



## مطالعه رفتار حرارت حاصل از اصطکاک و جریان مواد در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA1100

حامد آقاجانی درازکلا<sup>1</sup>، مصطفی حبیب‌نیا<sup>2</sup>، حامد جمشیدی اول<sup>3\*</sup>

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری  
 2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل  
 \* صندوق پستی 484 h.jamshidi@nit.ac.ir

### چکیده

در این مقاله اثرات سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی توزیع حرارت، سیلان مواد و شکل‌گیری عیوب در منطقه جوش مورد بررسی قرار گرفت. جهت شبیه‌سازی فرایند با روش دینامیک سیالات محاسباتی از مجموعه‌ی تجاری فلونتت استفاده شد. برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی، خط جوش که در مرز بین قطعه کارها قرار دارد، به عنوان یک سیال با رفتار شبه مذاب در اطراف پین شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی ابزار، جریان مواد در جلو ابزار بیشتر می‌شود و ابعاد منطقه اغتشاش بیشتر می‌گردد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که حداکثر درجه حرارت و جریان مواد در سمت پیشرو اتفاق می‌افتد. براساس نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که تولید حرارت ناکافی سبب جریان ناکامل مواد اطراف پین می‌شود و بدین ترتیب عیوب مختلفی در ریشه جوش شکل می‌گیرند. نتایج حاصل از مدل توسط نتایج تجربی سایر محققین مورد تایید قرار گرفته است. براساس پارامترهای جوشکاری مورد بررسی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حداکثر نرخ کرنش محل اتصال را  $-4S^{-1}$  تا  $+4S^{-1}$  پیش بینی نموده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 25 خرداد 1393  
 پذیرش: 08 مرداد 1393  
 ارائه در سایت: 23 مهر 1393  
 کلید واژگان:  
 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی  
 دینامیک سیالات محاسباتی  
 شبیه‌سازی حرارتی  
 جریان مواد

## Study on Frictional Heat Behavior and Material Flow during Friction Stir Welding of AA1100 Aluminum Alloy

Hamed Aghajani Derazkola<sup>1</sup>, Mostafa Habibnia<sup>2</sup>, Hamed Jamshidi Aval<sup>3\*</sup>

- 1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Sari Branch, Sari, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
 3- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
 \* P.O.B. 484 Babol, Iran, h.jamshidi@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 15 June 2014  
 Accepted 30 July 2014  
 Available Online 15 October 2014

**Keywords:**  
 Friction stir welding  
 Computational fluid dynamics  
 Thermal simulation  
 Material flow

### ABSTRACT

In this article, effects of Friction stir welding tool rotational and traverse speeds were studied on the temperature distribution, material flow and formation of defects in the welding zone. Computational fluid dynamics method was used to simulate the process with commercial CFD Fluent 6.4 package. To enhance the accuracy of simulation in this study, the welding line that is located between two work pieces is defined with pseudo melt behavior around the FSW pin tool. Simulation results showed that with increase of FSW tool rotational speed to linear speed, the material flow in the front of the tool became more and dimensions of the stir zone were enhanced. The calculation result also shows that the maximum temperature and stir of the material occurred on the advancing side. The computed results showed that with incompetent heat generation, insufficient material flow occurred around the pin and defects formed in weld root. The computed results were in good agreement with the experimental results of other researchers. Based on the welding parameters used in this simulation, the maximum strain rate is predicted between  $-4(S^{-1})$  and  $+4(S^{-1})$  in the stir zone.

### 1- مقدمه

شامل قیمت کم، انعطاف‌پذیری بالا، بی‌نیاز از مهارت جوشکار و بدون آلودگی می‌باشد [1]. در این فرآیند، تولید گرما و جریان مواد توسط ابزار FSW فاکتورهای کلیدی هستند که تاثیر مستقیم در بدست آوردن یک اتصال مناسب دارند [2-4]. بر همین اساس بسیاری از محققان برای درک بهتر این

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>1</sup> (FSW) یک فرآیند جدید اتصال‌دهی در مقیاس با دیگر روش‌های جوشکاری به حساب می‌آید که دارای مزایای زیادی

1- Friction Stir Welding

خط اتصال (محور  $x$ ) دارای سرعت ثابت رو به جلو می‌باشد، بصورت رابطه 2 تعریف می‌شود [13]:

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho U_1 \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \quad (2)$$

در رابطه‌ی 2،  $U_1$  سرعت خطی ابزار در خط جوش،  $\rho$  چگالی و  $P$  فشار حرکت دهنده‌ی جریان تعریف می‌شود. در این معادله  $\mu$  یک ضریب برای سیال غیرنیوتنی است. این ضریب نسبت تنش سیلان موثر ( $\sigma_e$ ) به نرخ کرنش موثر ( $\dot{\epsilon}$ ) را نشان می‌دهد و بصورت رابطه 3 تعریف می‌شود [14]:

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

همان‌طور که گفته شد  $\sigma_e$  تنش سیلان موثر و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش موثر است که با توجه به خواص ماده بصورت رابطه 4 تعریف می‌شوند [16,15]:

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

در رابطه 4،  $\alpha$ ،  $A$  و  $n$  ضرایب ثابت مربوط به فلز پایه می‌باشند که در مورد آلیاژ آلومینیوم AA1100 به ترتیب برابر 1،  $5/18 \times 10^{10}$  و  $5/66$  هستند [17]. پارامتر  $Z$  ضریب زرنر- هولومن است که بصورت رابطه 5 تعریف می‌شود [18]:

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

در رابطه‌ی 5،  $Q$  انرژی اکتیواسیون است.  $R$  ثابت گازهست و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش موثر است.

با توجه به تغییرات خواص فیزیکی فلزات با بالارفتن دما، دستیابی به پارامترهای مکانیکی و حرارتی وابسته به دما برای فلز پایه و ابزار مورد استفاده در طول شبیه‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به توضیحات فوق ضرایب گرمای ویژه و انتقال حرارت فلز AA1100 را بصورت رابطه‌های 6 و 7 می‌توان تعریف کرد [19]:

$$C_p = 929.3 - 0.627T + 1.48 \times 10^{-3}T^2 - 4.33 \times 10^{-8}T^3 \quad (6)$$

$$K = 25.2 + 0.398T + 7.36 \times 10^{-6}T^2 - 2.52 \times 10^{-7}T^3 \quad (7)$$

و بطور مشابه برای ابزار فولادی می‌توان رابطه‌های 8 و 9 را تعریف کرد [20]:

$$C_p = 468.3 - 8.5T + 3.0 \times 10^{-4}T^2 + 1.8 \times 10^{-7}T^3 \quad (8)$$

$$K = 3.8 + 0.092T - 1.8 \times 10^{-4}T^2 + 7.8 \times 10^{-8}T^3 \quad (9)$$

معادله‌ی بقای انرژی حرارتی برای سیال غیر نیوتنی در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  بصورت رابطه 10 معرفی می‌شود [21]:

$$\rho C_p \frac{\partial (u_i T)}{\partial x_i} = -\rho C_p U_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_i + Q_b \quad (10)$$

در معادله‌ی فوق  $\rho$  چگالی سیال،  $C_p$  ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت،  $u_i$  سرعت مواد در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$ ،  $T$  دما،  $U_1$  سرعت جوشکاری و  $k$  ضریب انتقال حرارت تعریف می‌شوند. در معادله‌ی 10 مجموع گرمای تولید شده از تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک در دو مولفه‌ی  $Q_i$  و  $Q_b$  خلاصه می‌شوند. معادله‌ی بقای جرمی هر کدام از قطعه کارها در غلظت پایین بصورت رابطه 11 بیان می‌شود:

$$\frac{\partial (u_j C_i)}{\partial x_j} = -V \frac{\partial C_i}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( D \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

در عبارت بالا اشاره به نفوذ شیمیایی وابسته به حرارت دارد که به شکل رابطه 12 تعریف می‌شود [18]:

$$D = A \exp \left( -\frac{Q}{RT} \right) \quad (12)$$

معادلات فوق پس از کد نویسی، به نرم افزار فلونت وارد شد.

