



## بررسی اثر پارامترهای فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای روی نمونه‌های ساخته شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

وحید عابدینی<sup>۱\*</sup>، میلاد آقایی عطار<sup>۲</sup> و پرهام تمیمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

<sup>۲</sup> کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸

### چکیده

یکی از روش‌های اتصال انواع آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. امروزه شکل‌دهی ورق‌های حاصل از این روش، مورد توجه قرار گرفته است. به منظور ایجاد شکل‌های پیچیده با عمق زیاد که با روش سنتی امکان پذیر نیست، از روش شکل‌دهی تدریجی استفاده می‌شود. روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، روشی انعطاف پذیر برای تولید کم و ساخت مدل اولیه است. در این مقاله به مطالعه تجربی فرآیند شکل‌دهی تدریجی روی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. در گام اول، اثر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر خواص مکانیکی ناحیه جوش در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بررسی و پارامترهای مطلوب استخراج شد. در گام بعدی، اثر روانکار، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و مسیر ابزار بر میزان کاهش ضخامت (نازک شدگی)، زبری و عمق شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، روانکار و مسیر ابزار، میزان عمق شکل دهی را تا ۱/۶ برابر افزایش می‌دهد؛ همچنین با استفاده از این دو پارامتر اثرات کاهش ضخامت و کیفیت سطح نیز بهبود می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی؛ شکل پذیری؛ فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای؛ کاهش ضخامت، کیفیت سطح.

## Investigation of Single Point Incremental Forming Parameters Effect on the Blanks Fabricated by Friction Stir Welding

V. Abedini<sup>1,\*</sup>, M. Aghaee Attar<sup>2</sup>, P. Tamimi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

<sup>2</sup> Bachelor of Science, Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

### Abstract

Friction stir welding (FSW) process is a method for joining the aluminum alloys. Nowadays, it is considered to form the blanks fabricated by this method. Single point incremental forming (SPIF) is used to manufacture complex shapes with high depth which is not possible with traditional methods. SPIF is a flexible method for low production or manufacturing a prototype model. In this paper, experiments are performed on the blanks fabricated by FSW process to study the effect of the SPIF parameters. The first step conducted to investigate the influence of rotational speed and feed rate of friction stir welding process on mechanical properties of AA 6061-T6. The output of this step is the appropriate samples for next step. In the next step, the effect of the lubrication, rotational speed, feed rate and tool trajectory has been studied on thickness reduction (thinning), surface roughness and formability. The results show the lubricant and tool trajectory increase the depth of formation up to 1.6 times. Also, these two parameters improve the effects of thickness reduction and surface quality.

**Keywords:** Friction Stir Welding; Formability; Single Point Incremental Forming; Surface Roughness; Thickness Reduction.

## ۱- مقدمه

با توجه به کاربردهای فراوان روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نیاز به ایجاد شکل‌های پیچیده با عمق زیاد در قطعاتی احساس می‌شود که با این روش به هم متصل شده‌اند. از این رو به دلیل محدودیت‌های روش‌های شکل‌دهی سنتی، شکل‌دهی تدریجی می‌تواند جایگزین مناسبی باشد [۱]. شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های شکل‌دهی فلزات برای تولید به تعداد کم است. این روش برخلاف سایر روش‌های شکل‌دهی سنتی، نیاز به قالب ندارد. این فرآیند تحت تاثیر پارامترهایی نظیر، مسیر ابزار، جنس ورق، ابعاد ابزار، سرعت‌های شکل‌دهی، روانکار و غیره است. برای تولید با خواص مطلوب، کیفیت بالا و هزینه پائین، تعیین مقادیر بهینه پارامترهای این فرآیند ضروری است [۲]. تفاوت عمده روش شکل‌دهی تدریجی با سایر روش‌های سنتی، این است که ناحیه تغییر شکل کاملاً موضعی بوده و ورق اولیه به داخل ناحیه شکل‌دهی کشیده نمی‌شود. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، فلنج تحت تغییر شکل‌های صفحه‌ای بوده و در راستای شعاعی تنش‌های کششی و در راستای ضخامت، تنش‌های فشاری اعمال می‌شوند [۳]. در پیشینه تحقیقات، به ترتیب به بررسی مقالات مرتبط با جوشکاری اصطکاکی، شکل‌دهی تدریجی و شکل‌دهی مرتبط با جوشکاری اصطکاکی، شکل‌دهی پرداخته شده است. رامولو و همکاران [۴]، به بررسی تاثیر قطر شانه ابزار و عمق نفوذ روی حد شکل‌دهی ورق‌های AA6061-T6 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ورق‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده نسبت به ورق‌های بدون جوش، تحت شرایط مختلف، حد شکل‌پذیری بالاتری را نشان می‌دهند و با افزایش قطر شانه و عمق نفوذ، شکل‌پذیری این ورق‌ها افزایش یافته و پراکندگی ضخامت یکنواخت می‌شود. پراکندگی ضخامت در ناحیه پسرو و پیشرو یکسان نبوده و گرادیان نازک شدگی در ناحیه پسرو بیشتر دیده می‌شود. شندج و پوجاری [۵]، تاثیر پارامترهای قطر ابزار، گام عمودی و نرخ پیشروی روی عمق شکست و پراکندگی ضخامت در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق‌های ساده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوجی، نتیجه گرفتند که قطر ابزار، بیشترین تاثیر را روی ضخامت نهایی و گام عمودی، بیشترین تاثیر را روی عمق شکست دارد. سیلوا و

