



## Experimental Study of Friction Stir Spot Welding of a Non-Alloyed Aluminium Sheet with Stationary Shoulder

Javad Derogar<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi<sup>2\*</sup>, Moosa Sajed<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 05.11.2021

**Revised:** 06.30.2021

**Accepted:** 09.19.2021

#### Keyword:

Friction stir spot welding  
Aluminium sheet  
Stationary shoulder tool  
Welding defects

#### \*Corresponding Author:

Seyed Mohammad Hossein  
Seyedkashi

Email: [seyedkashi@birjand.ac.ir](mailto:seyedkashi@birjand.ac.ir)

### ABSTRACT

In friction stir welding process, a non-consumable rotary tool is used which consists of a pin and a shoulder. The tool/workpiece friction results in stirring, plastic deformation, and joining. It is the shoulder penetration which leads to thinning of the upper sheet and remaining of a hole. In this study, a stationary shoulder was used to investigate the spot welding of a non-alloyed aluminium sheet to address the mentioned drawback. The aim was to investigate the effects of tool rotational speed with two levels of 1000 and 2000 rpm, tool shoulder diameter with two levels of 20 and 24 mm, and plunge depth with two levels of 3 and 3.5 mm on the microhardness, strength, and microstructure of the welded samples. Feed rate and dwell time were constantly set to 20 mm/s and 10s, respectively. Optimization was carried out in three modes including maximum strength, maximum hardness, and a combination of the maximum strength and hardness. In the first mode, the maximum strength was 1389.51 N in the specimen welded with a tool rotational speed of 2000 rpm, plunge depth of 3 mm, and tool shoulder diameter of 24 mm. In the second mode, the highest micro-hardness value was 91.33 HV in the specimen that was welded with a tool rotational speed of 1000 rpm, plunge depth of 3.5 mm, and tool shoulder diameter of 20 mm. Finally, in the third mode, the combination of the highest strength and micro-hardness values were 1389.51 N and 85.66 HV, respectively.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

In the friction stir welding process, a non-consumable rotary tool is used consisting of a pin and a shoulder. The tool/workpiece friction results in stirring, plastic deformation, and joining. It is the shoulder penetration that leads to the thinning of the upper sheet and the remaining of a hole. In this study, a stationary shoulder was used to investigate the spot welding of a non-alloyed aluminum sheet to address the mentioned drawback. The aim was to investigate the effects of tool rotational speed, tool shoulder diameter, and penetration depth on the microhardness, strength, and microstructure of the welded samples. Feed rate and dwell time were kept constant.

### Methodology

For this research, sheets of non-alloyed aluminum with a thickness of 2 mm and dimensions of 40 × 200 mm<sup>2</sup> were prepared. The tools included a pin and two shoulders made of hot-rolled steel (H13). Using the standard hardening process, the hardness of the tool was increased to 54 HRC. The parts were cleaned by sanding and then stacked so that they overlapped by approximately 40 mm. To perform the welding process, the tool penetrated the parts with a feed rate of 20 mm/min. After reaching the predetermined penetration depth, it was held for 10 s. The welding process was completed with the removal of the tool. The input parameters were tool rotational speed with two levels of 1000 and 2000 rpm, tool shoulder diameter with two levels of 20 and 24 mm, and plunge depth with two levels of 3 and 3.5 mm, while the output parameters (responses) were the microhardness, strength, and microstructure of the welded samples.

The experiments were designed by Minitab software using the full factorial method in which a total of 8 tests were obtained. To evaluate the highest strength, the tensile test was performed with a speed of 1 mm/min. To check the microstructure and hardness, the parts were cut by wire-cut, polished and etched. The microstructures were examined using a light microscope, and the hardness was measured by a hardness meter with a force of 100 gr and a time of 10 seconds with three repetitions in the stir region.

### Results and discussion

The results of the visual inspection indicate that in general the obtained weld was of good quality and due to the use of a fixed shoulder, the surface of the workpiece was not worn with no trace of the shoulder on the surface. The only drawback in this process was the protrusion of the viscous material and the formation of burrs around the weld. A destructive test was performed to visually evaluate the weld sections. Welded specimens were cut cross-sectionally. The cross-sections of different samples were examined and it was discovered that full welding was performed at the pin tip and the bottom of the hole due to more complete stirring. Furthermore, small cracks were observed in the external perimeter of the spot weld. Figure 1 shows the cross-section of the welded specimens

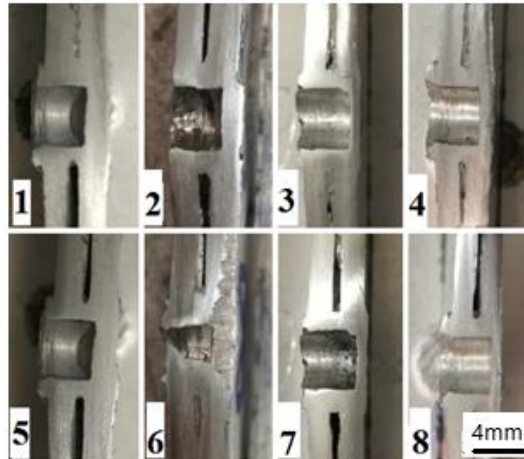


Figure 1. Cross-section of the welded specimens.

The tensile test was performed for all samples and the effect of all variables on the fracture force was investigated using ANOVA statistical method. Among the main effects, rotational speed had the greatest effect (about 23.77%) on the failure force. The effect of penetration depth on the fracture force was 10.48%. The main effect of shoulder diameter in this experiment was very small, approximately 2.41%. The hardness test was repeated three times on each sample in the stirred area. The maximum and minimum hardness values were respectively 92 and 64 HV. The highest effect was related to the interaction effect of all factors and the lowest effect was related to the shoulder diameter: Figure 2 illustrates the main effects of parameters on fracture strength and hardness.

Optimization was carried out in three modes including maximum strength, maximum hardness, and a combination of the maximum strength and hardness. In the first mode, the maximum strength was 1389.51 N in the specimen welded with a tool rotational speed of 2000 rpm, plunge depth of 3 mm, and tool shoulder diameter of 24 mm. In the second mode, the highest micro-hardness value was 91.33 HV in the specimen that was welded with a tool rotational speed of 1000 rpm, plunge depth of 3.5 mm, and tool shoulder diameter of 20 mm. Finally, in the third mode, the combination of the highest strength and micro-hardness values were 1389.51 N and 85.66 HV, respectively.