فاکتورها اقدام به شبیه‌سازی و توسعه‌ی مدل‌های این فرآیند به روش مکانیک سیالات محاسباتی کردند. محققانی همچون اسمیت [5] و نورث [6] جزو اولین محققانی بودند که روش دینامیک سیالات محاسباتی را در شبیه‌سازی فرآیند FSW بکار بردند. آن‌ها قطعه‌کارها را به عنوان نوعی از سیال غیرنیوتنی در شبیه‌سازی خود مدل کردند. سیدل [3] و رینولدز [7]، یک مدل بعدی برای پیش‌بینی جریان مواد در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه کردند. آنها مشاهده کردند که در سرعت دورانی و خطی کم ترکیب قابل ملاحظه‌ای بصورت افقی در سیال رخ می‌دهد. این اثر خود نشان‌گر نیاز بیشتر به تحلیل 3 بعدی فرآیند بود. ژانگ [5] و همکارانشان [8] با توسعه‌ی مدل 2 بعدی جریان مواد به این نتیجه رسیدند که مواد پشت ابزار نسبت به دیگر نقاط فلز پایه، بیشترین تغییر شکل را در اطراف پین دارد. این بازه‌ی تغییر شکل در زاویه‌ای بین 330 تا 360 درجه اتفاق می‌افتد. جریان مواد در اتصال فولاد کربنی با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط ناندان [6] و همکارانشان [9-10] با ارائه یک مدل 3 بعدی بررسی شد. آنها معادلات فرآیند را براساس انتقال حجم گشتاور و انرژی تعریف کردند و ویسکوزیته‌ی سیال غیرنیوتنی را براساس نرخ کرنش، دما و خواص ماده بدست آوردند. ناسار [7] و همکارانشان [11] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ AZ31B Mg را براساس مدل اولیری و مسائل انتقال حرارت مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی دمای منطقه‌ی جوش بالا می‌رود و با افزایش سرعت خطی کاهش می‌یابد. جی [8] و همکارانشان [12] اثر شکل پین ابزار FSW را بر روی جریان مواد بررسی کردند. هدف مولفان این مقاله، بررسی اثرات سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار بر روی تولید گرمای اصطکاکی فرآیند، توزیع دما، نرخ خنک شونده‌ی محلی اغتشاش براساس توسعه‌ی مدل‌های پیشین و ارتباط آن مدل‌ها با معادلات نفوذ شیمیایی مواد خمیری در هنگام اغتشاش در اتصال آلیاژ آلومینیوم AA1100 است.

## 2- شبیه‌سازی فرآیند

### 2-1- معادلات حاکم بر فرآیند

در تحلیل ریاضی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، گرمای اصطکاکی تولید شده توسط ابزار، نیروهای وارد شده بر قطعه‌کارها و آمیختن جریان مذاب اصلی‌ترین معادلات حاکم بر فرآیند به‌شمار می‌روند. اگر سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار در طول فرآیند ثابت باشد مقدار گرمای تولید شده نیز در خط جوش پایدار می‌ماند. در شبیه‌سازی 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 غیرنیوتنی (تراکم ناپذیر) فرض شده است، بدست می‌آید. براساس فرضیات فوق معادله‌ی پیوستگی را می‌توان بصورت رابطه 1 نوشت [9]:

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

در معادله فوق  $i$  بیانگر جهت‌های اصلی  $x$ ،  $y$  و  $z$  است و پارامتر  $u$  به سرعت جریان مواد خمیری اشاره دارد. معادله‌ی بقای مومنوم ابزار که در

- 1- Smit
- 2- North
- 3- Sidel
- 4- Reynolds
- 5- Zhang
- 6- Nandan
- 7- Nassar
- 8- Ji

2-2- شرایط مرزی و اولیه

B ضریب استفان - بولتزمن است.  $T_a$  دمای محیط و  $h$  ضریب انتقال حرارت در سطح است که در این شبیه‌سازی،  $\frac{300W}{m^2C}$  در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت در کف نیز بصورت رابطه 20 تعریف می‌شود که در آن  $h_b$  بیانگر ضریب انتقال حرارت در کف قطعه کار است که  $\frac{300W}{m^2C}$  در نظر گرفته شد.

$$k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{\text{Bottom}} = h_b(T - T_a) \quad (20)$$

در طول شبیه‌سازی، سرعت دورانی و خطی پین و شانه ابزار بصورت جداگانه انجام شد. به همین منظور مجموع سرعت‌های دورانی و خطی بصورت مولفه‌های جداگانه در سیستم مختصاتی کارترین تعریف شدند. شکل 1 تجزیه‌ی نیروهای دورانی و خطی را به یک سیستم واحد نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 1 سرعت پین ابزار به مولفه‌های  $u$ ،  $v$  و  $w$  مطابق رابطه‌های 21-23 تقسیم بندی می‌شود [25]:

$$u = (\omega R_p \sin \theta - U_1) \quad (21)$$

$$v = (\omega R_p \cos \theta) \quad (22)$$

$$w = k \left( \frac{\omega}{2\pi} \right) R_p \quad (23)$$

$k$  در معادله 23، بیانگر گام رزوه روی پین ابزار است که در صورت رزوه دار بودن پین در معادله اعمال می‌شود. بطور مشابه می‌توان مولفه‌های سرعت شانه ابزار را نیز بصورت رابطه‌های 24 و 25 نوشت [25]:

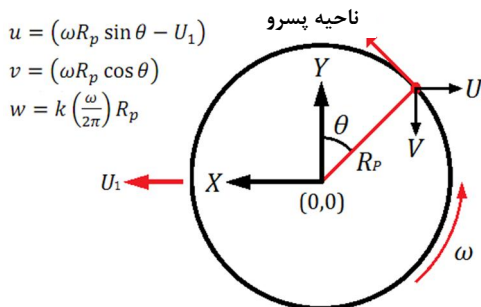
$$u = (\omega r \sin \theta) \quad (24)$$

$$v = (\omega r \cos \theta) \quad (25)$$

با توجه به یکپارچگی ابزار تعریف شده در این مدل، می‌توان مقدار  $r$  را فاصله بین سطح خارجی پین تا سطح خارجی ابزار در نظر گرفت.

2-3- مدل‌سازی و مش‌بندی فرآیند

براساس تعریف فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار این فرآیند با حرکت دورانی، ابتدا در خط اتصال نفوذ کرده و پس از آن حرکت رو به جلو را در امتداد خط جوش آغاز می‌کند و در انتها از محل اتصال خارج می‌شود. در این مقاله از حالت‌های اولیه و انتهایی ابزار صرف‌نظر شده است و تحلیل فرآیند در زمان پیشروی رو به جلوی ابزار انجام شد. در حالت پایدار و در هنگامی که ابزار رو به جلو حرکت می‌کند، گرمای اصطکاکی بطور یکنواخت و منسجم در سطح و درون دو قطعه کار ایجاد می‌شود. در این وضعیت شانه و پین ابزار به طور هم‌زمان، با سرعت برابر و در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌چرخند. در این مدل یک ابزار با پین مخروطی شکل که دارای 2 درجه انحراف نسبت به بردار نرمال فلزات پایه است، مورد استفاده قرار گرفته شد. موقعیت کف ابزار 0.2 میلی‌متر بالاتر از کف قطعه کار قرار گرفت. فلز پایه به عنوان سیال غیرنیوتنی، تراکم‌ناپذیر، با رفتار ویسکوپلاستیک و چگالی



شکل 1 تجزیه بردارهای سرعت در ابزار

در این مدل‌سازی، دمای هوا و دمای اولیه‌ی سیال 300 درجه‌ی کلونین در نظر گرفته شده است. ورود و خروج هر یک از سیال‌ها از نوارهای مرزی ورودی و نوارهای خروجی تعیین شده است. شرایط مکانیکی بین قطعه‌کارها و ابزار تنها در فصل مشترک بین آنها حاکم است و بقیه‌ی مرزها از این قانون مستثنی هستند. در طول فرآیند سرعت‌های دورانی ابزار 500، 630، 710 و 800 دور بر دقیقه و سرعت خطی جوشکاری 25، 40، 63 و 80 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شدند. گرمای اصطکاکی تولید شده در فصل مشترک ابزار و قطعه کارها ( $Q_i$ ) بصورت رابطه 13 تعریف شد [21]:

$$Q_i = [(1 - \delta)\eta\tau + \delta\mu_f P_N](\omega r - U_1 \sin \theta) \quad (13)$$

در معادله‌ی 13،  $\tau$  بیشینه تنش برشی در تسلیم و  $\theta$  زاویه با جهت منفی در راستای خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت تعریف می‌شود.  $\eta$  راندمان مکانیکی است که براساس پژوهش‌های قبلی 0.5 در نظر گرفته می‌شود [21، 22].  $\delta$  نسبت سرعت چرخش مواد به سرعت چرخشی در فصل مشترک ابزار و قطعه کار،  $\mu_f$  ضریب اصطکاک است که در این پژوهش 0.5 در نظر گرفته شده است.  $P_N$  نیز فشار عمودی وارد بر سطح است.

در طول فرآیند مقداری از گرمای تولید شده در فصل مشترک ابزار و قطعه کار به هدر می‌رود. این پدیده ناشی از انتقال حرارت بین ابزار و قطعه کار است. به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی، این پارامتر به صورت یک ضریب در معادله 16 قرار می‌گیرد. در نهایت معادله 13 در فصل مشترک ابزار و قطعه کارها به شکل رابطه 14 در خواهد آمد [21]:

$$q = \frac{(\sqrt{k\rho c_p})_{\text{workpiece}}}{(\sqrt{k\rho c_p})_{\text{workpiece}} + (\sqrt{k\rho c_p})_{\text{tool}}} Q_i \quad (14)$$

$Q_b$  در معادله 10، برابر نرخ گرمای تولید شده در واحد حجم می‌باشد که از تغییر شکل پلاستیک مواد در ناحیه خارج از فصل مشترک قطعه‌کار و ابزار تولید می‌شود [23]. این مقدار گرما در حدود 44 درصد حرارت کل فرآیند است که بصورت رابطه 15 تعریف می‌شود [23، 24]:

$$Q_b = \frac{d\dot{\epsilon}_p}{dV} = \beta\mu\dot{\phi} \quad (15)$$

در معادله‌ی 15،  $\mu$  ضریب اصطکاک بین سطوح،  $\beta$  کسری از کار تغییر شکل پلاستیک است که به صورت گرما تلف می‌شود و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش موثر است که بصورت رابطه 16 تعریف می‌شود [13]:

