت مواد. نتایج حاصل از سرعت مواد از نقطه A تا B در ناحیه پیشرو و (د) پیشرو و (د) پسرو

### ۵- نتیجه گیری

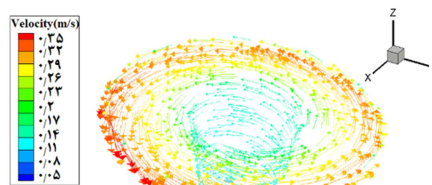
طبق بررسی و مطالعات تجربی و شبیه سازی انجام شده در این تحقیق، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند به عنوان روشی موثر و کارآمد جهت اتصال T شکل ورق آلومینیم ۶۰۶۱ باشد و جایگزین مناسبی برای روشهای ذوبی است. با صرف انرژی کمتر و راندمان بیشتر و همچنین کیفیت بهتر نسبت به روشهای ذوبی معمول اتصالاتی با خواص مکانیکی و ریز ساختاری بسیار مطلوب تری ایجاد می‌کند. جهت دستیابی به گرمای اصطکاکی کافی باید سرعت دوران در محدوده ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ دور در دقیقه باشد و سرعت خطی کمتر از ۶۸ میلیمتر در دقیقه باشد. در سرعت دورانی مناسب مواد به حالت خمیری تبدیل می‌شود و منطقه جوش همگن تری شکل می‌گیرد. کنترل سرعت خطی سبب می‌شود تا از ورود گرمای زیاد به منطقه اغتشاش جلوگیری شود و از طرف دیگر سرعت خطی زیاد سبب افزایش نرخ خنک شوندگی زیاد می‌شود که پیرو آن احتمال شکل گیری عیوب بالاتر می‌رود.

بررسی ماکروساختار نشان می‌دهد که در شرایط جوشکاری ۱۶۰۰ دور در دقیقه با پیشروی ۶۸ میلیمتر در دقیقه جریان داخلی جوش در بهترین وضعیت خود قرار دارد.

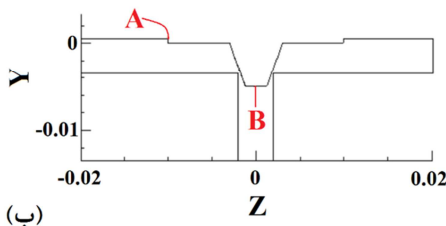
### ۴-۵- تاثیر سرعت ابزار بر سرعت مواد در منطقه

#### اغتشاش

نتایج حاصل از سرعت مواد در منطقه اغتشاش نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین سرعت مواد در ناحیه پیشرو و در سطح تماس مواد با شانه ابزار اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی دقیق تاثیر سرعت مواد بر ابعاد و خواص مکانیکی اتصال، نتایج آماری بیشینه سرعت مواد در منطقه اغتشاش از نقطه A تا نقطه B شکل ۱۰-ب را در ناحیه پیشرو و پسرو اندازه گیری شده و در شکل های ۱۰-ج و ۱۰-د به تصویر کشیده شده است. بر اساس نتایج حاصل با افزایش گرما و نرخ کرنش در سرعت دورانی بالا و سرعت خطی پایین ابزار، سرعت مواد نیز در هر دو ناحیه پیشرو و پسرو افزایش می‌یابد. از طرف دیگر می‌توان دید سرعت مواد از نقطه A به سمت نقطه B کاهش می‌یابد. این پدیده به دلیل کم بودن گرمای تولید شده توسط پین ابزار نسبت به شانه ابزار رخ می‌دهد که ارتباط مستقیم با گرما و نرخ کرنش نیز دارد [۱۶]. این نتایج نشان می‌دهد که در مرز بین زائده T و ورق های بالایی انتخاب سرعت مناسب مواد بسار حائز اهمیت می‌باشد. زیرا انتخاب سرعت دورانی بالا و سرعت خطی کم سبب افزای امتزاج بین زائده و ورقهای بالایی می‌شود، اما از طرف دیگر سرعت زیاد مواد در سطح جوش سبب ایجاد پلیسه و خروج مواد از منطقه جوش شده و کاهش ابعاد منطقه اغتشاش و کاهش خواص مکانیکی اتصال را به دنبال دارد [۱۷]. بر اساس نتایج حاصل، بیشترین سرعت مواد ۰/۳۵ متر بر ثانیه بود که در جوشکاری با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه بدست آمد. کمترین سرعت مواد نیز در شبیه سازی در جوشکاری با سرعت دورانی ۹۳۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۸۰ میلیمتر در دقیقه ثبت شد.