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ یکی از آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر است. این آلیاژ در مواردی به کار می‌رود که نیاز به قابلیت شکل‌پذیری، مقاومت به خوردگی و استحکام بالا است. به دلیل خواص فیزیکی این آلیاژ، جوشکاری آن به روش ذوبی با مشکلاتی همراه است، به همین جهت روش‌های جوشکاری در حالت جامد توصیه می‌شوند. در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال در مقایسه با روش‌های ذوبی در دمایی پائین‌تر از نقطه ذوب انجام می‌شود. در این روش ابزار در شروع جوشکاری، همراه با دوران وارد قطعه می‌شود. با افزایش حرارت، مواد نرم شده و عمل جریان مواد به دور پین صورت می‌گیرد. جریان مواد از ناحیه پسرو<sup>۱</sup> به ناحیه پیشرو<sup>۲</sup>، توسط همین حرکت دورانی صورت می‌گیرد. در شکل ۱ تصویری از انجام فرآیند روی نمونه مورد آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه مورد آزمایش

<sup>1</sup> Retreating Side  
<sup>2</sup> Advancing Side

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده و در گام بعدی، فرآیند شکل‌دهی تدریجی شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است، جهت تعیین درصد ترکیب شیمیایی عناصر و خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در آزمایش H13 و AA 6061-T6، از آزمون‌های تست کشش و کوانتومتری توسط دستگاه‌های STM-400 شرکت سنتام و دستگاه کوانتومتری آکسفورد فاندری مستر بهره گرفته شد.

## ۲-۱ روش آزمایش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

برای انجام آزمایش از ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. خواص مکانیکی و درصد ترکیب شیمیایی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

خواص مکانیکی	مقادیر فلز پایه
استحکام کششی نهایی	240 مگاپاسکال
استحکام تسلیم	213 مگاپاسکال
درصد ازدیاد طول	9%
سختی (بر حسب ویکرز)	107

جدول ۲- درصد ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

	Ti	Zn	Cr	Mg	Mn
عناصر شیمیایی	0.03	0.25	0.25	0.1	0.15
۶۰۶۱		Fe	Si	Al	
	0.40	0.70	0.8	باقی	

ورق‌ها به صورت نمونه‌های مستطیلی شکل در ابعاد  $100 \times 250$  میلی‌متر، در جهت نورد بریده و سپس محل برش به منظور حذف اسیدها، ناخالصی‌ها و چربی‌ها از ناحیه جوش، توسط محلول اسید کلریدریک تمیز شد. سپس تمامی نمونه‌ها داخل فیکسچر به منظور جلوگیری از جابجایی در

همکاران [۶] به بررسی فرآیند شکل‌دهی تدریجی روی ورق‌های حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آنها اثر ورق محافظ<sup>۱</sup> و جهت جوش بر میزان شکل‌پذیری را مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان کردند، در صورتی حداکثر زاویه دیواره<sup>۲</sup> قابل دستیابی است که جهت جوش بر جهت نورد منطبق باشد؛ همچنین در این حالت، ترک و پارگی در خارج از ناحیه جوش رخ می‌دهد. گولاتی و همکاران [۲]، به بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر زاویه دیواره و زبری سطح در ورق‌های ساده پرداخته و نتیجه گرفتند که زبری سطح با کاهش ضخامت ورق، نرخ پیشروی، گام عمودی و سرعت چرخشی ابزار، کاهش و با افزایش شعاع ابزار، افزایش می‌یابد. آژودو و همکاران [۷]، تاثیر روانکارهای مختلف را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی بررسی و بیان کردند، کیفیت سطح نهایی تحت تاثیر رابطه بین ویسکوزیته روانکار و سختی ورق شکل‌دهی است؛ به طوری که برای مواد نرم تر از جمله آلیاژهای آلومینیوم ویسکوزیته بالاتر، کیفیت سطح بهتری را نتیجه می‌دهد.

بررسی تحقیقات قبلی نشان داد که اگرچه مطالعات فراوانی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و شکل‌دهی تدریجی به صورت مجزا انجام شده، اما هنوز فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های جوشکاری شده به میزان اندکی مورد توجه قرار گرفته است. به نظر می‌رسد، ترکیب فرآیند شکل‌دهی تدریجی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روشی نوین برای تولید قطعات پیچیده با عمق زیاد باشد. تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های گذشته در بررسی همزمان پارامترها و متغیرهای مختلف روی میزان شکل‌دهی و نازک‌شدگی و کیفیت سطح است و تعامل پارامترها با یکدیگر، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی، روانکار و مسیر ابزار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های جوشکاری شده مطالعه گردید.

## ۲- شرح آزمایش

از آنجا که مقاله حاضر ترکیب دو فرآیند مجزا است، در این بخش در گام اول، به شرح مواد و تجهیزات مورد استفاده در

<sup>1</sup> Dummy Sheet

<sup>2</sup> Wall Angle

جدول ۳- مشخصات ابعادی ابزار

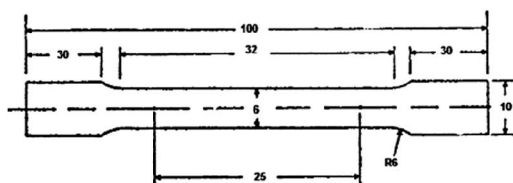
جنس ابزار	قطر پین (mm)	قطر شولدر (mm)	ارتفاع پین (mm)
فولاد گرمکار H13	4	12	1.8

جدول ۴- درصد ترکیب شیمیایی H13 فولاد ابزار گرمکار [۱۰]