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}} \quad (16)$$

که در آن  $\epsilon_{ij}$  تانسور نرخ کرنش است که بصورت رابطه 17 تعریف می‌شود:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

و  $\dot{\phi}$  نیز بصورت رابطه 18 تعریف می‌شود [23، 24]:

$$\dot{\phi} = 2 \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \quad (18)$$

انتقال حرارت بین سطح قطعه کارها و محیط اطراف ابزار به صورت تشعشعی و رسانایی انجام می‌شود که آنها را نیز به صورت رابطه 19 می‌توان تعریف کرد:

$$-k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{\text{Top}} = B\epsilon(T^4 - T_a^4) + h(T - T_a) \quad (19)$$

3- بحث و نتیجه‌گیری

3-1- نرخ تولید حرارت

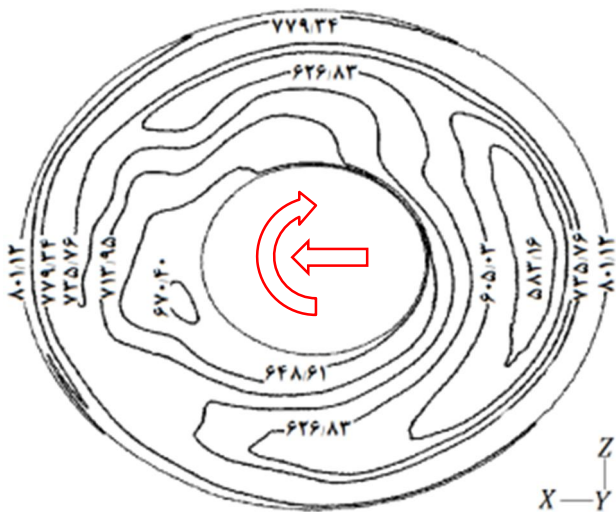
تولید حرارت در طول فرآیند FSW وابسته به عوامل مکانیکی فراوانی است. هدف از اصطلاح نرخ تولید حرارت در این پژوهش، بررسی سهم هر یک از قسمت‌های ابزار در تولید حرارت کلی است که در سرعت دورانی، سرعت خطی، افست و زاویه ابزار ثابت می‌شود. با فرضیات ذکر شده در قسمت‌های قبل می‌توان به این نتیجه رسید که بررسی نرخ تولید حرارت در هر یک از قسمت‌های ابزار وابسته به گستردگی سطح تماس آن ناحیه با قطعه کار است. شکل 4 حرارت تولید شده توسط شانه را در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه را پس از 10 ثانیه نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود بیشینه حرارت تولید شده در خارجی‌ترین قسمت شانه ابزار تولید شده که مقدار آن 801/12 درجه کلوین است. این مقدار حرارت برابر با 80 درصد دمای ذوب فلز پایه آلومینیومی می‌باشد. به دلیل زاویه داشتن ابزار، این مقدار گرمای تولید شده در قسمت جلو سطح درگیر بین شانه ابزار و قطعه کارها است و به دلیل فاصله داشتن پشت ابزار این حرارت در قسمت پشتی بسیار کمتر است.

شکل 5 نیز حرارت تولید شده توسط بدنه پین ابزار را پس از 10 ثانیه از شروع جوشکاری نشان می‌دهد. با مشاهده شکل مشخص می‌شود که حرارت تولید شده توسط پین ابزار بسیار کمتر از شانه ابزار است مقدار حرارت تولید شده توسط این ناحیه تقریباً 387 درجه کلوین است که نزدیک به 12 درصد دمای ذوب فلز پایه می‌رسد.

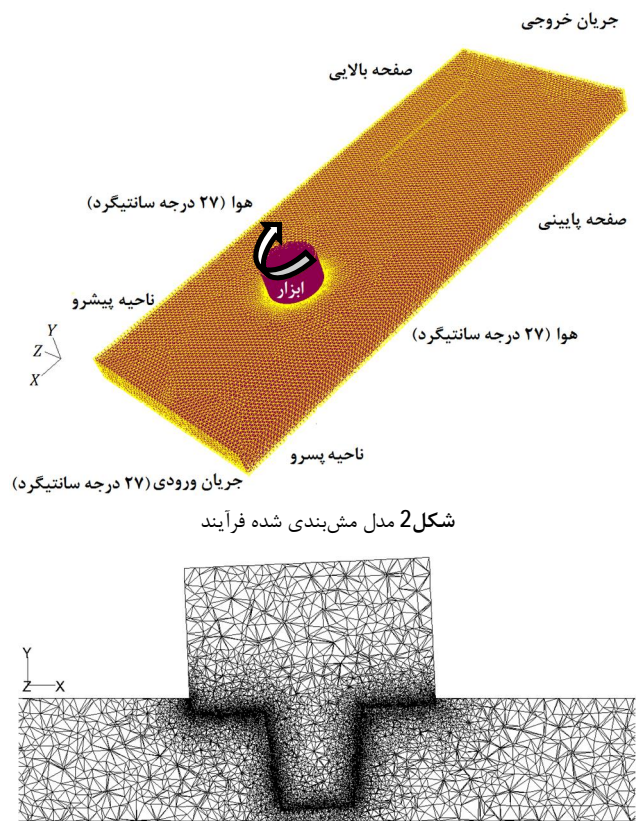
نتایج حاصل از بررسی پین ابزار نشان داد که کم‌ترین ناحیه تولید حرارت، در قسمت زیرین پین و نزدیک به کف قطعه کار است. علت این پدیده در دور بودن کف پین ابزار از منبع حرارت اصلی یعنی همان شانه ابزار است. مقدار حرارت تولید شده توسط این ناحیه 387 درجه کلوین است. بطورکلی می‌توان گفت که بیشینه حرارت تولید شده در این فرآیند توسط شانه ابزار ایجاد می‌شود و دلیل آن نیز سطح تماس بیش‌تر بین این ناحیه از ابزار نسبت به دیگر قسمت‌های آن است.

ماکزیمم درجه حرارت‌های تولید شده توسط شانه و پین ابزار در سرعت‌های دورانی و خطی مختلف در شکل 6 به نمایش گذاشته شده است.



شکل 4 حرارت تولید شده توسط شانه ابزار، اعداد برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند

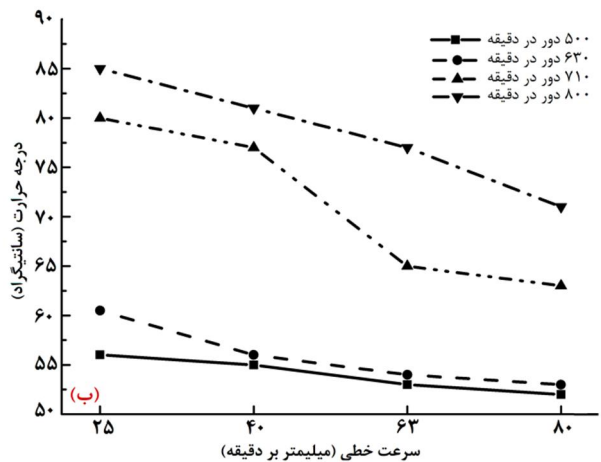
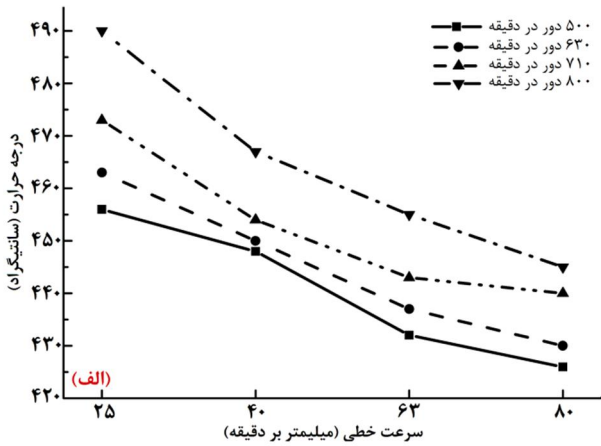
مطابق با آلیاژ آلومینیوم AA1100 تعریف شد. با توجه به اهمیت فصل مشترک ابزار و قطعه‌کارها، فضای اطراف ابزار و خود ابزار نیاز به تعریف دقیق‌تری نسبت به دیگر نقاط داشت. به همین خاطر، یک تابع اندازه که دارای اندازه‌ی کمینه، نرخ رشد و اندازه‌ی بیشینه است در تولید المان‌ها استفاده شد. پس از چندین مرتبه شبیه‌سازی به روش آزمون و خطا، بهترین حالت مش‌بندی برای انجام تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. حجم کوچک‌ترین المان تولید شده در مدل، 0,1 میلی‌متر مکعب و حجم بزرگ‌ترین المان 2/0 میلی‌متر مکعب بود. در نهایت 3864200 عدد المان با نرخ رشد 1/2 جهت شبیه‌سازی تولید شد. شکل 2 مدل مش‌بندی شده فرآیند و شکل 3 نمای عرضی ابزار مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به پارامترهای فرآیند در جدول 1 گنجانده شده است.