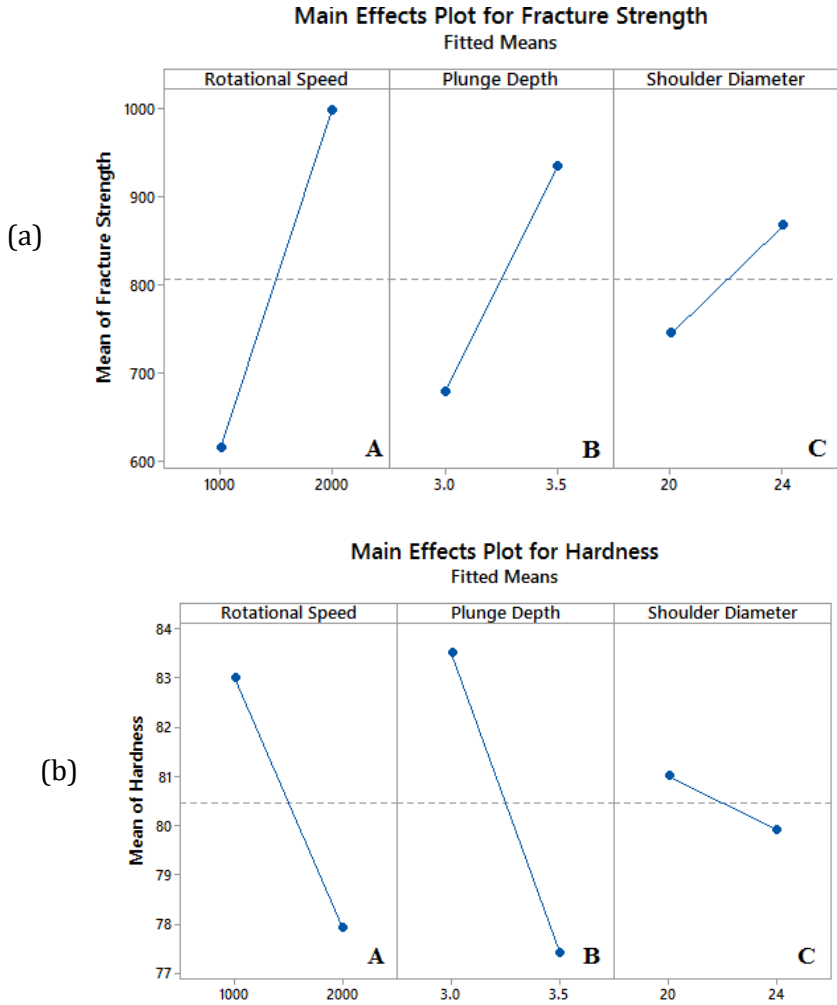


Figure 2. The effect of input variables on a) fracture force and b) hardness.

**Conclusion**

In the present paper, the friction stir spot welding process was performed using a fixed shoulder tool on a non-alloyed aluminum sheet to investigate the effect of rotational velocity, penetration depth, and shoulder diameter on the weld fracture force and hardness.

- All samples were of good visual quality.
- The shoulder diameter had very little effect on the responses in the range of 20-24 mm.
- The main and interaction effects of the variables on the weld strength and hardness were studied.
- The highest fracture strength was in the sample with a rotational speed of 2000 rpm, shoulder diameter of 24 mm, and a penetration depth of 3 mm while the

lowest fracture strength was in the sample with the same variables but with a rotational speed of 1000 rpm. It can be concluded that by increasing the rotational speed, the fracture force was also increased.

- The highest hardness was related to the sample with a rotational speed of 1000 rpm, the penetration depth of 3.5 mm, and shoulder diameter of 20 mm while the lowest hardness was related to the sample with the same variables but with a rotational speed of 2000 rpm. Therefore, it can be concluded that increasing the rotational speed reduced the hardness



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



## مطالعه تجربی فرایند جوشکاری نقطه‌ای ورق آلومینیوم غیرآلیاژی به روش اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت

جواد دروگر<sup>۱</sup>، سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>۲\*</sup>، موسی ساجد<sup>۳</sup>

- ۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از یک ابزار غیرمصرفی دوار که شامل پین و شانه است، استفاده می‌شود. اصطکاک بین ابزار و قطعه کار باعث ایجاد اغتشاش، تغییر شکل پلاستیکی و در نتیجه اتصال قطعات می‌شود. مشکل این نوع جوشکاری باقی ماندن اثر ابزار روی قطعه کار است که علاوه بر مخدوش کردن ظاهر قطعه، منجر به نازک شدن ورق بالایی می‌شود. در این پژوهش به منظور کاهش این اثر، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با شانه ثابت برای اتصال ورق‌هایی از جنس آلومینیوم غیرآلیاژی انجام شد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر عمق نفوذ با دو سطح ۳ و ۳.۵ میلی‌متر، سرعت دورانی با دو سطح ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و قطر شانه با دو سطح ۲۰ و ۲۴ میلی‌متر، بر میکروسختی، استحکام شکست، ریزساختار و کیفیت ظاهری اتصال به دست آمده می‌باشد. سرعت پیشروی و زمان نگهداری ثابت و به ترتیب ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد. بهینه‌یابی در سه حالت براساس بیشترین نیروی شکست، بیشترین سختی و ترکیبی از بیشترین نیروی شکست و سختی انجام شد. در حالت اول، بیشترین نیروی شکست معادل ۱۳۸۹/۵۱ نیوتن با سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، عمق نفوذ ۳ میلی‌متر و قطر شانه ۲۴ میلی‌متر به دست آمد. در حالت دوم بیشترین سختی به میزان میانگین ۹۱/۳۳ ویکرز با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر و قطر شانه ۲۰ میلی‌متر به دست آمد. در حالت سوم بیشترین نیروی شکست و بیشترین میانگین سختی به ترتیب ۱۳۸۹/۵۱ نیوتن و ۸۵/۶۶ ویکرز به دست آمد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

### کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای  
ورق آلومینیومی  
ابزار با شانه ثابت  
عبوب جوشکاری

\*نویسنده مسئول: سید محمدحسین  
سیدکاشی

پست الکترونیکی:

[seyedkashi@birjand.ac.ir](mailto:seyedkashi@birjand.ac.ir)



## مقدمه

جوشکاری یکی از روش‌های اتصال رایج فلزات در صنایع مختلف می‌باشد. به‌طور کلی، دو نوع جوشکاری ذوبی<sup>۱</sup> و حالت جامد<sup>۲</sup> وجود دارد. «جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی»<sup>۳</sup> یک فرایند حالت جامد است که مزایای متنوعی نسبت به جوشکاری ذوبی دارد. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مؤسسه جوشکاری انگلستان<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۱ ابتدا به‌منظور جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم معرفی کرد [۱؛ ۲]. این روش اتصال به‌عنوان یک فناوری سبز، سازگار با محیط زیست، دارای راندمان بالا و عیوب کم، مهم‌ترین پیشرفت در زمینه اتصال فلزات نرم در دهه اخیر به‌شمار می‌رود. مهم‌ترین کاربرد این روش، جوشکاری در صنایع هوا-فضا برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم با مقاومت بالا است. همچنین، این روش در صنایع خودروسازی، ریلی و دریایی و در اتصال بعضی از آلیاژهای فلزی مثل آلیاژهای آلومینیوم، مس، روی و منیزیم که با روش‌های جوشکاری ذوبی با عیوب زیاد و به‌سختی جوشکاری می‌شوند، استفاده می‌شود. از مزایای مهم این نوع جوشکاری می‌توان اتصال فلزات غیرهم‌جنس، فلزات نرم، فلزاتی که دارای دمای ذوب پایین و ضریب انتقال حرارتی بالا هستند و همچنین، اتصال فلزات بدون استفاده هرگونه ماده پرکننده را نام برد. در این نوع جوشکاری چون هیچ‌گونه ذوبی صورت نمی‌گیرد و حوضچه مذاب ایجاد نمی‌شود، عیوب مربوط به انجماد مطرح نیست. در نتیجه در مقایسه با روش‌های جوشکاری ذوبی خواص مکانیکی عالی و تنش پسماند کمتری به‌دست می‌آید. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک پین<sup>۵</sup> مصرف‌نشده در حال دوران روی سطح اتصال دو فلز موردنظر قرار می‌گیرد و با حرکت خطی در راستای جوش و دوران ابزار روی سطح قطعه کار باعث ایجاد اصطکاک، دمای بالا (۸۰-۹۰ درصد دمای ذوب) و خمیری شدن مواد قطعه کار در اثر اصطکاک می‌گردد و در نتیجه، باعث اختلاط مواد دو فلز در یکدیگر و ایجاد اتصال حالت جامد می‌شود [۳؛ ۴].