عناصر شیمیایی	V	Cr	Si	Mn	C	Mo
H13	0.95	4.8	0.96	0.4	0.35	1.13

جدول ۵- شرایط آزمایش جوشکاری

شماره آزمایش	زاویه‌ی انحراف (درجه)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	عمق نفوذ (mm)
1	2.5	100	1250	1.885
2	2.5	80	1250	1.885
3	2.5	80	1600	1.885
4	2.5	100	1600	1.885



شکل ۲- ابعاد نمونه آزمون کشش [۹]

پارامترهای مورد مطالعه در این مقاله عبارتند از: سرعت دورانی، سرعت پیشروی، روانکار و مسیر ابزار. بدین منظور برای هر یک از پارامترها با انجام آزمایش‌ها مقدماتی، ۲ سطح در نظر گرفته شد. با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، تعداد آزمایش‌ها به ۸ آزمایش تقلیل یافت. اثر پارامترهای ورودی بر نازک شدگی و عمق شکل‌دهی بررسی شد. جدول ۶ شرایط آزمایش را نشان می‌دهد. در این مقاله

جهت عرضی و طولی قرار گرفت. برای انجام فرآیند جوشکاری، یک ابزار غیر مصرفی از جنس فولاد گرمکار استفاده شد. به منظور تأمین سختی بیشتر با انجام عملیات حرارتی، سختی آن به ۵۵ راکول سی رسید. مشخصات ابعادی ابزار و درصد ترکیب شیمیایی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. از یک ماشین فرز برای انجام آزمایش استفاده شده است. اتصال به صورت لب به لب و در راستای نورد فلز پایه انجام شد. رامولو و همکاران [۸]، تاثیر قطر شولدر، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و عمق نفوذ را روی آلیاژ 6061-T651 بررسی و محدوده خوبی را به منظور دستیابی به جوش بی عیب از لحاظ میکروساختار بیان کردند؛ بنابراین، جهت دستیابی به شرایط مناسب برای شکل دهی، فرآیند جوشکاری روی چهار نمونه انجام شد. زاویه انحراف برای کمک به اغتشاش بیشتر ماده، جلوگیری از بیرون ریختن مواد از حوضچه جوش و افزایش نیروی فشاری استفاده شده است. جدول ۵ شرایط آزمایش را نشان می‌دهد. در این مقاله از آزمون کشش با سرعت ۶ میلی متر بر دقیقه به منظور مقایسه رفتار مکانیکی نمونه‌ها استفاده شده است. نتایج شامل، تنش نهایی و درصد ازدیاد طول است. ابعاد نمونه‌های تست کشش طبق استاندارد ASTM\_E8 [۹] بر حسب میلی‌متر در شکل ۲ نشان داده شده است.

## ۲-۲- روش آزمایش شکل دهی تدریجی

شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای توسط یک دستگاه فرز CNC سه محور جانفورد، فیکسچر و ابزار سر نیمه کروی از جنس فولاد سرد کار با نام استاندارد DIN 1.2080 با قطر ۱۰ میلی‌متر که در شکل ۳ نشان داده شده است، انجام شد. ابزار جهت دستیابی به سختی بیشتر، عملیات حرارتی شده و سختی آن به ۵۵ راکول سی رسید. برای انجام فرآیند نیاز به مدل‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر (CAD/CAM) است؛ لذا، طراحی قطعه نهایی توسط نرم افزار کتیا انجام شد؛ همچنین به منظور استخراج کدهای برنامه نویسی، از بخش ماشینکاری کتیا استفاده شده است. سپس ابزار در امتداد مسیرهای تعریف شده روی ورق، مدل مورد نظر را ایجاد می‌کند. استراتژی حرکت ابزار در شکل ۴ نشان داده شده است. ابعاد شکل نهایی (هرم ناقص) با زاویه دیواره ۶۵ درجه و ماکزیمم عمق شکل‌دهی ۸۰ میلی‌متر طراحی شده است.

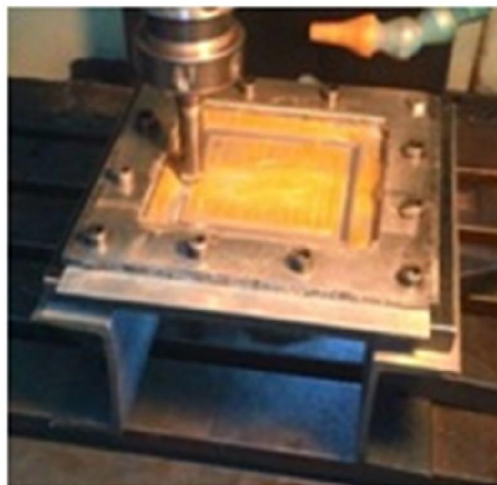
پارامترهای ثابت فرآیند عبارت‌اند از: قطر ابزار، زاویه دیواره و گام عمودی که به ترتیب برابر با ۱۰ میلی‌متر، ۶۵ درجه و ۰/۵ میلی‌متر می‌باشند.

زبری سطح در راستای عمود بر جهت جابجایی ابزار، توسط دستگاه زبری سنج ساخت شرکت ماهر مدل مارسرف اندازه‌گیری شد. برای سنجش زبری از پارامتر  $R_q$  استفاده شده است. با توجه به شرایط اصطکاکی متفاوت در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، زبری باید در چهار ناحیه اصلی بالایی<sup>۱</sup>، کف<sup>۲</sup>، لغزشی<sup>۳</sup> و چرخشی<sup>۴</sup>، مطابق شکل ۵ اندازه‌گیری شود. تعریف نواحی لغزش و چرخش به دلیل عملکرد متفاوت ابزار سر کروی هنگام شکل‌دهی تدریجی است؛ زیرا در آزمایش‌ها مشاهده گردید که در ناحیه‌ای موسوم به ناحیه لغزش چون هنوز ابتدای فرآیند شکل‌دهی است و عمق شکل‌دهی کم است، لذا اصطکاک پایین بوده و حرارت نیز کم است؛ به همین دلایل ابزار روی ورق سر خورده و می‌لغزد؛ اما با ادامه فرآیند شکل‌دهی و افزایش عمق آن، اصطکاک بین سطح سر کروی ابزار و ورق به تدریج زیاد شده و باعث چرخاندن ابزار می‌شود که این ناحیه به ناحیه چرخش موسوم گردید. همچنین زبری در دو ناحیه اطراف عرض و روی خط جوش اندازه‌گیری شده تا بتوان مقایسه‌ای بین این دو ناحیه داشت.

