

علمی- پژوهشی

## بهینه‌سازی چند هدفه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از روش

## طراحی تاگوچی، سطح پاسخ و الگوریتم ازدحام ذره

محمد کشفی<sup>۳</sup>گروه مهندسی مکانیک  
دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردیمحسن قاسمی<sup>۲</sup>گروه ساخت و تولید  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفولپرویز کحال<sup>۱</sup>گروه مهندسی مکانیک  
دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸)

## چکیده

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اولین بار در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط مؤسسه جوشکاری بریتانیا به‌عنوان روش اتصال حالت جامد ابداع و برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به‌کار گرفته شد. این روش، بازدهی انرژی بالا و سازگاری خوبی با محیط زیست دارد. در مجموع، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مناسب فلزاتی است که نقطه ذوب پایین داشته و جوشکاری ذوبی آن‌ها کیفیت مطلوبی ندارد. در این پژوهش بهینه‌سازی چند هدفه خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AH12 1050 با استفاده از ترکیب روش‌های سطح پاسخ و بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذره انجام شده است. همچنین، برای طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده شده است. در این روش متغیرهایی از جمله قطر پین ابزار، قطر شانه، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف به‌عنوان متغیرهای فرآیند و ۳ متغیر استحکام نهایی، چقرمگی و سختی در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی به‌عنوان توابع هدف انتخاب شده‌اند. علاوه بر این تمام بررسی‌ها بر روی دو نوع پین استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی ساده و به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است. در نهایت نتایج بهینه‌سازی و دقت حداقل ۹۳٪ پیش‌بینی نشان‌دهنده انطباق خوب مدل پیش‌بینی کننده سطح پاسخ و آزمایش می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص مکانیکی، روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی چند هدفه و ازدحام ذره.

## The Multi-Objective Optimization of the Friction Stir Welding using the Taguchi Design Method, the Response Surface Model and the Particle Swarm Algorithm

P. Kahhal<sup>3</sup>Mechanical engineering  
department, Engineering faculty,  
Ayatollah Boroujerdi UniversityM. Ghasemi<sup>2</sup>Mechanical Engineering  
Department Dezful Branch,  
Islamic Azad UniversityM. Kashfi<sup>1</sup>Mechanical engineering  
department, Engineering faculty,  
Ayatollah Boroujerdi University

(Received: 09/02/2021; Accepted: 29/05/2021)

## ABSTRACT

The friction stir welding method was first developed in 1991 at the British Welding Institute as a solid-state bonding method and employed for welding aluminum alloys. This method has high energy efficiency and good compatibility with the environment. In general, the frictional stir welding process is suitable for metals with a low melting point, whose melting welding is not of good quality. In this research, multi-objective optimization of the mechanical properties in the friction welding of AH12 1050 aluminum alloy has been performed experimentally using a combination of response surface methods and multi-objective particle swarm optimization. The Taguchi method has also been utilized to design experiments with two types of threaded cylindrical and simple tapered pins. Pin diameter, shoulder diameter, tool rotational speed, tool feed, and tool deviation angle are selected as the process variables. Specimen strength, toughness, and hardness are considered as objective functions. The optimization results and a prediction accuracy of more than 93%, show a good agreement between the surface prediction model and the experiments despite the complexity of the process.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Mechanical Properties, Response Surface Methodology, Multi-Objective Optimization

<sup>۱</sup> استادیار (نویسنده پاسخگو): parvizkahhal@abru.ac.ir<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد: mohsen.ghasemi.brj@gmail.com<sup>۳</sup> استادیار: m.kashfi@abru.ac.ir