مطالعات متنوع و گسترده‌ای در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خطی با شانه ثابت انجام پذیرفته است. احمد و همکاران [۵] یک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت بر آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۸۲ با ضخامت ۶ میلی‌متر با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۱۶۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام دادند. لی و همکاران [۶] تأثیر سرعت دورانی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA۲۲۱۹-T۶ را بررسی کردند. در این پژوهش، شانه روی دستگاه ثابت شد و از سرعت دورانی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و ضخامت قطعه ۵ میلی‌متر استفاده گردید که سرعت دورانی هرچه از ۶۰۰ به سمت ۹۰۰ دور بر دقیقه پیش می‌رود، کیفیت جوش بهتر و از ۹۰۰ به ۱۰۰۰ جوش نامناسب می‌باشد. در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه استحکام تسلیم ۶۹٪ فلز پایه حاصل شد. جی و همکاران [۷] بر خواص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت روی آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۵۸-T۶ با ضخامت ۴ میلی‌متر تحقیق کردند که بیشترین استحکام در سرعت خطی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است. لی و همکاران [۸] تأثیر پارامترهای مختلف بر ریزساختار و خواص آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۶۱-T۶ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین استحکام کششی در سرعت خطی ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. مالتین و همکاران [۹] نیز در یک پژوهش سازگاری جوش اصطکاکی اغتشاشی با فولاد گرید DH۳۶ را بررسی کردند و دریافتند که جوشکاری فولاد نتایج خوبی به‌دست نمی‌دهد. لی و

<sup>1</sup> Fusion Welding

<sup>2</sup> Solid State Welding

<sup>3</sup> Friction Stir Welding

<sup>4</sup> The Welding Institute

<sup>5</sup> Pine

همکاران [۱۰] در پژوهشی دیگر به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶۵۱ به ضخامت ۵ میلی‌متر پرداختند.

دیویز و همکاران [۱۱] به توسعه ریزساختار و بافت کریستالی آلیاژ TI-۶AL-۴V در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت پرداختند. جی و همکاران [۱۲] یک تحقیق آزمایشگاهی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شانه ثابت روی آلیاژ آلومینیوم ۷N۰۱-T۴ با ضخامت ۴ میلی‌متر و عمق نفوذ ۰/۲ میلی‌متر انجام دادند. سان و همکاران [۱۳] توزیع تنش باقیمانده و تکامل بافت در اتصالات جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت را در آلیاژ آلومینیوم AA۷۰۵۰ به صورت آزمون مخرب و غیرمخرب بررسی کردند. سان و همکاران [۳] در پژوهشی دیگر مناطق جوش و تنش باقیمانده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شانه ثابت به روش T شکل در آلیاژ AA۷۰۵۰ را بررسی کردند. لی و همکاران [۱۴] بهبود ریزساختار و خواص کششی آلیاژ منگنز AZ۳۱B با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شانه ثابت را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اتصالات آلیاژ منگنز AZ۳۱B در سرعت‌های دورانی مختلف با موفقیت انجام می‌شود. لیو و همکاران [۱۵] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه پشتیبان ثابت و بین‌نفوذکننده زاویه‌دار را در آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹-T۶ بررسی کردند که در این آزمایش شانه از پشت قطعه کار ثابت شده است و حداکثر استحکام کششی در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه حاصل گردید. ون و همکاران [۴] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار پیوند رابط در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شانه ثابت لب روی لب آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ پرداختند.

لیو و همکاران [۱۶] بهبود خواص کششی اتصال آلومینیوم/منگنز (منگنز AZ۳۱B، آلومینیوم ۶۰۶۱T۶) با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با پین ثابت به کمک آلتراسونیک را بررسی کردند. گوبل و همکاران [۱۷] قابلیت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را با پین نیمه‌ثابت (یک پین ثابت و دیگری متحرک) روی آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم AA۲۱۹۸-T۸۵۱ بررسی کردند. کومار و همکاران [۱۸] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۶۳ را با استفاده از ابزاری از جنس فولاد H۱۳ بررسی کردند. آن‌ها این آزمایش را در سرعت دورانی ۸۵۰ دور بر دقیقه با ارتفاع پین دو میلی‌متر و زمان نگهداری ۵-۱۰ ثانیه انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین استحکام در بیشترین عمق به دست می‌آید و همچنین زمان نگهداری هرچه از ۵ ثانیه به ۱۰ ثانیه نزدیک‌تر شود کیفیت جوش بهتری به دست می‌دهد. اسدی و مظفری [۱۹] تأثیر هندسه ابزار (شانه صاف و شانه با شیار مارپیچ) را بر استحکام کششی قطعات پلی‌پروپیلنی جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی کردند و نشان دادند قطعاتی که توسط ابزار با شانه شیاردار مارپیچ جوشکاری شده‌اند، استحکام بالاتری داشتند. همچنین قاسمی و همکاران [۲۰] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های از جنس آلومینیوم ۵۰۱۰ به آلومینیوم ۶۰۶۱ را بررسی و تأثیر عواملی مانند سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی و عمق غوطه‌وری بر استحکام کششی و سختی جوش را بهینه‌سازی کردند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی امروزه کاربردهای بسیار متنوعی پیدا کرده است و تحقیقات برای کاربردهای جدید همچنان ادامه دارد. برای مثال، درودگر و همکاران [۲۱] با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی ساندویچ دوفلزی با استفاده از هسته فوم آلومینیومی و روکشی از لایه مس تهیه و تأثیر پارامترهای جوشکاری را بر کیفیت جوش مطالعه کردند.

همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت به صورت گسترده برای جوشکاری خطی (لب‌به‌لب و لب روی لب) انجام پذیرفته است و از آلیاژهای مختلفی در مقالات منتشر شده استفاده شده است. همچنین با استفاده از روش‌های متنوع، اثر پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار و کیفیت جوش انجام یافته است. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای برای استفاده از این روش در جوشکاری نقطه‌ای گزارش نشده است. با توجه به



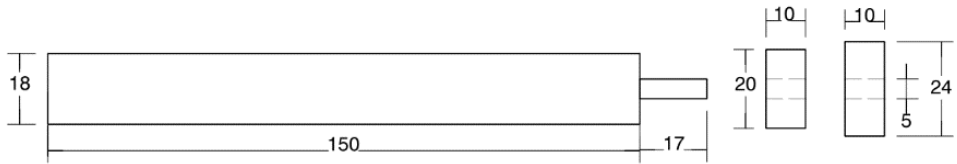
مزایای قابل توجه استفاده از شانه ثابت که شاید مهم‌ترین آن کاهش منطقه متأثر از حرارت و به دنبال آن افزایش کیفیت جوش است، استفاده از این روش در جوشکاری نقطه‌ای می‌تواند مزایای فراوانی داشته باشد. هدف از انجام این تحقیق انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با شانه ثابت ورق آلومینیوم غیرآلیاژی به منظور بررسی سختی، ریزساختار و استحکام شکست است. در این پژوهش سرعت دورانی، قطر شانه و عمق نفوذ، متغیرهای ورودی و استحکام شکست و سختی، متغیرهای خروجی هستند.