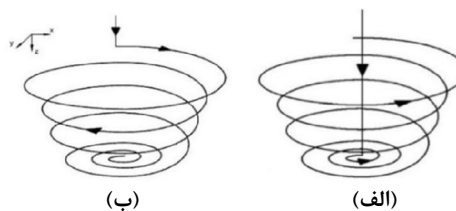
همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، اندازه‌گیری ضخامت در هر ۴ نقطه به وسیله میکرومتر انجام شد. اندازه‌گیری‌ها با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر است. ضخامت سنجی هم روی عرض جوش و هم روی قسمت بدون جوش انجام شده تا بتوان مقایسه‌ای بین نازک‌شدگی در این دو محل بیان کرد. میزان نازک‌شدگی  $T_h$  در محیط ظرف محاسبه و در رابطه (۱) [۱۱] نشان داده شده است.

$$T_h = \frac{t_0 - t}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

که  $t_0$  و  $t$  به ترتیب ضخامت اولیه و ضخامت فعلی مکان اندازه‌گیری ضخامت می‌باشند.



شکل ۳- فیکسچر شکل‌دهی تک نقطه‌ای



شکل ۴- مسیر ابزار الف) مسیر ابزار Z ثابت و ب) مسیر ابزار مارپیچ

جدول ۶- شرایط آزمایش شکل‌دهی تدریجی

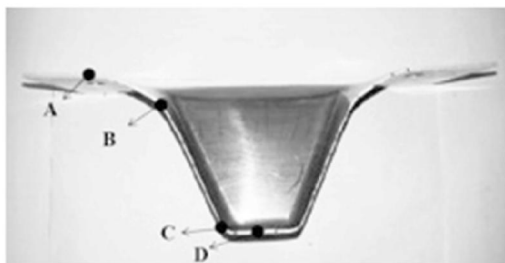
آزمایش	روانکار	سرعت پیشروی	سرعت دورانی	مسیر ابزار
1	گریس	300	0	Z ثابت
2	ندارد	300	0	مارپیچ
3	گریس	800	0	مارپیچ
4	ندارد	800	0	Z ثابت
5	ندارد	300	300	Z ثابت
6	گریس	300	300	مارپیچ
7	گریس	800	300	Z ثابت
8	ندارد	800	300	مارپیچ

<sup>1</sup> Superior

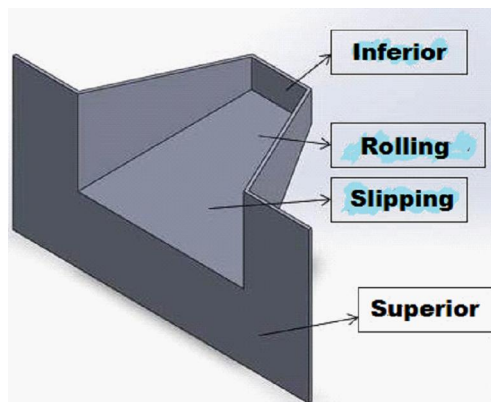
<sup>2</sup> Inferior

<sup>3</sup> Slipping

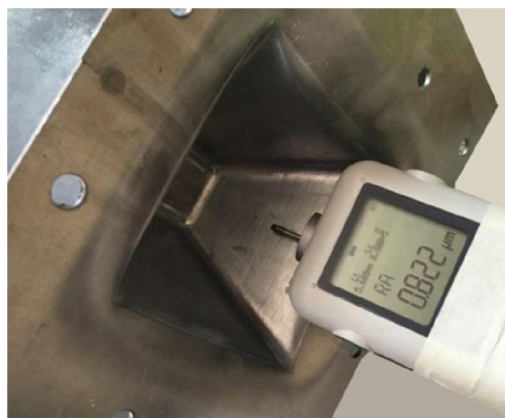
<sup>4</sup> Rolling



شکل ۶- نواحی اندازه‌گیری ضخامت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- (الف) نواحی اندازه‌گیری زبری، (ب) اندازه‌گیری توسط زبری سنج و (ج) زبری در عمق شکل دهی

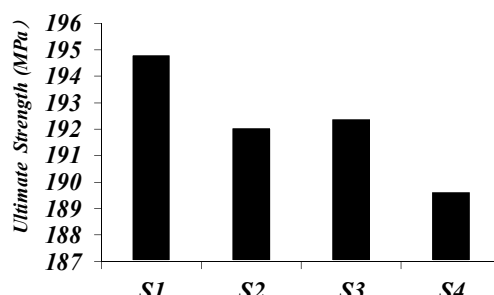
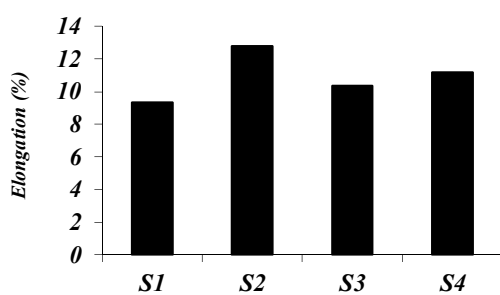
### ۳- نتایج و بحث