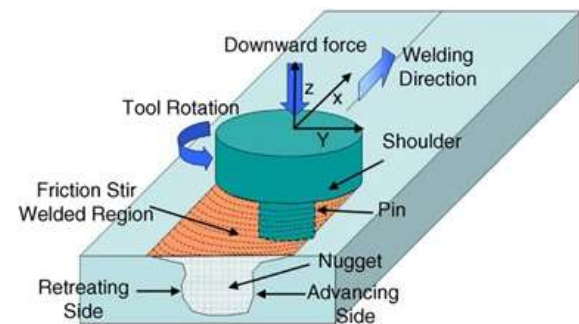
## ۱- مقدمه

اصطکاکی دورانی قطعات از جنس فولاد CK40 بررسی نمودند. مرادی و همکاران [۵] تأثیر سرعت چرخشی و سرعت خطی ابزار بر روی ریزساختار، ماکروساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژهای غیرمشابه آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ را بررسی نمودند. لئون و جایاکومار [۶] تأثیر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر استحکام کششی، ریزساختار و سختی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بررسی کردند. یوسف و همکاران [۷] از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی متغیرهای موثر بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیومی استفاده نمودند. ساندرام و موراکان [۸] تأثیر هندسه پین را برای جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۵۰۸۳ را مورد بررسی قرار دادند.

در پژوهش‌های فوق صرفاً به بررسی فرآیند تحت تاثیر متغیرهای موثر پرداخته شده است. در زمینه بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز پژوهش‌های مختلفی انجام شده است.

غفارپور و همکاران [۹] تأثیر متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش متدولوژی سطح پاسخ به بهینه‌سازی متغیرهای موثر فرآیند جوشکاری و مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از آزمون تجربی پرداختند. سخایی و همکاران [۱۰] اثر ۳ متغیر سرعت دورانی، عمق نفوذ ابزار و سرعت پیشروی ابزار را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵، جهت دستیابی به بیشترین نیروی شکست و مطالعه حالت شکست در اتصالات، با استفاده از روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی سطح پاسخ بررسی کردند. فلاحی و حسینی [۱۱] بهینه‌سازی استحکام و خواص حرارتی در اتصال لب به لب آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۶۰۶۱ را به روش تاگوچی بررسی نمودند. یوواراج و همکاران [۱۲] به بررسی متغیرهای موثر بر استحکام کششی را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را با استفاده از رویکردهای مطلوبیت بررسی و بهینه‌سازی پرداختند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۱ توسط انستیتوی جوشکاری<sup>۲</sup> برای اتصال قطعات آلومینیومی ارائه گردیده است [۱]. از میان روش‌های حالت جامد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عملیاتی است که در آن اتصال بدون ذوب قطعات انجام می‌شود. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، اجزاء تحت اتصال کاملاً نزدیک یکدیگر قرار می‌گیرند، سپس ابزاری در فصل مشترک آن‌ها قرار گرفته و با حرکت در راستای درز اتصال عمل جوشکاری انجام می‌گیرد.



شکل (۱): فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۲].

ابزار از دو بخش با نام‌های شانه<sup>۳</sup> و پین<sup>۴</sup> تشکیل شده است. شانه به شکل استوانه‌ای است، اما پین می‌تواند پروفیل‌های مختلفی داشته باشد. در اثر گردش ابزار و تماس شانه با سطح قطعه کار، گرمای زیادی به دلیل اصطکاک میان شانه ابزار و قطعه کار تولید شده که موجب نرم شدن ماده تحت اتصال می‌شود و پس از آن با حرکت و چرخش پین، عمل اغتشاش صورت می‌گیرد [۲].