## روش شناسی

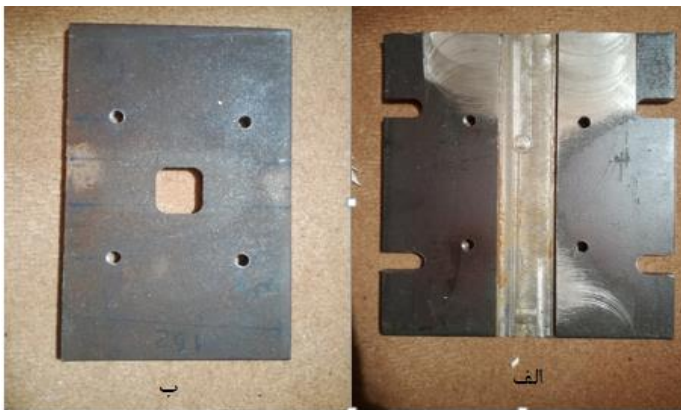
برای انجام این پژوهش، ورق‌هایی از جنس آلومینیوم غیرآلیاژی به ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد  $40 \times 200$  میلی‌متر تهیه شدند. ترکیب شیمیایی ورق آلومینیومی مورد استفاده، در جدول ۱ آورده شده است. ابزار مورد استفاده شامل پین و دو عدد شانه از جنس فولاد گرم‌کار (H۱۳) می‌باشد که توسط فرایند تراشکاری ساخته شد. با استفاده از فرایند استاندارد سخت‌کاری، سختی ابزار تا ۵۴ راکول سی افزایش داده شد. شکل ۱ ابزار مورد استفاده و ابعاد آن را نشان می‌دهد. به منظور ثابت نگه‌داشتن قطعه کار، گیره نشان‌داده شده در شکل ۲ طراحی و ساخته شد. برای ثابت نگه‌داشتن شانه ابزار و افزایش فشار لحظه‌ای شانه بر قطعه کار قیدوبند شکل ۳ طراحی و ساخته شد. برای انجام فرایند جوشکاری، ابتدا گیره، قیدوبند و ابزار روی دستگاه فرز مدل FP۴MB بسته شدند. شکل ۳ نحوه بسته‌شدن قیدوبند و گیره روی دستگاه فرز را نشان می‌دهد. پاک‌سازی قطعات توسط سنباده‌زنی انجام شد و سپس قطعات به صورتی روی هم قرار داده شدند که به اندازه ۴۰ میلی‌متر هم‌پوشانی داشته باشند. برای انجام فرایند جوشکاری ابزار با سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر در دقیقه درون قطعات نفوذ کرده و پس از رسیدن به عمق نفوذ از پیش تعیین شده به مدت ۱۰ ثانیه نگهداری شد و در پایان با خروج ابزار، جوشکاری کامل شد. جدول ۲ متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با شانه ثابت را نشان می‌دهد. آزمایش توسط نرم‌افزار مینی‌تب و به روش عاملی کامل طراحی شد که در مجموع ۸ آزمون به دست آمد. به منظور بررسی استحکام شکست، آزمون کشش با سرعت فک ۱ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه کشش مدل Zwick/Roell انجام شد. برای بررسی ریزساختار و سختی‌سنجی، قطعات پس از پاک‌سازی، توسط وایرکات بریده شدند و صیقل‌کاری و حکاکی انجام شد. ریزساختار قطعات توسط میکروسکوپ نوری Olympus BH۶۰ و سختی‌سنجی توسط دستگاه دیجیتالی مدل Koopa-UV۱ با نیروی ۱۰۰ گرم و زمان ۱۰ ثانیه و با سه تکرار در ناحیه اغتشاشی بررسی گردید.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم

Fe	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Al
۰/۵۳۱	۰/۰۴۰	۰/۰۰۸	۰/۰۹۱	۰/۰۱۹	۰/۰۰۷	پایه



شکل ۱. ابزار جوشکاری با شانه ثابت



شکل ۲. گیره طراحی شده برای نگه‌داشتن ورق



شکل ۳. نحوه بسته شدن گیره و قیدوبند روی دستگاه فرز

جدول ۲. طراحی آزمایش عاملی کامل

متغیر آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	قطر شانه (mm)	عمق نفوذ (mm)
۱	۱۰۰۰	۲۰	۳
۲	۱۰۰۰	۲۴	۳
۳	۱۰۰۰	۲۰	۳/۵
۴	۱۰۰۰	۲۴	۳/۵
۵	۲۰۰۰	۲۰	۳
۶	۲۰۰۰	۲۴	۳
۷	۲۰۰۰	۲۰	۳/۵
۸	۲۰۰۰	۲۴	۳/۵

## نتایج و بحث

### بررسی چشمی و میکروسکوپی جوش

نتایج حاصل از بازرسی چشمی حاکی از آن است که به‌طور کلی جوش به‌دست‌آمده، کیفیت خوبی دارد و به دلیل استفاده از شانه ثابت سطح قطعه‌کار ساییده نشده و اثری از شانه روی سطح قطعه‌کار باقی نمانده است. تنها عیبی که در این فرایند مشاهده می‌شود، بیرون‌زدگی مواد خمیری و ایجاد پلیسه اطراف نقطه‌جوش می‌باشد. بین نمونه‌های جوشکاری شده با متغیرهای مختلف تفاوت ظاهری خاصی دیده نمی‌شود و فقط در نمونه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ که از شانه با قطر ۲۴ میلی‌متر در فرایند جوشکاری استفاده شده، کاهش بیرون‌زدگی مواد و پلیسه و تیرگی رنگ ظاهری به علت افزایش حرارت مشاهده می‌شود. شکل ۴ نمونه‌های جوشکاری شده ۱ تا ۸ را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمونه‌های جوشکاری شده

به‌منظور بررسی مقطع جوش، آزمون چشمی مخرب انجام شد. نمونه‌های جوشکاری شده به‌صورت مقطعی بریده شدند. مقطع نمونه‌های مختلف بررسی شد و مشخص شد که جوشکاری در محل قرارگیری نوک پین و کف حفره به دلیل اغتشاش کامل‌تر به‌صورت کامل و اطراف پین به شعاع حدوداً یک میلی‌متر انجام شده است. همچنین در محیط بیرونی نقطه‌جوش، ترک‌های ریز مشاهده شد. شکل ۵ سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده ۱ تا ۸ را نشان می‌دهد. در این نوع جوشکاری چهار منطقه فلز پایه (BM)<sup>۱</sup>، ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)<sup>۲</sup>، ناحیه متأثر از فرایند ترمودینامیکی (TMAZ)<sup>۳</sup> و ناحیه اغتشاشی (SZ)<sup>۴</sup> وجود دارد [۲۲]. در شکل ۶ این نواحی در مقطع جوش نشان داده شده است. در ناحیه BM ریزساختار هیچ‌گونه تغییری نمی‌کند و دارای ساختار یکنواخت و منظم می‌باشد. ناحیه HAZ فقط تحت تأثیر حرارت قرار گرفته و رشد محدودی در دانه‌ها اتفاق می‌افتد. در مطالعه حاضر به دلیل استفاده از ابزار با شانه ثابت، شاهد شکل‌گیری ناحیه متأثر از حرارت کوچک‌تری در مقایسه با روش سنتی هستیم که اثر مثبتی بر استحکام اتصال دارد [۲۲]. ناحیه TMAZ تحت تأثیر کار دینامیکی و حرارت قرار گرفته ولی به دلیل تغییر شکل و حرارت کم، تبلور مجدد در آن روی نمی‌دهد. در ناحیه که دقیقاً در اطراف پین واقع شده است، حرارت ناشی از اصطکاک ابزار و قطعه‌کار و حرکت دورانی و خطی ابزار باعث ایجاد اغتشاش و در نتیجه تبلور مجدد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود به دلیل استفاده از شانه ثابت و کاهش حرارت ورودی عرض ناحیه اغتشاشی کاهش پیدا کرده است که چندان مطلوب نیست.