در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در سرعت‌های دورانی بالا و سرعت‌های پیشروی پائین، جریان مواد به دلیل حرارت زیاد افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، امکان ایجاد ذوب در ناحیه اتصال و خروج مذاب از محدوده درز اتصال وجود دارد؛ بنابراین احتمال ایجاد عیوب تونلی، حفره و مک می‌باشد؛ همچنین در سرعت‌های دورانی پائین و پیشروی بالا، به دلیل پایین بودن حرارت ورودی به ورق، جریان ماده از ناحیه پسرو به پیشرو به طور کامل انجام نمی‌شود. این مسئله، باعث عدم اتصال کامل، کاهش کیفیت سطح و در بحرانی‌ترین شرایط، امکان شکستن ابزار وجود دارد؛ بنابراین باید شرایط مناسبی را انتخاب نمود که جهت نیل به این هدف آزمون کشش انجام شده است. نمونه‌های شکست حاصل از آزمون کشش در جدول ۷ نشان داده شده است. حرکت دورانی ابزار، باعث جریان مواد از ناحیه پسرو به ناحیه پیشرو می‌شود. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده، علت شکست قطعات در ناحیه پیشرو را می‌توان با میزان حرارت تولیدی بیشتر در این ناحیه نسبت به ناحیه پیشرو، مرتبط دانست [۱].

نتایج آزمون کشش از جمله مقادیر استحکام نهایی و ازدیاد طول برای هر یک از نمونه‌ها، در شکل ۷ نشان داده شده است. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش سرعت دورانی و یا کاهش سرعت پیشروی، به دلیل تغییر شکل پلاستیک، دما در ناحیه اغتشاش تا نزدیکی دمای ذوب افزایش می‌یابد. این مسئله با افزایش اندازه دانه‌ها و کاهش چگالی نابجایی‌ها، سبب بالارفتن توان کرنش سختی می‌شود.

جدول ۷- نمونه‌های شکست حاصل از آزمون کشش

شماره	نمونه مورد آزمایش	سرعت دورانی rpm	سرعت پیشروی mm/min
1		1250	100
2		1250	80
3		1600	80
4		1600	100



(ب)

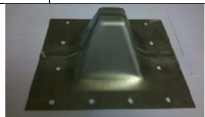

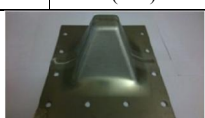

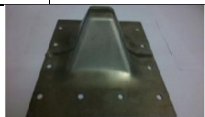
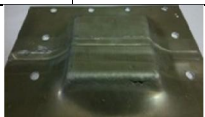
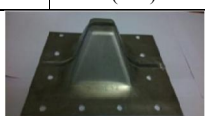
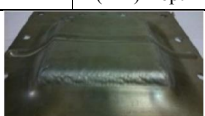
(الف)

شکل ۷- نتایج تست کشش الف) استحکام نهایی و ب) درصد ازدیاد طول

بالاتری را تجربه کند [۴]. چون در فرآیندهای شکل‌دهی، علاوه بر دستیابی به عمق شکل‌دهی زیاد، مقدار نازک شدگی باید کمینه باشد، بنابراین انتخاب نمونه مطلوب جهت

با افزایش توان کرنش سختی، میزان نازک شدگی کاهش یافته، لذا توزیع ضخامت یکنواخت تر می‌شود. این بدان معنی است که ماده می‌تواند عمق‌های شکل‌دهی

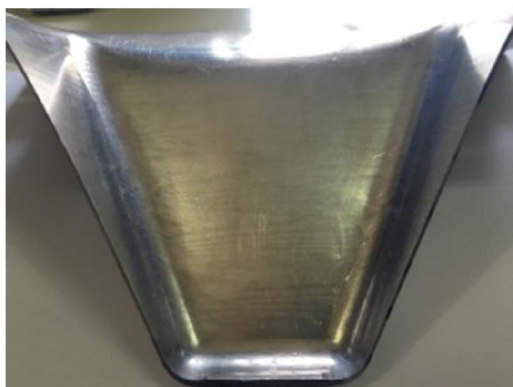
جدول ۸- نتایج شکل‌دهی تدریجی ورق

	Grease		Dry	
Z - Constant	1	Sample No.	4	Sample No.
	0	Spindle Speed (rpm)	0	Spindle Speed (rpm)
	300	Feed rate (mm/min)	800	Feed rate (mm/min)
	80	Forming Depth (mm)	22.5	Forming Depth (mm)
				
	7	Sample No.	5	Sample No.
	300	Spindle Speed (rpm)	300	Spindle Speed (rpm)
	800	Feed rate (mm/min)	300	Feed rate (mm/min)
	80	Forming Depth (mm)	19	Forming Depth (mm)
				
Spiral	3	Sample No.	2	Sample No.
	0	Spindle Speed (rpm)	0	Spindle Speed (rpm)
	800	Feed rate (mm/min)	300	Feed rate (mm/min)
	80	Forming Depth (mm)	30.282	Forming Depth (mm)
				
	6	Sample No.	8	Sample No.
	300	Spindle Speed (rpm)	300	Spindle Speed (rpm)
	300	Feed rate (mm/min)	800	Feed rate (mm/min)
	80	Forming Depth (mm)	19.153	Forming Depth (mm)
				