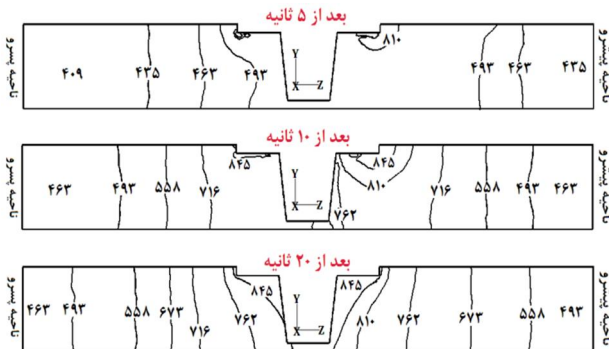
شکل 3 ابزار مش‌بندی شده

جدول 1 پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی فرآیند

مقدار	پارامترهای مورد استفاده
200	طول قطعه کار (میلی‌متر)
100	عرض قطعه کار (میلی‌متر)
3	ضخامت قطعه کار (میلی‌متر)
10	شعاع شانه ابزار (میلی‌متر)
3	شعاع بالایی پین ابزار (میلی‌متر)
2	شعاع پایینی پین ابزار (میلی‌متر)
2/74	ارتفاع پین ابزار (میلی‌متر)
2	زاویه انحراف ابزار (درجه)
800, 710, 630, 500	سرعت دورانی (دور در دقیقه)
80, 63, 40, 25	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)



شکل 6 حرارت تولید شده در سرعت‌های خطی و دورانی مختلف توسط (الف) شانه ابزار و (ب) بین ابزار



شکل 7 حرارت تولید شده توسط ابزار از زمان شروع تا رسیدن به حداکثر دما، اعداد برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند

همان‌طور که ملاحظه می‌شود توزیع حرارت در سمت پیشرو بیشتر از پسرو است. پارامترهای مکانیکی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اثرات فراوانی بر روی حرارت تولید شده در طول جوشکاری دارند. این پارامترها بطور مستقیم بر روی زمان رسیدن به دمای حداکثر، مقدار حرارت حداکثر و نرخ خنک شوندگی اثر می‌گذارند. نتایج حاصل از حل عددی معادلات مربوط به حرارت در شکل 9 نشان داده شده است.

بنابر تعریف پارامترهای فرآیند FSW در این پژوهش، حداکثر دماهای تولید شده در سرعت‌های دورانی 500، 630، 710 و 800 دور در دقیقه و در سرعت‌های خطی 25، 40، 63 و 80 میلی‌متر بر دقیقه محاسبه گردید. با

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی تولید حرارت بیش‌تر می‌شود و با افزایش سرعت خطی مقدار حرارت تولید شده در هر یک از اجزای ابزار کاهش می‌یابد.

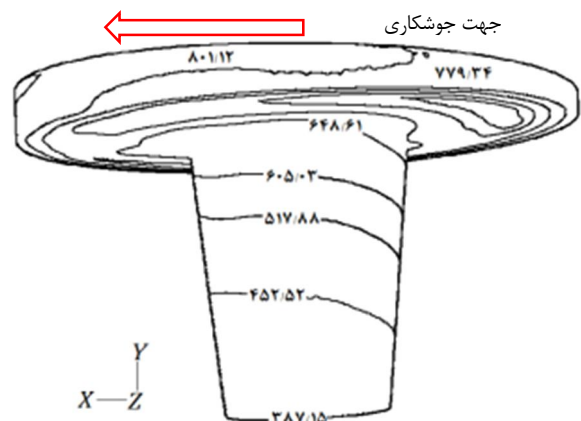
بیشینه حرارت تولید شده در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شد و کم‌ترین مقدار آن در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 80 میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد. با توجه به نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که سهم عمده حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط شانه ابزار تولید می‌شود. براساس شکل 6 می‌توان گفت که حداکثر درجه حرارت در سطح تماس شانه ابزار تقریباً 5 برابر سطح بین ابزار می‌باشد.

### 3-2- بررسی تولید و توزیع حرارت در منطقه اغتشاش

شکل 7 نتایج حاصل از شبیه‌سازی را برحسب کانتورهای عددی حرارتی از زمان شروع فرآیند تا زمان رسیدن به دمای حداکثر نشان می‌دهد. به دلیل اینکه جهت حرکت ابزار پادساعتگرد انتخاب شد، نفوذ حرارت نیز در سمت پیشرو بیشتر از سمت پسرو بود.

نتایج بدست آمده نشان داد که شروع توزیع حرارت همزمان با تولید حرارت توسط شانه ابزار از ناحیه بالایی اتصال است. همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد، به دلیل سطح تماس بیش‌تر شانه ابزار در مقایسه با دیگر قسمت‌های آن، نفوذ حرارت به درون قطعه کارها نیز از همین ناحیه شروع می‌شود. بعد از گذشت چند ثانیه و همزمان با چرخش ابزار، نفوذ حرارت به درون قطعه کار آلومینیومی بیش‌تر شده و دمای محیط اطراف ابزار بیشتر می‌شود و سبب می‌شود تا جریان گرما به نواحی پایینی قطعه کار نفوذ کند.

به دلیل سهم کمتر کف بین ابزار در تولید حرارت، انتشار گرما از این ناحیه به درون قطعه کار با کمی تاخیر انجام می‌شود. پس از توزیع حرارت از سمت شانه و بدنه بین ابزار، گرما به قسمت‌های پایینی کف ابزار می‌رسد و در اثر دوران ابزار و تولید حرارت بیشتر، نفوذ حرارت به زیر ابزار نیز بیشتر می‌شود. اندک حرارت اصطکاکی تولید شده توسط کف ابزار به حرارت وارد شده به قسمت‌های زیرین قطعه کار اضافه می‌شود. این مساله سبب گسترش بیش‌تر گرما در زیر قطعه کار می‌شود. از طرف دیگر می‌توان دید که گسترش حرارت در قسمت زیرین قطعه کار به سمت پیشرو بوده است. این روند در توزیع سطحی حرارت نیز مشاهده می‌شود. شکل 8 توزیع حرارت تولید شده در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه را بر روی سطح قطعه کار نشان می‌دهد.



شکل 8 حرارت تولید شده توسط بین ابزار، اعداد برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند

تولید شده در طول فرآیند کاهش می‌یابد. دلیل این مساله، فشار و گشتاور بیشتر ابزار در حرکت رو به جلو سریعتر و افزایش حرارت تولیدی ناشی از سرعت تغییر شکل پلاستیک بیش‌تر مواد در زیر ابزار است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که دمای بیشینه در سرعت خطی 80 میلی‌متر بر دقیقه، پس از 27 ثانیه ایجاد می‌شود. این مساله بدان معنی است بیشینه دمای اصطکاکی پس از حرکت روبه جلو ابزار به اندازه 36 میلی‌متر ایجاد می‌شود. زمان رسیدن به دمای بیشینه در سرعت‌های خطی 63، 40 و 25 میلی‌متر بر دقیقه، 37، 32 و 42 ثانیه است. این اعداد نشانگر این هستند که حداکثر حرارت اصطکاکی در سرعت‌های خطی ذکر شده پس از حرکت روبه جلو به اندازه 24/6، 33/6 و 17/5 میلی‌متر بدست می‌آید.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد با افزایش سرعت دورانی ابزار حداکثر دمای تولید شده افزایش می‌یابد. شکل 11 اثر سرعت دورانی ابزار نقطه P1 را بر روی زمان رسیدن به حداکثر حرارت تولید شده در سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت دورانی ابزار بر زمان رسیدن به دمای حداکثر تأثیری ندارد.

### 3-3- بررسی تنش و نرخ کرنش محل اتصال

بررسی تنش در شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت بدست آوردن سیلان مذاب امری ضروری است. نکته دیگر این است که بررسی تنش سیال به روش مکانیک سیالات محاسباتی، با مقدار واقعی آن اندکی تفاوت دارد. آنالیز دقیق تنش اعمال شده توسط ابزار اطلاعات مفیدی از فورج مواد خمیری می‌دهد که بر اساس آن بررسی شکل‌گیری عیوب راحت‌تر انجام می‌گیرد. شکل 12 توزیع تنش اعمال شده توسط ابزار را بر روی صفحه خارجی قطعه‌کار نشان می‌دهد که در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است.

به دلیل وجود زاویه انحراف بین محور ابزار و بردار نرمال صفحه خارجی قطعه‌کار، تنش اعمال شده در جلو ابزار بیشتر از پشت آن است. به اعتقاد بعضی از محققان این توزیع تنش ناشی از حرکت خطی ابزار به سمت جلو است که باعث تنش کششی در قسمت جلو و فشاری در پشت ابزار می‌گردد [4,26,27].

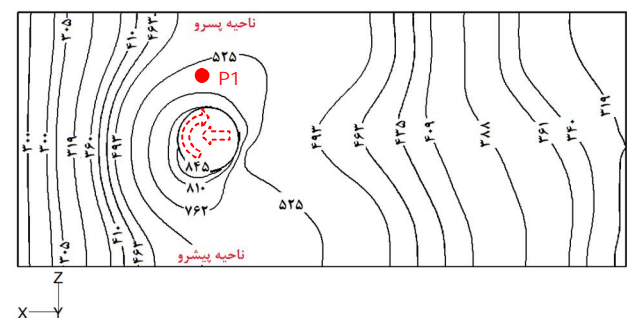
بر همین اساس توزیع تنش نسبت به محور ابزار اندکی نامتقارن است. بیشینه تنش ایجاد شده 18 مگاپاسکال بصورت کششی و کمینه مقدار آن 11 مگاپاسکال بصورت فشاری در پشت ابزار بود. با توجه به نتایج بدست آمده

افزایش سرعت خطی ابزار، حرارت اصطکاکی تولید شده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش حرکت رو به جلو ابزار، ماندگاری منبع حرارت در منطقه اغتشاش کاهش یافته و سبب از دست رفتن سریع حرارت می‌شود که نتیجه آن روند کاهشی حرارت تولید شده است. باتوجه به پارامترهای انتخاب شده در این پژوهش، بیشینه حرارت تولید شده در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه تولید می‌شود.