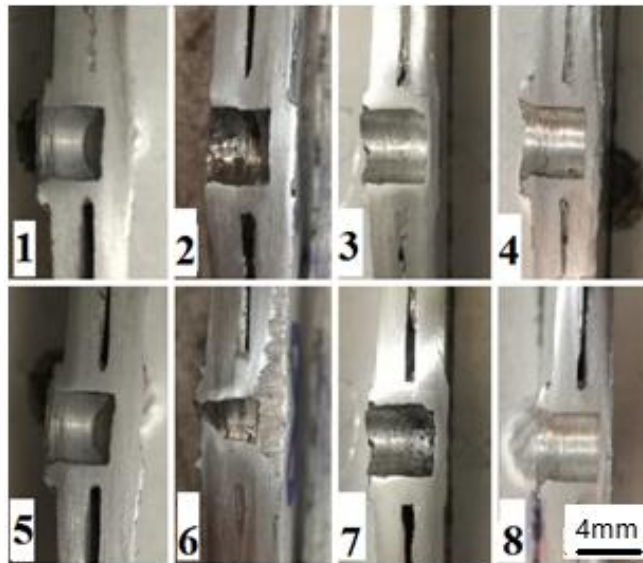
---

<sup>1</sup> Base Metal

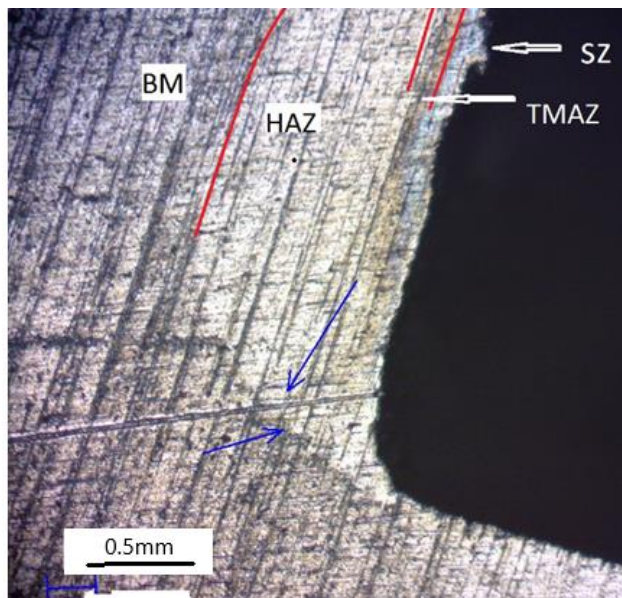
<sup>2</sup> Heat Affected Zone

<sup>3</sup> Thermo-Mechanically Affected Zone

<sup>4</sup> Stir Zone



شکل ۵. سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده



شکل ۶. نواحی ریزساختاری مختلف جوش

### بررسی نیروی شکست و تأثیر متغیرها بر آن

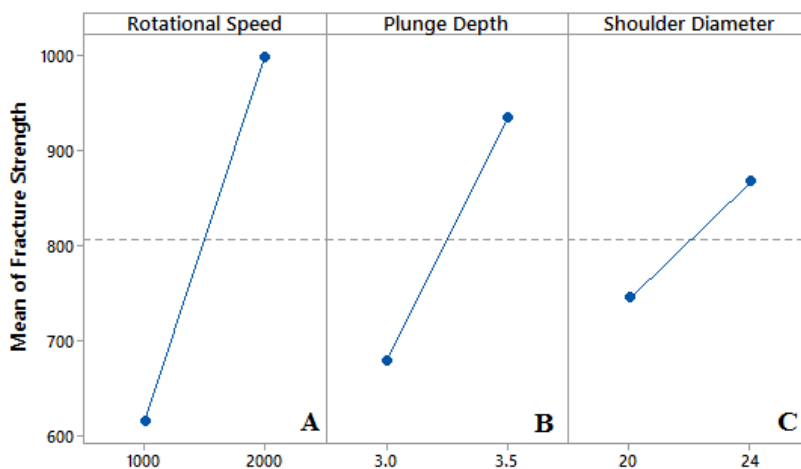
آزمون کشش برای تمامی نمونه‌ها انجام شد و تأثیر تمام متغیرها روی نیروی شکست توسط نرم‌افزار مینی‌تب بررسی گردید. جدول ۳ و ۴ به ترتیب نتایج آزمون کشش و تأثیر متغیرها را نشان می‌دهند. در بین تأثیرات اصلی، سرعت دورانی بیشترین تأثیر را (در حدود ۲۳/۷۷ درصد) روی نیروی شکست گذاشته است. شکل ۷ قسمت A بیانگر تأثیر سرعت دورانی بر نیروی شکست می‌باشد. با افزایش سرعت دورانی از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه نیروی شکست نیز افزایش پیدا کرده است. تأثیر عمق نفوذ بر نیروی شکست ۱۰/۴۸ درصد به دست آمد. شکل ۷ قسمت B تأثیر عمق نفوذ بر نیروی شکست را نشان می‌دهد. با افزایش عمق نفوذ از ۳ به ۳/۵ میلی‌متر نیروی شکست نیز افزایش پیدا کرده است. تأثیر مستقل قطر شانه در این آزمایش بسیار کم و در حدود ۲/۴۱ درصد می‌باشد ولی به علت اینکه اثر متقابل قطر شانه و دیگر متغیرها زیاد است نمی‌توان گفت که قطر شانه تأثیری در نیروی شکست ندارد بلکه در محدوده انتخابی در این آزمایش تأثیر زیادی ندارد. به همین دلیل نمی‌توان متغیر قطر شانه را حذف کرد و آن را نادیده گرفت. شکل ۷ قسمت C تأثیر شانه با قطر ۲۰ و ۲۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد که با افزایش قطر، نیروی شکست افزایش پیدا کرده است. شکل ۸ اثرات متقابل متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد. قطعه‌کار در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر و در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه با عمق ۳ میلی‌متر استحکام کششی بالاتری دارد. در سرعت دورانی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌متر، قطر شانه ۲۴ میلی‌متر استحکام بالاتری را نسبت به قطر شانه ۲۰ به دست می‌دهد. در عمق نفوذ ۳ میلی‌متر قطر شانه ۲۴ میلی‌متر استحکام بالاتری را به دست می‌دهد و در عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر استحکام کششی به دست آمده با شانه به قطر ۲۰ و ۲۴ میلی‌متر تقریباً یکسان می‌باشد. نتایج اثرات متقابل نشان می‌دهد که تنها تأثیر دوتایی معنادار، اثر «سرعت دورانی×عمق نفوذ» با ۴۸/۸۶ درصد تأثیر است و سایر اثرات دوتایی و سه‌تایی غیرمعنادار هستند.