شکل‌دهی تدریجی حائز اهمیت است. برای شکل‌دهی، علاوه بر توان کرنش سختی بالا، باید استحکام و درصد ازدیاد طول نیز بالا باشد، در نتیجه با توجه به شکل ۷، نمونه S2 به عنوان نمونه مناسب جهت شکل‌دهی انتخاب شد. با انتخاب نمونه S2 به عنوان نمونه مناسب، بررسی پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی، روانکار و استراژی ابزار روی حداکثر عمق شکل‌دهی و نازک شدگی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی انجام شد. نمونه‌های حاصل از ۸ آزمایش شکل‌دهی در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۸، تاثیر روانکار بر میزان عمق شکل‌دهی کاملاً محسوس است. در حالت خشک، در عمق‌های کمتر از ۸۰ میلی‌متر پارگی ایجاد شد؛ در حالی‌که در حضور روانکار (گریس)، در تمام حالت‌های آزمایش، تا عمق ۸۰ میلی‌متر پارگی دیده نشده است. روانکار با کاهش تنش‌های کششی، باعث بهبود جریان ورق به سمت داخل قالب و باعث ایجاد شرایط اصطکاکی بهتر می‌شود. این مزیت باعث کاهش خرابی در اثر وقوع پارگی و شکل‌دهی قطعات با عمق بیشتر می‌شود؛ همچنین با توجه به نمونه‌های ۲ و ۸ در جدول ۸، در حالت خشک با استراژی مارپیچ، با افزایش سرعت دورانی و سرعت پیشروی، میزان عمق شکل‌دهی کاهش یافته است. میزان تاثیرگذاری سرعت پیشروی بالاتر از سرعت دورانی است. با افزایش سرعت پیشروی، میزان حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک بین ورق و ابزار بیشتر شده، در نتیجه همان‌طور که در نمونه ۸ از جدول ۸ نشان داده شده، ورق متورم شده و عمق شکل‌دهی کاهش یافته است.

همچنین در حین آزمایش مشاهده شده در سرعت دورانی صفر، از یک عمق خاص، ابزار به دلیل افزایش اصطکاک در ناحیه لغزش شروع به دوران می‌کند. میزان دوران ابزار با افزایش سرعت پیشروی، بیشتر می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش، استراژی مارپیچ نسبت به استراژی Z ثابت، میزان عمق شکل‌دهی را افزایش و مدت زمان انجام فرآیند را کاهش می‌دهد. این اثر می‌تواند ناشی از حرکت یکنواخت ابزار و کاهش تنش‌های ناگهانی وارده به ورق در استراژی مارپیچ باشد؛ همچنین در هیچ یک از نمونه‌ها در ناحیه جوش پارگی و شکست رخ نداده، بنابراین می‌توان این‌طور استدلال کرد که شرایط آزمایش نمونه S2 برای شکل‌دهی تدریجی بسیار مناسب بوده و قابلیت تحمل





(الف)



(ب)

شکل ۸- الف) شکل‌دهی با استفاده از گریس و  
ب) شکل‌دهی بدون استفاده از گریس

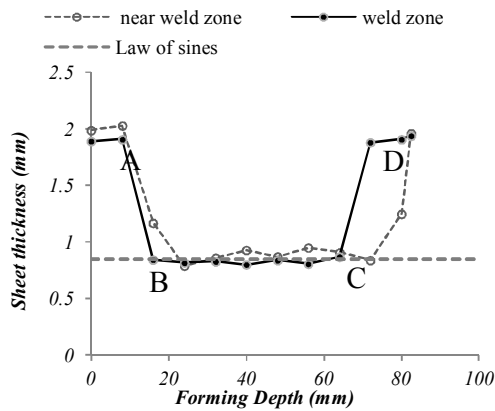
تفاوت چشمگیر زبری در نمونه‌های با وجود روانکار و عدم وجود روانکار مشاهده می‌شود. همانطور که گفته شد، چسبیدن مواد به ابزار، پوسته پوسته شدن و براده برداری هنگام شکل‌دهی را نتیجه می‌دهد، لذا اندازه‌گیری زبری امکان پذیر نیست. همچنین با توجه به جدول ۹، با مقایسه آزمایش‌های ۱ و ۷، با افزایش سرعت دورانی و سرعت پیشروی، میزان زبری نیز افزایش یافته است. در پیشروی‌های زیاد، به دلیل افزایش اصطکاک، حرارت بالا رفته و کیفیت سطح کاهش می‌یابد؛ همچنین افزایش سرعت دورانی، به افزایش درجه حرارت کمک کرده، لذا عیب پوسته پوسته شدن بحرانی تر می‌شود. علاوه بر روانکار و سرعت پیشروی، استراتژی حرکت ابزار نیز روی زبری تاثیر دارد. در استراتژی

جدول ۹- نتایج اندازه‌گیری زبری سطح (Ra)

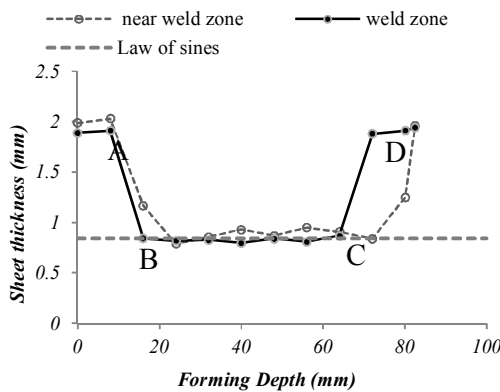
ردیف	زبری ناحیه جوش (میکرون)				
	ناحیه کف	ناحیه سطح	ناحیه چرخش	ناحیه لغزش	میانگین زبری
1	0.633	0.923	1.521	1.580	1.163
2	-	-	-	-	شکست
3	0.722	0.714	0.848	1.216	0.875
4	-	-	-	-	شکست
5	-	-	-	-	شکست
6	0.591	0.413	0.625	0.711	0.585
7	0.614	0.801	1.782	2.423	1.405
8	-	-	-	-	شکست

کرنش‌های بالایی را داشته است. در گام بعدی، زبری سطح ورق در شرایط مختلف آزمایش اندازه‌گیری شد. جدول ۹ نتایج حاصل را روی ناحیه جوش نشان می‌دهد.