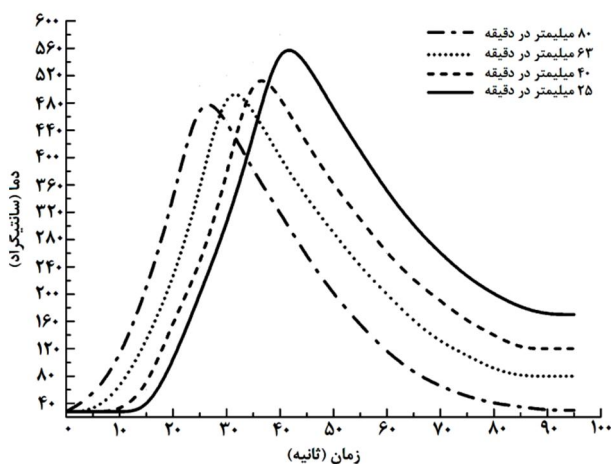
مقدار حرارت تولید شده در این جوشکاری 547 درجه سانتی‌گراد است. با کاهش سرعت دورانی در سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه، دمای حداکثر از 547 درجه سانتی‌گراد در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه به 488 درجه سانتی‌گراد در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه می‌رسد. با افزایش سرعت خطی از 25 میلی‌متر بر دقیقه تا 80 میلی‌متر بر دقیقه دمای تولید شده در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه از 547 به 486 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این روند کاهشی بطور مشابه در دیگر سرعت‌های دورانی نیز سبب کاهش دما می‌شود.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، یکی دیگر از پارامترهای مهم مورد توجه تغییرات زمانی رسیدن به دمای حداکثر است. متغیرهای سرعت خطی و دورانی علاوه بر اثر مستقیم بر روی مقدار دمای حداکثر بر زمان رسیدن به این دما نیز تأثیر دارند. بطور نمونه، اثر سرعت خطی ابزار بر روی تولید حرارت اصطکاکی در نقطه P1 و در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه در شکل 10 نشان داده شده است.

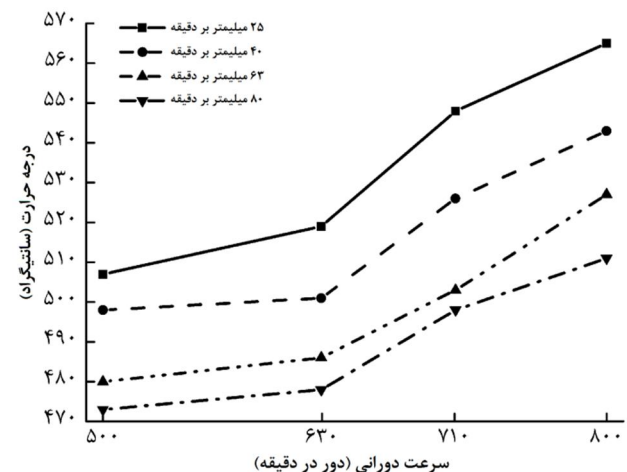
می‌توان در شکل 10 مشاهده کرد که با افزایش سرعت خطی از 25 میلی‌متر بر دقیقه تا 80 میلی‌متر بر دقیقه، زمان رسیدن به حداکثر دمای



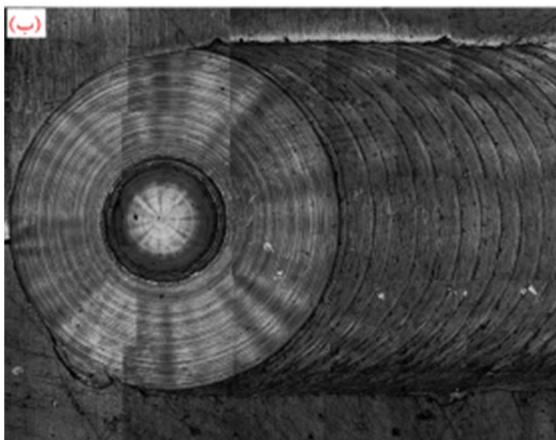
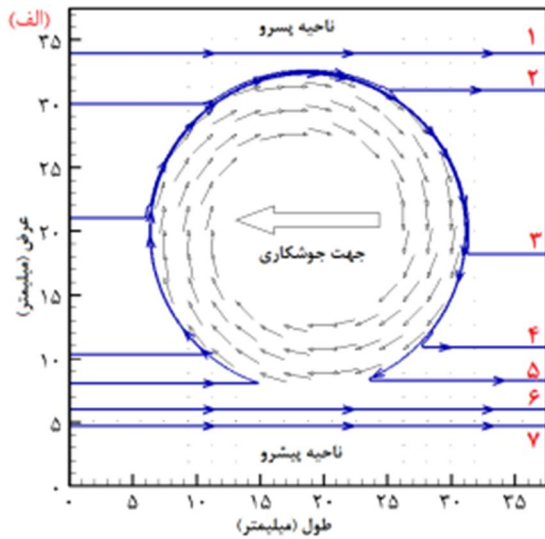
شکل 8 توزیع حرارت اصطکاکی در سطح خارجی قطعه‌کار، اعداد بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند



شکل 10 اثر سرعت خطی ابزار بر روی زمان رسیدن به حداکثر حرارت



شکل 9 حداکثر حرارت تولید شده در سرعت‌های خطی و دورانی مختلف

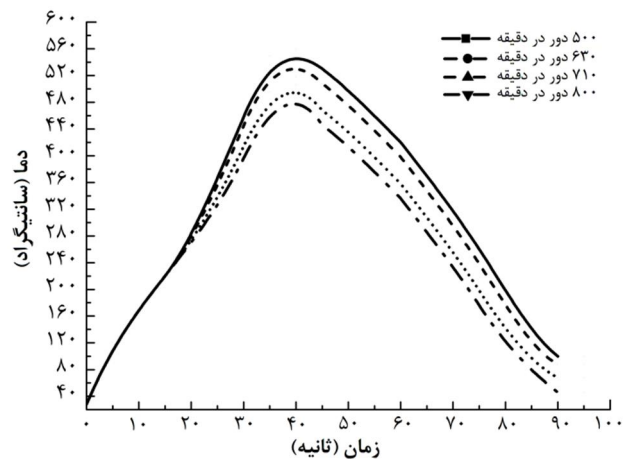


شکل 13 تغییرات جریان در اثر چرخش ابزار (الف) حل عددی و (ب) نمونه واقعی هستند. جهت این خطوط در واقع خلاف جهت حرکت خطی رو به جلو ابزار است. خطوط جریان در نزدیکی مرزهای بالا و پایین بدون تغییر باقی ماندند. جهت این خطوط در نزدیکی ابزار واژگون می‌شود و جریان خطوط تبدیل به یک جریان برگشتی به سمت ناحیه پیشرو می‌گردد. عیوب گرمی شکلی که در ناحیه پیشرو ایجاد می‌شود، ارتباط مستقیم با این جریان برگشتی دارد. در سرعت‌های دورانی کم که جریان برگشتی مواد ناکافی باشد، این عیوب در ناحیه پیشرو ایجاد می‌شوند [7]. بردارهای ریز که در مرکز قرار دارند، جهت چرخش ابزار را نشان می‌دهند و خطوطی که در خارج این دایره واقع شده‌اند، بیانگر منطقه‌ای از مواد می‌باشند که توسط شانه ابزار پیچانده شده‌اند. به دلیل تولید گشتاور بیشتر توسط شانه ابزار چرخش مواد خمیری در سطح خارجی شانه ابزار بیشتر از دیگر مناطق است. جریان برگشتی مواد که سبب تولید تجمع موضعی مواد خمیری در خط اتصال می‌شود در شکل (13-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است این جریان برگشتی بصورت گرداب گونه در سمت پیشرو شکل گرفته‌اند. گردابان سرعت که از 7 خط جریان شکل قبل حاصل شد، در بدست آوردن نرخ کرنش اتصال مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل در شکل 14 به نمایش گذاشته شد.