جدول ۳. نتایج آزمون کشش و سختی سنجی

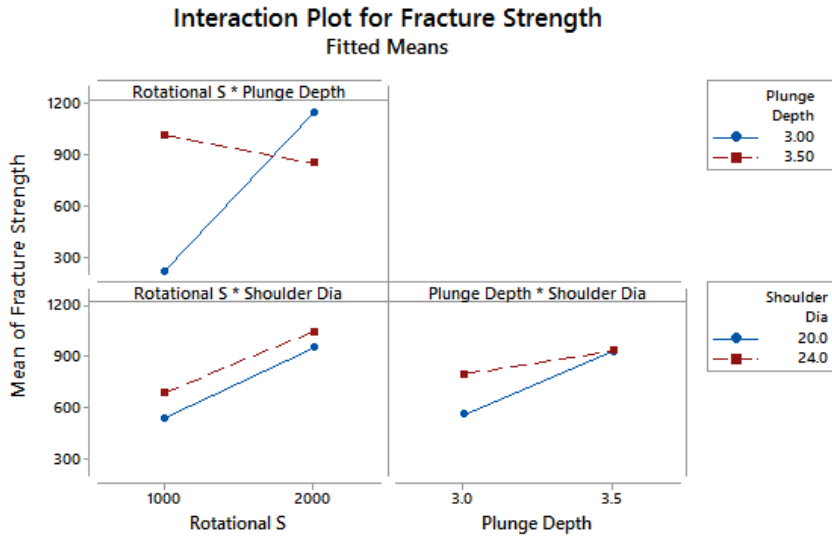
شماره نمونه	نیروی شکست (N)	سختی (HV100gr)		
		آزمون ۱	آزمون ۲	آزمون ۳
۱	۲۱۶/۳۶	۷۹	۸۱	۸۰
۲	۲۰۸/۵۸	۷۹	۸۵	۸۴
۳	۸۶۳/۸۴	۹۲	۹۰	۹۲
۴	۱۱۷۱/۴۵	۷۷	۷۹	۷۸
۵	۹۰۳/۸۷	۷۷	۹۲	۸۸
۶	۱۳۸۹/۵۱	۷۹	۹۲	۸۶
۷	۹۹۹/۷۳	۶۴	۷۱	۶۶
۸	۷۰۲/۶۶	۶۹	۷۴	۷۷

جدول ۴. تحلیل واریانس تأثیر متغیرهای ورودی بر نیروی شکست

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۶	۱۰۸۹۰۱۳	۸۷.۸۴%	۱۰۸۹۰۱۳	۱۸۱۵۰۲	۱.۲۰	۰.۶۰۳
Linear	۳	۴۵۴۴۳۶	۳۶.۶۶%	۴۵۴۴۳۶	۱۵۱۴۷۹	۱.۰۰	۰.۶۰۸
Rotational Speed	۱	۲۹۴۷۳۵	۲۳.۷۷%	۲۹۴۷۳۵	۲۹۴۷۳۵	۱.۹۶	۰.۲۹۵
Plunge depth	۱	۱۲۹۸۸۳	۱۰.۴۸%	۱۲۹۸۸۳	۱۲۹۸۸۳	۰.۸۶	۰.۵۲۴
Shoulder Diameter	۱	۲۹۸۱۷	۲.۴۱%	۲۹۸۱۷	۲۹۸۱۷	۰.۲۰	۰.۷۳۴
2-Way Interactions	۳	۶۳۴۵۷۸	۵۱.۱۹%	۶۳۴۵۷۸	۲۱۱۵۲۶	۱.۴۰	۰.۵۳۹
Rotational Speed×Plunge depth	۱	۶۰۵۷۳۰	۴۸.۸۶%	۶۰۵۷۳۰	۶۰۵۷۳۰	۴.۰۲	۰.۲۹۵
Rotational Speed×Shoulder Diameter	۱	۱۵۴۷	۰.۱۲%	۱۵۴۷	۱۵۴۷	۰.۰۱	۰.۹۳۶
Plunge depth×Shoulder Diameter	۱	۲۷۳۰۰	۲.۲۰%	۲۷۳۰۰	۲۷۳۰۰	۰.۱۸	۰.۷۴۴
Error	۱	۱۵۰۷۳۰	۱۲.۱۶%	۱۵۰۷۳۰	۱۵۰۷۳۰		
Total	۷	۱۲۳۹۷۴۴	۱۰۰.۰۰%				

Main Effects Plot for Fracture Strength  
Fitted Means

شکل ۷. تأثیر متغیرهای ورودی بر نیروی شکست در دو سطح



شکل ۸. اثرات متقابل متغیرهای ورودی بر نیروی شکست

### بررسی سختی و تأثیر متغیرها بر آن

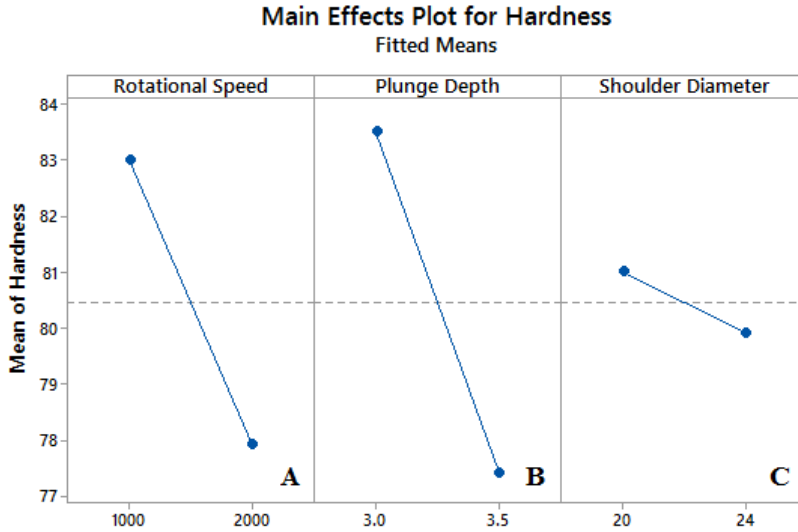
آزمون سختی روی هریک از نمونه‌ها ۳ بار در ناحیه اغتشاشی هر نمونه تکرار شد که نتایج در جدول ۳ ارائه شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص شد بیشترین و کمترین میزان سختی به ترتیب ۹۲ و ۶۴ ویکرز می‌باشد. نتایج آزمون سختی‌سنجی توسط نرم‌افزار مینی‌تب تجزیه و تحلیل گردید و مشخص شد که بیشترین تأثیر مربوط به اثر ترکیبی کل عوامل و کمترین تأثیر مربوط به قطر شانه می‌باشد. جدول ۵ میزان تأثیر متغیرهای مختلف بر سختی را نشان می‌دهد.

طبق جدول ۵، تأثیر سرعت دورانی و میزان سختی ۱۰/۰۸ درصد است. شکل ۹ قسمت A میزان سختی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که سرعت دورانی و سختی در این آزمایش، نسبت معکوس دارند؛ یعنی با افزایش سرعت دورانی از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه میزان سختی کاهش یافته است. همچنین تأثیر عمق نفوذ بر میزان سختی ۱۴/۴۴ درصد به‌دست آمد که بیشترین مقدار است و بنابراین عمق نفوذ تأثیر به‌سزایی بر میزان سختی می‌گذارد. میزان سختی در عمق نفوذ ۳ و ۳/۵ میلی‌متر در شکل ۹ قسمت B نشان داده شده است. می‌توان نتیجه گرفت عمق نفوذ بر میزان سختی تأثیر معکوس گذاشته است؛ یعنی در عمق نفوذ ۳ میلی‌متر نسبت به عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر سختی بیشتری به‌دست آمده است. تأثیر قطر شانه بر سختی همانند آزمون کشش بسیار کم و در حدود ۰/۴۶ درصد به‌دست آمد اما به دلیل بالا بودن درصد مشارکت اثر متقابل قطر شانه و دیگر متغیرها، نمی‌توان گفت که قطر شانه تأثیری در سختی ندارد بلکه در محدوده انتخابی در این آزمایش، تأثیر زیادی ندارد. به همین دلیل نمی‌توان متغیر قطر شانه را حذف کرد و آن را نادیده گرفت. شکل ۹ قسمت C تأثیر شانه با قطر ۲۰ و ۲۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