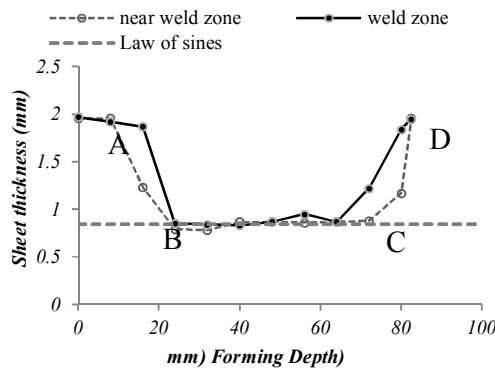
با توجه به نتایج جدول ۹، در کف و سطح بالایی قطعه کار تفاوت زبری قابل توجه نبوده و دلیل آن عدم تماس مستقیم ابزار با این سطوح است. در حالیکه در ناحیه لغزش، به دلیل اصطکاک بالا در شروع تماس ابزار با ورق، بیشترین مقدار زبری دیده شده است. با حرکت تدریجی ابزار به سمت پایین، میزان زبری به دلیل کاهش نیروی اصطکاک کمتر می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، زبری سطح تحت تاثیر پارامترهایی است که در فصل مشترک بین ابزار و قطعه قابل تغییر باشند. سطح تماس و مدت زمان تماس روی زبری سطح تاثیر دارند. عواملی که روی سطح تماس تاثیر دارند، عبارت‌اند از: قطر ابزار، گام عمودی، روانکار و جنس‌های ابزار و ورق. مدت زمان تماس نیز تحت تاثیر سرعت‌ها و استراتژی حرکت ابزار است. اکنون تاثیر هر یک از پارامترهای متغیر در این آزمایش بررسی می‌شود. روانکار با ایجاد فیلمی بین ابزار و ورق از لغزیدن ابزار جلوگیری کرده و شرایط اصطکاک بهتری را فراهم می‌کند. در حالت خشک، به علت چسبیدن مواد به ابزار ناشی از اصطکاک زیاد، احتمال سایش ابزار و خشن شدن سطح قطعه کار بالاست. در شکل ۸ به وضوح



شکل ۹- ضخامت ورق در ناحیه جوش و اطراف ناحیه جوش در نمونه ۷



شکل ۱۰- ضخامت ورق در ناحیه جوش و اطراف ناحیه جوش در نمونه ۱



شکل ۱۱- مقایسه ضخامت ورق در ناحیه جوش و اطراف ناحیه جوش در نمونه ۳

z ثابت به دلیل اعمال گام عمودی بعد از هر کانتور (حلقه)، سبب می‌شود، اثر پایین آمدن ابزار روی قطعه باقی مانده و در نتیجه با موج دار شدن سطح، کیفیت آن کاهش می‌یابد؛ اما در استراتژی مارپیچ، به دلیل حرکت پیوسته ابزار و عدم توقف در انتهای هر حلقه، اثر ناچیزی روی قطعه نهایی باقی می‌ماند؛ همچنین زبری روی اطراف ناحیه عرض جوش نیز اندازه‌گیری شده و تفاوت نتایج بسیار کوچک است؛ بنابراین وجود یا عدم وجود جوش، زبری سطح داخلی را آن چنان تحت تاثیر قرار نمی‌دهد.

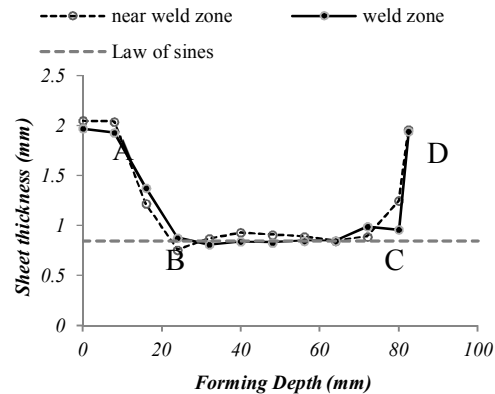
در گام بعدی، توزیع ضخامت ورق در شرایط مختلف آزمایش اندازه گیری شد. شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج اندازه گیری ضخامت قطعه نهایی را روی قسمت بدون جوش و ناحیه جوش نشان می‌دهد. برای پیش بینی توزیع ضخامت در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، از قانون سینوس طبق رابطه (۲) [۱۲] استفاده می‌شود:

$$t_f = t_0 \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2)$$

در واقع رابطه (۲) مینیمم مقدار ضخامت دیواره قطعه را تخمین می‌زند. در این رابطه  $\alpha$  زاویه شیب هرم ناقص،  $t_f$  ضخامت نهایی و  $t_0$  ضخامت اولیه بلانک است. نتایج اندازه گیری ضخامت نشان می‌دهد، تغییر شکل‌های اولیه ناشی از خمش بوده و در ادامه تنش‌های برشی، باعث تغییر شکل می‌شوند. با توجه به نتایج در ناحیه BC شکل ۶، توزیع ضخامت تقریباً یکنواخت است. در این ناحیه، تغییر شکل برشی خالص وجود دارد. این ناحیه از پیش بینی قانون سینوس پیروی می‌کند؛ در حالیکه در نواحی AB و CD همزمان تغییر شکل‌ها ناشی از کشش و خمش است. در ناحیه AB (ناحیه نزدیک به لبه‌ی ورق گیر)، فلنج خم می‌شود، لذا از تغییر شکل در این ناحیه جلوگیری شده و به همین دلیل از قانون سینوس تبعیت نمی‌کند. در محل فلنج بالایی و کف قطعه که ابزار تماس مستقیم نداشته و ناحیه غیر شکل‌دهی است، ضخامت با اندکی تفاوت نسبت به مقدار اولیه باقی می‌ماند [۱۳].