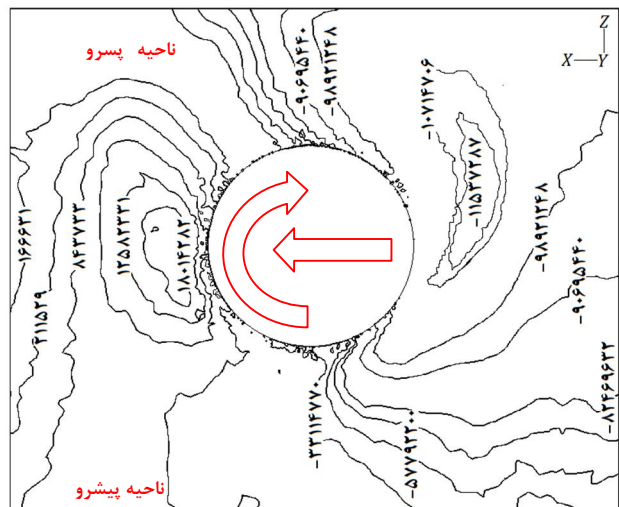
مقدار اعدادی که در پایین خط افقی قرار دارند، نرخ کرنش محل اتصال را در پشت ابزار نشان می‌دهند و اعدادی که در بالای خط افقی قرار دارند، نرخ کرنش محل اتصال را در جلو ابزار نشان می‌دهند. به دلیل اینکه جریان

می‌توان گفت مقدار تنش در ناحیه پسرو بیشتر فشاری و در ناحیه پیشرو بیشتر کششی است. بر همین اساس، به دلیل اینکه مواد پشت ابزار در ناحیه پیشرو تحت فشار کافی قرار نمی‌گیرند، مستعد شکل‌گیری عیوب می‌باشند [25].

این نوع رفتار حاصل از فشار بر روی تنش سیلان مواد نیز تاثیر مستقیم دارد. موادی که نزدیک به شانه ابزار هستند، نرخ کرنش و چرخه حرارتی بیشتری را متحمل می‌شوند و به همین دلیل تنش سیلان کمتری نیاز است تا مواد این نواحی به اغتشاش در آیند. بر همین اساس موادی که در قسمت‌های زیرین اتصال قرار دارند، نیاز به تنش سیلان بیشتری دارند تا به اغتشاش در آیند چون چرخه حرارتی و کرنشی کمتری را متحمل می‌شوند. بطور کلی مقدار حجم ماده جابجا شده متاثر از خواص فیزیکی فلز پایه، پارامترهای جوشکاری و نرخ انتقال حرارت درون ابزار است. در این پژوهش، به منظور بررسی جریان سطحی مواد خمیری، خطوط جریان مواد و نرخ کرنش از معادلات 16 و 17 استفاده شد. شکل 13 نتایج حاصل از حل عددی و نمونه واقعی تغییرات جریان را در اطراف ابزار از نمای بالا نشان می‌دهد. خطوط پیوسته که در شکل (13-الف) وجود دارند، بیانگر جهت حرکت ذرات جریان یافته مواد از سمت مجرای ورودی به سمت مجرای خروجی



شکل 11 اثر سرعت دورانی ابزار بر روی زمان رسیدن به حداکثر حرارت

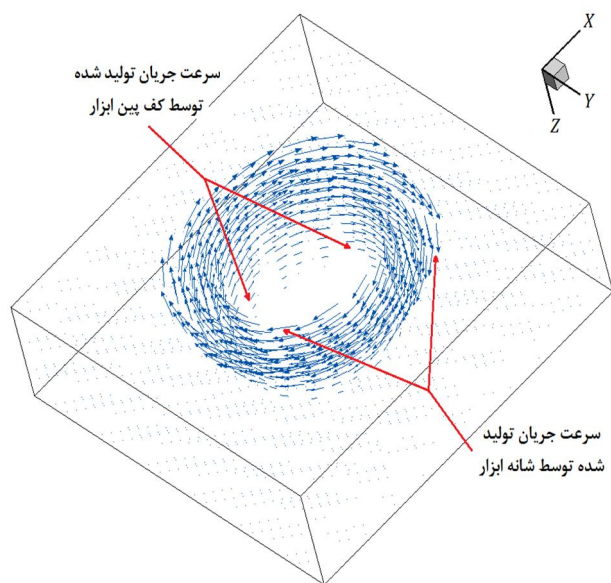


شکل 12 توزیع فشار اعمال شده در سطح، اعداد برحسب پاسکال می‌باشند

پایینی پین برویم، این اثر پررنگ تر می‌شود. این روند کاهشی مهم‌ترین پارامتر در شکل‌گیری جریان مواد توسط پین ابزار و هندسه‌ی منطقه اغتشاش است [9].

به منظور بررسی تغییرات جریان مواد خمیری در اطراف ابزار، نتایج حاصل از شکل قبل مورد استفاده قرار گرفت. کشیدگی مناسب مواد توسط ابزار در درون محل اغتشاش بیانگر تولید اتصال بی‌عیب و جریان داخلی کافی در محل اغتشاش است. در سرعت‌های دورانی کم حرارت تولید شده توسط ابزار نامناسب خواهد بود و سبب خواهد شد تا ترکیب مناسب مواد در محل اتصال به خوبی شکل نگیرد. همان‌طور که پیشتر ذکر شد جریان نامناسب مواد خمیری سبب شکل‌گیری انواع عیوب داخلی در منطقه اتصال می‌شود. بطور نمونه جریان داخلی منطقه اغتشاش توسط ابزار که در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 80 میلی‌متر در دقیقه ایجاد شده است، به همراه نمونه واقعی در شکل 16 به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به دلیل تولید حرارت ناکافی، جریان گرما به قسمت‌های پایینی اتصال وارد نشده است. این نوع نقص سبب شده تا مواد اطراف پین به خوبی به حالت خمیری نرسند و ابزار جریان کامل را در اطراف خود ایجاد نکند. بر همین اساس عیب تونلی ریشه جوش در منطقه اغتشاش ایجاد شود که یکی از نقص‌های شایع در اتصالات هم‌جنس است [29].

در بعضی شرایط، بخصوص هنگام تولید حرارت کم در سرعت‌های دورانی پایین‌تر و توزیع نامناسب مواد در منطقه اتصال باعث ایجاد عیوب بزرگتری در منطقه اغتشاش می‌شود. این عیوب در سرعت خطی کم که نیروی فورج ناکافی است پدید می‌آیند. علت ایجاد این نوع از عیوب، ورود کم مواد خمیری از جلو ابزار به منطقه اغتشاش است. بطور نمونه عیب لوله‌ای منطقه اغتشاش که در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه ایجاد شده است، به همراه نمونه واقعی در شکل 17 به نمایش گذاشته شده است. تولید حرارت زیاد و چرخش بیش از اندازه ابزار، سبب اغتشاش و جریان ناآرام مواد در منطقه جوشکاری می‌شود. این پدیده به واسطه ورود گرمای بیش از اندازه به محل جوشکاری سبب نرمی بیش از اندازه قطعه‌کارها و جریان متلاطم می‌شود که نتیجه آن شکل‌گیری عیب کانالی و یا سوراخ پین است.



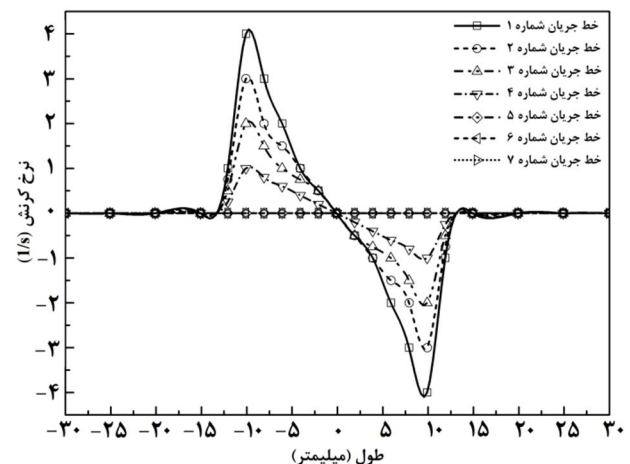
شکل 15 نمای بالایی جریان مواد توسط شانه و انتهای پین ابزار

مواد خمیری از سمت پسرو به سمت پیشرو است، گرادیان سرعت خطی مواد در جهت X ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این تغییرات تاثیر مستقیم در ضریب گرادیان سرعت  $(\frac{\partial u}{\partial x})$  دارد و سبب می‌شود تا نرخ کرنش نیز در جلو ابزار مقداری مثبت و در پشت ابزار مقداری منفی داشته باشد. این روند جریان در جهت Y بصورت عکس است. گرادیان سرعت خطی در این محور  $(\frac{\partial u}{\partial y})$ ، با افزایش Y در جلو ابزار، کاهش می‌یابد و با کاهش Y در پشت ابزار، افزایش می‌یابد. این پدیده سبب می‌شود تا نرخ کرنش روندی معکوس نسبت به حالت قبل داشته باشد. همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، برآیند مقدار کرنش در جهت X و Y،  $4S^{-1}$  در پشت ابزار و  $-4S^{-1}$  در جلو ابزار بدست آمد.

محدوده نرخ کرنش دیگر آلیاژهای آلومینیوم در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط دیگر محققان نیز بدست آمده است. مقدار نرخ کرنش محل اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA2524 بین  $9S^{-1}$  و  $-9S^{-1}$  و  $9S$  بدست آمد [13]. در تحقیق دیگر مقدار نرخ کرنش برای آلومینیوم AA1050 بین  $-2/7S^{-1}$  و  $2/7S^{-1}$  پیش بینی شد [28]. علت این اختلاف در نرخ کرنش، وابسته به خواص متالورژیکی فلزات پایه مختلف است. بگونه‌ای که اختلاف در ریزساختار، اندازه دانه های فلز پایه، تنش برشی و تنش تسلیم سبب اختلاف در نرخ کرنش محل اتصال در آلیاژهای مختلف می‌شود.