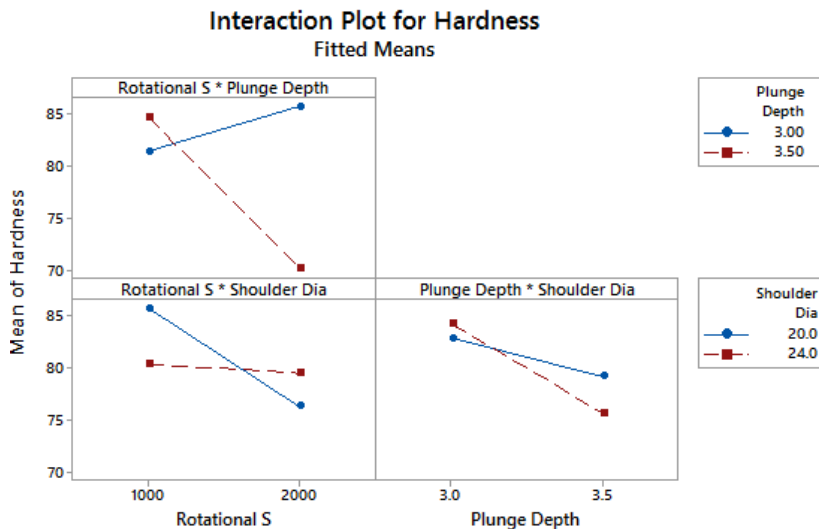


جدول ۵. تحلیل واریانس تأثیر متغیرهای ورودی بر میکروسختی

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Model	۷	۱۲۴۶.۶۳	۸۱.۰۶%	۱۲۴۶.۶۳	۱۷۸.۰۸۹	۹.۷۸	۰.۰۰۰
Linear	۳	۳۸۴.۱۲	۲۴.۹۸%	۳۸۴.۱۳	۱۲۸.۰۴۲	۷.۰۳	۰.۰۰۳
Rotational Speed	۱	۱۵۵.۰۴	۱۰.۰۸%	۱۵۵.۰۴	۱۵۵.۰۴۲	۸.۵۱	۰.۰۱۰
Plunge depth	۱	۲۲۲.۰۴	۱۴.۴۴%	۲۲۲.۰۴	۲۲۲.۰۴۲	۱۲.۱۹	۰.۰۰۳
Shoulder Diameter	۱	۷.۰۴	۰.۴۶%	۷.۰۴	۷.۰۴۲	۰.۳۹	۰.۵۴۳
2-Way Interactions	۳	۶۷۵.۴۶	۴۲.۹۲%	۶۷۵.۴۶	۲۲۵.۱۵۳	۱۲.۳۷	۰.۰۰۰
Rotational Speed×Plunge depth	۱	۵۳۲.۰۴	۳۴.۵۹%	۵۳۲.۰۴	۵۳۲.۰۴۲	۲۹.۲۲	۰.۰۰۰
Rotational Speed×Shoulder Diameter	۱	۱۰۸.۳۸	۷.۰۵%	۱۰۸.۳۸	۱۰۸.۳۷۵	۵.۹۵	۰.۰۲۷
Plunge depth×Shoulder Diameter	۱	۳۵.۰۴	۲.۲۸%	۳۵.۰۴	۳۵.۰۴۲	۱.۹۲	۰.۱۸۴
3-Way Interactions	۱	۱۸۷.۰۴	۱۲.۱۶%	۱۸۷.۰۴	۱۸۷.۰۴۲	۱۰.۲۷	۰.۰۰۶
Rotational Speed×Plunge depth×Shoulder Diameter	۱	۱۸۷.۰۴	۱۲.۱۶%	۱۸۷.۰۴	۱۸۷.۰۴۲	۱۰.۲۷	۰.۰۰۶
Error	۱۶	۲۹۱.۳۳	۱۸.۹۴%	۲۹۱.۳۳	۱۸.۲۰۸		
Total	۲۳	۱۵۳۷.۹۶	۱۰۰.۰۰%				



شکل ۹. تأثیر متغیرهای ورودی بر نیروی میکروسختی



شکل ۱۰. تأثیرات متقابل متغیرهای ورودی بر میکروسختی

نتایج حاصل از شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، قطر شانه ۲۰ میلی‌متر سختی بالاتری را به‌دست می‌دهد و در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه با قطر شانه ۲۴ میلی‌متر جوش سخت‌تری به‌دست می‌آید. در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر سختی بالاتری را به‌دست می‌دهد و در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه عمق نفوذ ۳ میلی‌متر نسبت به عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر سختی بالاتری را به‌دست می‌دهد. در عمق نفوذ ۳ میلی‌متر قطر شانه ۲۴ میلی‌متر سختی بالاتری را نسبت به قطر شانه ۲۰ میلی‌متر به‌دست می‌دهد و

در عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر قطر شانه ۲۰ میلی‌متر سختی بالاتری را نسبت به قطر شانه ۲۴ میلی‌متر به دست می‌دهد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که در میان اثرات متقابل، اثر دوتایی «سرعت دورانی × عمق نفوذ» بیشترین تأثیر را به میزان ۳۴/۵۹ درصد دارد. اثر دوتایی «سرعت دورانی × قطر شانه» دارای تأثیر کم به میزان ۷/۰۵ درصد می‌باشد و سایر تأثیرات دوتایی غیرمعنادار هستند. اثر سه‌تایی «سرعت دورانی × قطر شانه × عمق نفوذ» نیز به میزان ۱۲/۱۶ درصد بر سختی تأثیر گذاشته است.

### بهینه‌یابی عوامل

بهینه‌یابی عوامل کمک می‌کند تا بتوان ترکیبی از سطوح متغیرهای ورودی مؤثر بر یک یا چند پاسخ را با هدف بزرگ‌ترین پاسخ، کوچک‌ترین پاسخ، یا پاسخ موردنظر پیدا کرد [۲۳]. در این آزمایش از نرم‌افزار مینی‌تب برای بهینه‌یابی استفاده شده است. این نرم‌افزار برای یافتن پاسخ بهینه از تابع مطلوبیت استفاده می‌کند. در این تابع، حالت بهینه یا مطلوب هر متغیر پاسخ، به صورت تکی با  $d$  نشان داده می‌شود که می‌تواند یکی از سه حالت حداکثر، حداقل، یا هدف مشخص شده باشد. در این مقاله، بهینه‌یابی در سه حالت با هدف پیدا کردن بیشترین نیروی شکست، بیشترین سختی و ترکیبی از این دو مورد با سطوح مختلف سرعت دورانی، عمق نفوذ و قطر شانه انجام شد. در حالت اول، بیشترین نیروی شکست معادل ۱۳۸۹/۵۱ نیوتن در نمونه شماره ۶ با سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، عمق نفوذ ۳ میلی‌متر و قطر شانه ۲۴ میلی‌متر به دست آمد و درجه مطلوبیت آن ۱ یا ۱۰۰ درصد می‌باشد. در حالت دوم بیشترین سختی به میزان میانگین ۹۱/۳۳ ویکرز در نمونه شماره ۳ با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر و قطر شانه ۲۰ میلی‌متر به دست آمد و درجه مطلوبیت آن ۰/۹۷ یا ۹۷ درصد می‌باشد. در حالت سوم بهینه‌یابی، بیشترین نیروی شکست و بیشترین میانگین سختی در نمونه شماره ۶ به ترتیب ۱۳۸۹/۵۱ نیوتن و ۸۵/۶۶ ویکرز به دست آمد. در این حالت بهینه‌یابی، مطلوبیت برای نیروی شکست ۹۹ درصد و سختی ۷۷ درصد و مطلوبیت کل ۸۷ درصد به دست آمد.

### نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با استفاده از ابزار با شانه ثابت روی ورق آلومینیوم غیرآلیاژی به‌منظور بررسی تأثیر متغیرهای سرعت دورانی، عمق نفوذ و قطر شانه بر نیروی شکست و سختی انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- تمامی نمونه‌ها دارای کیفیت ظاهری مناسب می‌باشند.
- متغیر قطر شانه در محدوده ۲۴-۲۰ میلی‌متر تأثیر بسیار کمی دارد.
- در بررسی اثرات اصلی و متقابل متغیرها بر استحکام اتصال مشخص شد که به ترتیب اثرات دوتایی «سرعت دورانی × عمق نفوذ» با ۴۸/۸۶ درصد، اثر اصلی سرعت دورانی با ۲۳/۷۷ درصد و اثر اصلی عمق نفوذ با ۱۰/۴۸ درصد بیشترین تأثیر را بر نیروی شکست گذاشته‌اند.
- بیشترین استحکام شکست در نمونه ۶ با سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، قطر شانه ۲۴ میلی‌متر و عمق نفوذ ۳ میلی‌متر و کمترین استحکام شکست در نمونه ۲ با همان متغیرها و تغییر سرعت دورانی به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به دست آمد و می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش سرعت دورانی نیروی شکست نیز افزایش پیدا کرده است.
- در بررسی تأثیرات اصلی و متقابل متغیرها بر میزان سختی مشخص گردید که به ترتیب تأثیرات دوتایی «سرعت دورانی × عمق نفوذ» با ۳۴/۵۹ درصد، اثر اصلی عمق نفوذ با ۱۴/۴۴ درصد، اثر سه‌تایی «سرعت دورانی × عمق نفوذ × قطر شانه × سرعت دورانی» با ۱۲/۱۶ درصد و اثر اصلی قطر شانه با ۷/۰۵ درصد بیشترین تأثیر را بر سختی گذاشته است.

- دورانی × عمق نفوذ × قطر شانه» با ۱۲/۱۶ درصد و اثر اصلی سرعت دورانی با ۱۰/۰۸ درصد بیشترین تأثیر را بر سختی دارند.
- بیشترین سختی مربوط به نمونه شماره ۳ با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، عمق نفوذ ۳/۵ میلی‌متر و قطر شانه ۲۰ میلی‌متر و کمترین سختی مربوط به نمونه شماره ۷ با همان متغیرها و فقط تغییر سرعت دوران به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمد؛ بنابراین می‌توان گفت افزایش سرعت دورانی باعث کاهش سختی شده است.

## References

- [1] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [2] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J. (1997). *Friction welding*. (US5460317B1). <https://patents.google.com/patent/US5460317B1/en>
- [3] Sun, T., Roy, M. J., Strong, D., Simpson, C., Withers, P. J., & Prangnell, P. B. (2019). Weld zone and residual stress development in AA7050 stationary shoulder friction stir T-joint weld. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.022>
- [4] Wen, Q., Li, W. Y., Wang, W. B., Wang, F. F., Gao, Y. J., & Patel, V. (2019). Experimental and numerical investigations of bonding interface behavior in stationary shoulder friction stir lap welding. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(1), 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.028>
- [5] Ahmed, M. M. Z., Wynne, B. P., Rainforth, W. M., & Threadgill, P. L. (2011). Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium. *Scripta Materialia*, 64(1), 45-48. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.060>
- [6] Li, J. Q., & Liu, H. J. (2013). Effects of tool rotation speed on microstructures and mechanical properties of AA2219-T6 welded by the external non-rotational shoulder assisted friction stir welding. *Materials & Design*, 43, 299-306. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.011>
- [7] Ji, S. D., Meng, X. C., Liu, J. G., Zhang, L. G., & Gao, S. S. (2014). Formation and mechanical properties of stationary shoulder friction stir welded 6005A-T6 aluminum alloy. *Materials & Design* 62, 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.016>
- [8] Li, D., Yang, X., Cui, L., He, F., & Shen, H. (2014). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA6061-T6 butt welded joints by stationary shoulder friction stir welding. *Materials & Design*, 64, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.046>
- [9] Maltin, C. A., Nolton, L. J., Scott, J. L., Toumpis, A. I., & Galloway, A. M. (2014). The potential adaptation of stationary shoulder friction stir welding technology to steel. *Materials & Design*, 64, 614-624. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.017>
- [10] Li, D., Yang, X., Cui, L., He, F., & Zhang, X. (2015). Investigation of stationary shoulder friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.036>
- [11] Davies, P. S., Wynne, B. P., Rainforth, W. M., Thomas, M. J., & Threadgill, P. L. (2011). Development of Microstructure and Crystallographic Texture during Stationary Shoulder Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(8), 2278-2289. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0606-2>

- [12] Ji, S. D., Meng, X. C., Li, Z. W., Ma, L., & Gao, S. S. (2016). Experimental Study of Stationary Shoulder Friction Stir Welded 7N01-T4 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(3), 1228-1236. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1954-2>
- [13] Sun, T., Tremsin, A. S., Roy, M. J., Hofmann, M., Prangnell, P. B., & Withers, P. J. (2018). Investigation of residual stress distribution and texture evolution in AA7050 stationary shoulder friction stir welded joints. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 531-538. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.019>
- [14] Li, W., Niu, P. L., Yan, S. R., Patel, V., & Wen, Q. (2019). Improving microstructural and tensile properties of AZ31B magnesium alloy joints by stationary shoulder friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.014>
- [15] Liu, H., Hu, Y., Wang, H., Du, S., & Sekulic, D. P. (2018). Stationary shoulder supporting and tilting pin penetrating friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 596-604. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.010>
- [16] Liu, Z., Meng, X., Ji, S., Li, Z., & Wang, L. (2018). Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic-assisted stationary shoulder friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 552-559. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.12.022>
- [17] Goebel, J., Reimann, M., Norman, A., & dos Santos, J. F. (2017). Semi-stationary shoulder bobbin tool friction stir welding of AA2198-T851. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.011>
- [18] Kumar, B. V., Srikanth, B., Raju, B., Sandeep, C., & Indu, D. (2019). Friction Stir Spot Welding of Aluminium Alloy (AA6063). *Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 3(3), 1291-1294. <https://doi.org/10.31142/jtsrd23316>
- [19] Asadi Borojeni, B., & Mozafari Vanani, L. (2020). The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 133-145. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112761>
- [20] Ghasemi Tamami, P., Javadimanesh, A., & Mardani, S. (2021). Investigation and optimization of friction stir welding process of aluminum 5010 to 6061. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 281-311. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128408>
- [21] Dorudgar, M., Seyedkashi, S. M. H., & Sajed, M. (2021). Experimental study on manufacturing of bi-metal sandwiches with aluminum foam core and copper layers using friction stir welding. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 7(12), 1-9. [http://www.iranjme.ir/article\\_129685\\_08479b48e9b6f6c3bd0fa409aac\\_262c0.pdf](http://www.iranjme.ir/article_129685_08479b48e9b6f6c3bd0fa409aac_262c0.pdf)
- [22] Sajed, M., & Bisadi, H. (2016). Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys. *Welding in the World*, 60(1), 33-40. <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0268-6>
- [23] Khoran, M., & Seyedkashi, S. M. H. (2017). Investigation and Optimization of Damage Factor in Drilling of Parabeam Three-dimensional Composites. *Modares Mechanical Engineering*, 16(10), 51-59. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-8502-en.html> <http://mme.modares.ac.ir/article-15-8502-en.pdf>