(الف)



(ب)

- [11] Doos Q. M. and Makki K. S., Defects Analysis of Tee-Section Welding Using Friction Stir Welding Process of Aluminum. *Journal of Engineering*, Vol. 20, No. 10, pp. 120-129, 2014.
- [12] Aghajani Derazkola H., Habibnia M. and Jamshidi Aval H., Study on Frictional Heat Behavior and Material Flow during Friction Stir Welding Of AA1100 Aluminum Alloy. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, Issue 14, pp. 251-261, 2015.
- [13] Aghajani Derazkola H. and Simchi A., Experimental and thermomechanical analysis of friction stir welding of poly(methyl methacrylate) sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 23, No.3, pp. 209-218, 2018.
- [14] Aghajani Derazkola H. and Elyasi M., Experimental and thermomechanical study on FSW of PMMA polymer T-joint. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, pp. 1445-1456, 2018.
- [15] Aghajani Derazkola H. and Simchi A., Experimental and thermomechanical analysis of the effect of tool pin profile on the friction stir welding of poly(methyl methacrylate) sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 28, pp. 412-423, 2018.
- [16] Aghajani Derazkola H. and Khodabakhshi F., Underwater submerged dissimilar friction-stir welding of AA5083 aluminum alloy and A441 AISI steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, No.9-12, pp. 4383-4395, 2019.
- [17] Aghajani Derazkola H. and Simchi A., An investigation on the dissimilar friction stir welding of T-joints between AA5754 aluminum alloy and poly(methyl methacrylate). *Thin-Walled Structures*, Vol. 135, pp. 376-384, 2019.

۶-نمادها

دما	T
طول	L
سرعت خطی	V
سرعت دورانی	$\omega$
استحکام کشش نهایی	UTS
نرخ کرنش	$\dot{\epsilon}$
فشار عمودی	F
انرژی فعال سازی	Q
ثابت گازها	R
گرمای ویژه	C <sub>p</sub>
ضریب انتقال گرما	k
تنش برشی	$\tau$
ضریب استفان-بولتزمن	B
دمای محیط	T <sub>a</sub>

۷-مراجع

- [1] Elyasi M., Aghajani Derazkola H. and Hossinzadeh M., Study on joint zone Microstructure Evolution and Hardness in Friction Stir welding of AA1100 Aluminum alloy to A441 AISI steel. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No.14, pp. 97-107, 2015.
- [2] Elyasi M., Aghajani Derazkola H. and Hossinzadeh M., Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No.4, pp. 251-261, 2015.
- [3] Aghajani Derazkola H., Jamshidi Aval H. and Elyasi M., Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20, No.7, pp. 553-562, 2015.
- [4] Đurđević A., Živojinović D., Grbović A., Sedmak A., Rakin M., Dascau H. and Kirin S., Numerical simulation of fatigue crack propagation in friction stir welded joint made of Al 2024-T351 alloy. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 58, pp. 477-484, 2015.
- [5] Fratini L., Buffa G., Micari F. and Shivpuri R., on the material flow in FSW of T-joints: Influence of geometrical and technological parameters. *International Journal of Advance Manufacturing and Technology*, Vol. 44, pp. 570-578, 2009.
- [6] Buffa G., Fratini L., Micari F. and Shivpuri R., Material Flow in FSW of T-joints: Experimental and Numerical Analysis. *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, pp. 1283-1286, 2008.
- [7] Donati L., Tomesani L. and Morri A., structural T-joint produced by means of friction stir welding (FSW) with filling material. *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, pp. 295-298, 2009.
- [8] Astarita A., Squillace A., Scala A. and Prisco A., On the Critical Technological Issues of Friction Stir Welding T-Joints of Dissimilar Aluminum Alloys. *Journal of material engineering and performance*, Vol. 21, pp. 1763-1771, 2012.
- [9] Zhou G., Yang X.Q., Cui L., Zhang Z.H., and Xu X.D., Study on the Microstructures and Tensile Behaviors of Friction Stir Welded T-joints for AA6061-T4 Alloys. *Journal of material engineering and performance*, Vol. 21, pp. 2131-2139, 2012.
- [10] Krasnowski K., Experimental Study of FSW T-joints of EN-AW 6082-T6 and Their Behaviour under Static Loads, university of petroleum and minerals. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, No.12, pp 9083-9092, 2014.