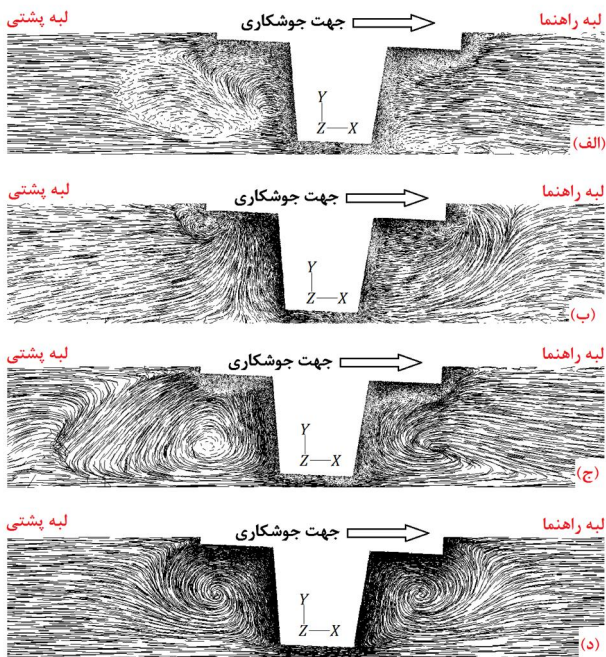
#### 3-4- بررسی جریان داخلی مواد

شکل 15 نمای بالا از بردارهای سرعت جابجایی مواد که توسط شانه و انتهای پین ابزار تولید شده‌اند را در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، هرچه از سطح شانه ابزار به سمت قسمت انتهایی پین ابزار نزدیک می‌شویم ناحیه ماده خمیری تغییر شکل یافته کاهش می‌یابد. به دلیل بیش‌تر بودن سطح درگیر شانه ابزار با قطعه کار، بیش‌ترین گشتاور اعمال شده به قطعه کار توسط شانه ابزار تولید می‌شود. کوچک بودن نسبت ضخامت ورق به طول و عرض آن سبب می‌شود تا حرارت تولید شده توسط شانه و پین ابزار بصورت افقی به سمت صفحات خارجی ورق نفوذ کند. اثر این نوع از انتقال حرارت در پین ابزار سبب می‌شود تا حرارت تولید شده به سمت صفحه بالایی بدنه ابزار برود و تمرکز حرارت در مناطق زیرین ابزار به وجود نیاید. این پدیده سبب تولید کاهش جریان مواد توسط پین ابزار می‌شود و هرچه از سمت شانه ابزار به سمت قسمت‌های



شکل 14 نرخ کرنش محل اتصال





شکل 18 جریان مواد خمیری در صفحه طولی اتصال در سرعت دورانی (الف) 500 دور در دقیقه، (ب) 630 دور در دقیقه، (ج) 710 دور در دقیقه و (د) 800 دور در دقیقه

با توجه به جهت چرخش ابزار که پادساعتگرد بود، ناحیه پسرو در نمای برش خورده عرضی اتصال در سمت چپ و ناحیه پیشرو در سمت راست قرار دارند. به علت جهت جریان دورانی مواد حول ابزار و از سمت پسرو به سمت پیشرو، اغتشاش مواد در سمت پیشرو بیشتر از ناحیه پسرو است. این مساله خود سبب بزرگتر شدن ناحیه پیشرو می‌شود و از طرف دیگر به احتمال شکل‌گیری عیوب را در این ناحیه افزایش می‌دهد. این مساله در برخی آزمایشات عملی نیز اثبات رسیده است که ابعاد ناحیه پیشرو به دو برابر ناحیه پسرو نیز می‌رسد [30]. شکل 20 نمونه عملی جوشکاری شده آلیاژ آلومینیوم AA1100 را نشان می‌دهد که در آن ابعاد منطقه پیشرو بزرگتر از پسرو است. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، می‌توان به این نتیجه رسید که ابعاد منطقه اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AA1100 تقارن محوری ندارند و سمتی که در ناحیه پیشرو قرار دارد اندکی بزرگتر از ناحیه پسرو است. از طرف دیگر مرز بین ناحیه تغییر شکل یافته پلاستیکی-حرارتی و ناحیه متأثر از حرارت دارای جریان ناآرام است و بر همین اساس احتمال تشکیل عیوب و ترک‌های ریز را در این ناحیه بالا می‌برد.

#### 4- نتیجه گیری

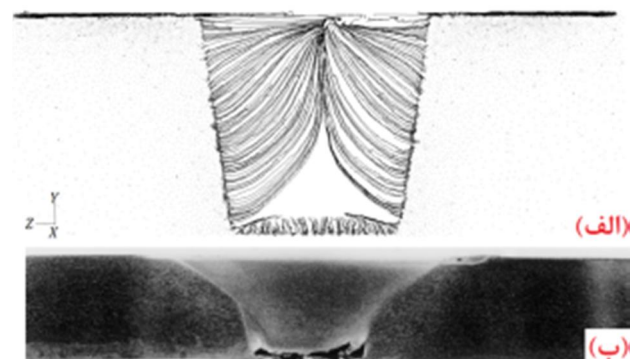
در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA1100 به روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شد. از بررسی تغییرات حرارت و جریان مواد در سرعت‌های دورانی و خطی مختلف نتایج حاصل بصورت زیر عنوان می‌گردد:

- 1- در بررسی حرارت حاصل از دوران ابزار مشخص شد که شانه ابزار به دلیل داشتن سطح تماس بیش‌تر با قطعه کار بیشترین مقدار حرارت را در مقایسه با پین ابزار دارد. نتایج مربوطه نشان داد که

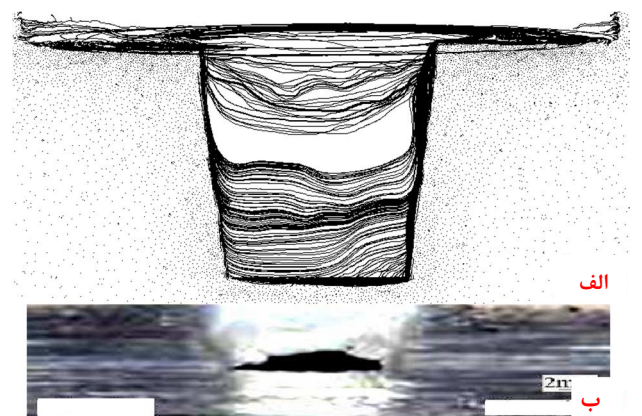
ابعاد منطقه اتصال یکی دیگر از پارامترهایی است که مستقیماً متأثر از جریان مواد است. شکل 18 جریان مواد را در صفحه طولی اتصال در زمان حرکت روبه جلو ابزار در سرعت‌های دورانی مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که جریان مواد خمیری در پشت ابزار بیشتر از جلوی آن است. علت این مساله کشیدگی و فورج مواد از سمت جلو به عقب ابزار است [32].

از طرف دیگر چون مواد در پشت ابزار مغتشش شده‌اند و هنوز به حالت جامد در نیامده‌اند، فورج مواد خمیری از جلو ابزار به ناحیه پشت سبب بیشتر شدن تغییرات در پشت ابزار می‌شود. نکته دیگری که از نتایج حاصل قابل استنباط است جهت فورج مواد است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در نمای طولی از خط اتصال و در تمامی سرعت‌های دورانی، مواد از ناحیه بالایی اتصال به سمت پایین کشیده می‌شوند. با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال افزایش می‌یابد. این پدیده سبب می‌شود تا این حرارت بیشتر به مناطق جلویی نفوذ کند و گستره بیشتری از جلوی ابزار به حالت خمیری برسد. در این وضعیت موادی که به حالت پلاستیکی درآمده‌اند در پهنه‌ی بیشتری مورد نیروی فورج و اغتشاش قرار می‌گیرند و این مساله خود سبب بزرگتر شدن منطقه اغتشاش و خط اتصال می‌شود. خطوط اتصالاتی که در سرعت دورانی 500 و 630 دور در دقیقه جوشکاری شدند دارای جریان نامنظم هستند. در این وضعیت احتمال تشکیل عیوب داخلی اتصال بالا می‌رود [32].

شکل 19 جریان مواد خمیری اطراف ابزار را در مقطع عرضی اتصال در سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه و سرعت‌های دورانی مختلف نشان می‌دهد.



شکل 16 شکل‌گیری عیب ریشه جوش در (الف) نمونه شبیه‌سازی شده، (ب) نمونه واقعی [30]



شکل 17 عیب لوله‌ای در (الف) نمونه شبیه‌سازی شده (ب) نمونه واقعی [31]

خمیری برسند. این مساله خود سبب بزرگتر شدن منطقه اغتشاش و خط اتصال می‌شود.

5- به علت جهت جریان دورانی مواد حول ابزار، از سمت پسر و سمت پیشرو، اغتشاش مواد در سمت پیشرو بیشتر از ناحیه پسر و است. این مساله خود سبب بزرگتر شدن ناحیه پیشرو می‌شود. از طرف دیگر مرز بین ناحیه تغییر شکل یافته پلاستیکی - حرارتی و ناحیه متأثر از حرارت دارای جریان ناآرام است و بر همین اساس احتمال تشکیل عیوب و ترک‌های ریز را در این ناحیه بالا می‌برد.