جدول ۱۰- نتایج اندازه‌گیری ضخامت

نمونه	در ناحیه‌ی جوش		در اطراف ناحیه‌ی جوش	
	در اطراف جوش	در ناحیه‌ی جوش	در اطراف جوش	در ناحیه‌ی جوش
1	61.5	62	0.77	0.77
3	58.5	61	0.78	0.83
6	62.5	62	0.76	0.81
7	61	60.5	0.79	0.80



شکل ۱۲- ضخامت ورق در ناحیه جوش و اطراف ناحیه جوش در نمونه ۶

۱- استفاده از روانکار و همچنین استفاده از استراتژی مارپیچ، میزان حداکثر عمق شکل دهی را افزایش می‌دهد.

۲- میزان حداکثر نازک شدگی با وجود روانکار کاهش داشته و ضمناً استراتژی مارپیچ نیز باند نازک شدگی را به عمق‌های پایین‌تر منتقل کرده و توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد.

۳- در صورت استفاده از روانکار، علاوه بر کاهش میزان سایش ابزار، کیفیت سطح نهایی قطعه نیز بهبود می‌یابد؛ همچنین، استراتژی مارپیچ نسبت به Z ثابت سبب کاهش موج دار شدن سطح قطعه کار می‌شود.

نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند راهگشا تحقیقات آتی در زمینه شکل‌دهی ورق‌های هم‌جنس یا غیر هم‌جنس اتصال داده شده با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باشد.

#### ۵- مراجع

- [1] Mishra RS, Ma ZY (2005) Friction stir welding and processing. *Mat Sci Engn* 50: 1-78.
- [2] Gulati V, Arya A, Katya P, Goswami A (2015) Process parameters optimization in single point incremental forming. *J Inst Eng India C* 97(2): 185-193.
- [3] Young D, Jeswiet J (2004) Wall thickness variations in single-point incremental forming. *P I Mech Eng B-J Eng* 218(11): 1453-1459.
- [4] Ramulu PJ, Kailas SV, Narayanan RG (2012) Influence of tool rotation speed and feed rate on the

پدیده کرنش سختی که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رخ داده بر توزیع کرنش در حین فرآیند شکل‌دهی تدریجی اثر می‌گذارد. با توجه به جدول ۱۰ که مقادیر ضخامت و نازک شدگی روی ناحیه جوش در مقایسه با ناحیه بدون جوش را نشان می‌دهد، می‌توان گفت، به دلیل افزایش توان کرنش سختی در جوشکاری، توزیع کرنش و ضخامت ورق بعد از شکل‌دهی یکنواخت می‌شود؛ همچنین در اکثر نقاط، ضخامت ناحیه جوش نسبت به بدون جوش بیشتر بوده و نازک شدگی کمتری دارد.

در استراتژی مارپیچ نسبت به استراتژی Z ثابت، نازک شدگی کمتر (ضخامت بیشتر) در قطعه دیده می‌شود؛ همچنین پراکندگی ضخامت در این روش به دلیل حرکت پیوسته ابزار و عدم اعمال تنش‌های ناگهانی کمتر بوده و در ضمن کمترین ضخامت در این روش در عمق پایین‌تری ایجاد شده است؛ همچنین، روانکار با ایجاد شرایط اصطکاکی بهتر سبب بهتر جریان یافتن ورق به داخل قالب می‌شود؛ در نتیجه، نازک شدگی کاهش یافته و ضخامت یکنواخت می‌شود. این مزیت باعث کاهش خرابی در اثر وقوع پارگی و شکل‌دهی قطعات با عمق بیشتر می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر نشان داد که می‌توان ورق‌های اتصال داده شده به کمک جوش اصطکاکی اغتشاشی را با دقت بسیار بالایی شکل داد و نتایج زیر به اختصار حاصل شد.

- [9] ASTM E8 M-04. (2006) Standard test method for tension testing of metallic materials. ASTM International.
- [10] ASTM A681-08 (2015) Standard specification for tool steels alloy. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [11] Mirnia MJ, Mollaei Dariani B (2015) An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet. *Modares Mechanical Engineering* 14(14): 262-270. (In persian)
- [12] Hussain GL, Gao (2007) A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. *Int J Mach Tool Manu* 47(3): 419-435.
- [13] Chao LJ, Chong L, Gui ZT (2012) Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation. *T Nonferr Metal Soc* 54-60.
- forming limit of friction stir welded AA6061-T6 sheets. *P I Mech Eng C-J Mec* 227(3): 520-541.
- [5] Shendage RM, Pujari SM (2014) Effect of process parameters on fracture depth and thickness distribution in single point incremental forming. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 3(12): 501-504.
- [6] Silva MB, Skjoedt M, Vilaca P, Bay N, Martins PAF (2009) Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding. *J Mater Process Tech* 209: 811-820.
- [7] Azevedo NG, Farias JS, Bastos RP (2015) Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials. *Int J Precis Eng Man* 16(3): 589-595.
- [8] Ramulu PJ, Narayanan RG, Kailas SV (2013) Forming limit investigation of friction stir welded sheets: influence of shoulder diameter and plunge depth. *Int J Adv Manuf Tech* 69: 2757-2772.