### 5- مراجع

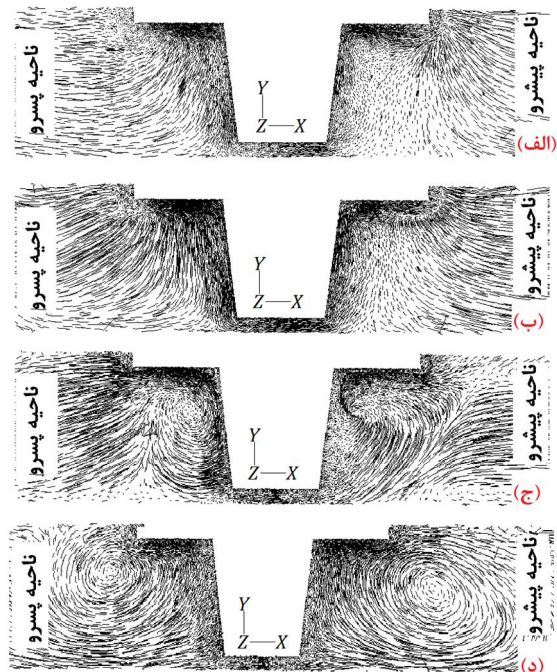
- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Church, P. Templesmith, C. Dawes, *International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.9*, 1991.
- [2] D. Santiago, S. Urquiza, G. Lombera, L. Vedia, 3D Modeling of Material Flow and Temperature in Friction Stir Welding, *Soldagem & Inspeção*, Vol. 14, No. 3, pp. 248-256, 2009.
- [3] R. Hamilton, D. MacKenzie, H. Li, Multi-physics simulation of friction stir welding process, *Engineering Computations: International Journal for Computer - Aided Engineering and Software*, Vol. 27, No. 8, pp. 967-985, 2010.
- [4] Z. Zhang, H. W. Zhang, A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, pp. 279-293, 2008.
- [5] C. Smith, G. Bendzsak, T. North, J. Hinrichs, J. Noruk, R. Heideman, Heat and Material Flow Modeling of the Friction Stir Welding Process, *11th International Conference on Computer Technology in Welding*, Detroit, United State, 1999.
- [6] T. North, G. Bendzsak, C. Smith, Material Properties Relevant to 3-D Modeling, *2nd International Friction Stir Welding Symposium*, Gothenburg, Sweden, 2000.
- [7] T. U. Seidel, A. P. Reynolds, Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, pp. 175-183, 2003.
- [8] W. Zhang, T. DebRoy, T.A. Palmer, J.W. Elmer, Modeling of ferrite formation in a duplex stainless steel weld considering non-uniform starting microstructure, *Acta Materialia*, Vol. 53, No.16, pp. 4441-4453, 2005.
- [9] R. Nandan, G. Roy, T. DebRoy, Numerical simulation of three dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37, No. 4, pp. 1247-1259, 2006.
- [10] R. Nandan, G. Roy, T. Lienert, T. DebRoy, Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, No. 5, pp.526-537, 2006.
- [11] H. W. Nassar, M. K. Khraisheh, Simulation of Material Flow and Heat Evolution in Friction Stir Processing Incorporating Melting, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 134, pp. 61-67, 2012.
- [12] S.D. Ji, Q.Y. Shi, L.G. Zhang, A.L. Zou, S.S. Gao, L.V. Zan, Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry, *Computational Materials Science*, Vol. 63, pp. 218-226, 2012.
- [13] A. Arora, Z. Zhang, A. Deb, T. DebRoy, Strains and strain rates during friction stir welding, *Scripta Materialia*, Vol. 61, pp. 863-866, 2009.
- [14] O. C. Zienkiewicz, I. C. Cormeau, Visco-Plasticity Solution by Finite-Element Process, *Archives of Mechanics*, Vol. 24, pp. 872-889, 1972.
- [15] T. Sheppard, D. S. Wright, Determination of Flow-Stress : Part 1 Constitutive Equation for Aluminum Alloys at Elevated-Temperatures, *Metals Technology*, Vol. 6, pp. 215-223, 1979.
- [16] T. Sheppard, D. S. Wright, Determination of Flow-Stress : Part 2 Radial and Axial Temperature Distribution during Torsion Testin, *Metals Technology*, Vol. 6, pp. 224-229, 1979.
- [17] T. Sheppard, A. Jackson, Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys, *Materials Science and Technology*, Vol. 13, pp. 203-209, 1997.

حداکثر درجه حرارت تولید شده توسط شانه ابزار تقریباً 5 برابر درجه حرارت تولیدی توسط پین ابزار می‌باشد.

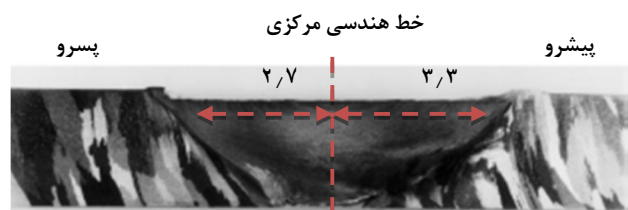
2- با توجه به پارامترهای انتخاب شده در این پژوهش، بیشترین دما (548 درجه سانتی‌گراد) در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 25 میلی‌متر بر دقیقه تولید شد و کمترین مقدار دما (452 درجه سانتی‌گراد) در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 80 میلی‌متر بر دقیقه تولید شد.

3- براساس نتایج شبیه‌سازی ماکزیمم تنش کششی در ناحیه جلوی ابزار و به اندازه 18 مگاپاسکال در ضمن جوشکاری بدست آمد. همچنین تنش ضمن جوشکاری در سمت پیشرو کششی و در سمت پسر و به صورت فشاری پیش‌بینی شد.

4- نتایج حاصل از بررسی جریان مواد نشان داد که جریان مواد خمیری در پشت ابزار بیشتر از جلوی آن است. علت این مساله کشیدگی و فورج مواد از سمت جلو به عقب ابزار است. با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال افزایش یافته و سبب خواهد شد تا گستره بیشتری از مواد جلوی ابزار به حالت



شکل 19 جریان مواد خمیری در مقطع عرضی اتصال در سرعت دورانی (الف) 500 دور در دقیقه (ب) 630 دور در دقیقه، (ج) 710 دور در دقیقه و (د) 800 دور در دقیقه



شکل 20 اتصال آلومینیوم AA1100 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [33]

- geometry on the thermo-mechanical and microstructural behaviour in friction stir welding of AA5086, *Proc. IMechE Part C: J. Mechanical Engineering Science*, Vol. 225, pp. 1-16, 2010.
- [28] K. Masaki, Y. S. Sato, M. Maedab, H. Kokawaa, Experimental simulation of recrystallized microstructure in friction stir welded Al alloy using a plane-strain compression test, *Scripta Materialia*, Vol. 58 pp. 355-360, 2008.
- [29] S. Rajakumar, V. Balasubramanian, Correlation between weld nugget grain size, weld nugget hardness and tensile strength of friction stir welded commercial grade aluminium alloy joints, *Materials and Design*, Vol. 34 pp. 242-251, 2012.
- [30] L. E. Murr, G. Liu, J. C. McClure, Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100, *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 16, pp. 1801-1803, 1997.
- [31] S. Rajakumar, V. Balasubramanian, Multi-Response Optimization of Friction-Stir-Welded AA1100 Aluminum Alloy Joints, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 6, pp. 809-822, 2012.
- [32] L.E. Murr, R.D. FloresFlores, O.V. McClure, J.C. Liu, G. Brown, Friction-stir welding: microstructural characterization, *Materials Research Innovations*, Vol. 1, pp. 211-223, 1998.
- [33] L.E. Murr, G. Liu, J.C. McClure, A TEM study of precipitation and related microstructures in friction-stir-welded 6061 aluminum, *Journal of Materials Science*, Vol. 33, p.p.1243-1255, 1997.
- [18] C. Zener, J. H. Hollomon, Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel, *Journal of Applied Physics*, Vol. 15, pp. 22-32, 1944.
- [19] J. R. Davis, *ASM Handbook: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material*, Vol. 2, Ohio, USA, 1990.
- [20] E. A. Brandes, G. B. Brool, *Smithells Metals Reference Book*, 8 Edition, Oxford, UK, 2004.
- [21] R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert, T. Debroy, Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel, *Acta Materialia*, Vol. 55, pp. 883-895, 2007.
- [22] X.K. Zhu, Y.J. Chao, Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 263-272, 2004.
- [23] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Second Edition, pp. 87-89, Oxford, Clarendon Press, 1959.
- [24] R. Ayer, H.W. Jin, R.R. Mueller, S. Ling, S. Ford, Interface structure in a Fe-Ni friction stir welded joint, *Scripta Materialia*, Vol. 53, pp. 1383-1387, 2005.
- [25] B. C. Liechty, B. W. Webb, Modeling the frictional boundary condition in friction stir welding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1474-1485, 2008.
- [26] R. Nandan, B. Prabu, A. De, T. Debroy, Improving Reliability of Heat Transfer and Materials Flow Calculations during Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys, *Welding Journal*, Vol. 86, pp. 313-322, 2007.
- [27] H. Jamshidi Aval, S. Serajzadeh, A. H. Kokabi, The influence of tool