پژوهش‌های زیادی بر فناوری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی آلیاژهای همجنس و غیرهمجنس انجام شده است. ساهین [۳] متغیرهای موثر بر جوشکاری اصطکاکی دورانی فولاد تندبر را به فولاد ساده کربنی بررسی نمود. نتایج این محقق نشان داد بالاترین استحکام کششی در زمان اصطکاک ۳/۷ s و فشار اصطکاک ۶۰۰ MPa به‌دست می‌آید. همچنین، ساهین و همکاران در پژوهشی دیگر [۴]، اثر متغیرهای جوشکاری را بر استحکام جوش در جوشکاری

<sup>۱</sup> Friction Stir Welding (FSW)

<sup>۲</sup> The Welding Institute (TWI)

<sup>۳</sup> Shoulder

<sup>۴</sup> Pin

از داده‌های موجود و روش سطح پاسخ<sup>۴</sup>، رابطه بین متغیرها و توابع هدف تخمین زده شده و در نهایت حالت‌های بهینه به صورت آزمایشگاهی جوشکاری شده و نتایج آن‌ها را با مقادیر بهینه‌سازی مقایسه می‌شوند.

## ۲- روند بهینه‌سازی

### ۲-۱- طراحی آزمایش‌ها: مدل سطح پاسخ

مدل‌های سطح پاسخ در مواقعی به کار گرفته می‌شوند که تصمیم‌گیرنده می‌خواهد: ۱- پیش‌بینی تقریباً دقیق از رابطه ورودی و خروجی یک سیستم مهندسی به دست آورد. ۲- کل سیستم در حال طراحی را بهینه یا تنظیم کند. در بهینه‌سازی‌های عددی بر مبنای گرادیان، ممکن است مسأله به جای همگرا شدن به یک بهینه محلی یا کلی، به نقطه عطف همگرا شود [۱۶].

اگر تعداد  $n_s$  تحلیل انجام شده باشد و  $p = 1, 2, \dots, n_s$  آنگاه یک مدل سطح پاسخ درجه دو به فرم زیر خواهد بود:

$$y^{(p)} = c_0 + \sum_{1 \leq j \leq n_v} c_j X_j^{(p)} + \sum_{1 \leq j \leq k \leq n_v} c_{(n_v-1+j+k)} X_j^{(p)} X_k^{(p)} \quad (1)$$

که  $y^{(p)}$  پاسخ،  $X_j^{(p)}$  و  $X_k^{(p)}$  متغیرهای طراحی شماره  $n_v$  می‌باشند. همچنین  $c_0$ ،  $c_j$  و  $c_{(n_v-1+j+k)}$  ضرایب مجهول چند جمله‌ای می‌باشند.

روش طراحی آزمایش می‌تواند به درک مشخصه‌های فرآیند و بررسی اثر ورودی روی پاسخ خروجی کمک کند. به علاوه، می‌تواند به صورت سیستماتیک متغیرهای بهینه فرآیند را با تعداد آزمایش‌های کمتر، تعیین نماید [۱۷]. ساختن این مدل‌های جانشین نیاز به چند نمونه برای ساختار بندی سطح پاسخ مربوط به فرآیند جوش دارد و این نمونه‌ها می‌توانند توسط روش‌های طراحی آزمایش، از قبیل مراحل هالتون<sup>۵</sup>، فرامکعب لاتین<sup>۶</sup>، روش تاگوچی<sup>۷</sup> و طراحی کلاسیک<sup>۸</sup> تولید شوند.

در پژوهش‌های فوق بهینه‌سازی انجام گرفته به صورت تک هدفه و با یک تابع هدف در نظر گرفته شده است.

پاندیاراجان و ماریمتو [۱۳] بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را با در نظر گرفتن چهار متغیر موثر و دو تابع هدف انجام دادند. بهینه‌سازی با استفاده از رویکرد تابع مطلوبیت<sup>۱</sup> و بررسی متغیرهای موثرتر در فرآیند انجام گرفته است. جانگرا و همکاران [۱۴] چهار متغیر موثر بر استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم بررسی نمودند.

شوبهام و همکاران [۱۵] با بررسی چهار متغیر موثر، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم، با استفاده از دو روش الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک ترکیبی بهینه‌سازی کردند.

در پژوهش‌های مذکور و پژوهش‌های مشابه، بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از روش‌های آماری مانند تابع مطلوبیت انجام شده است. در دیگر پژوهش‌ها [۱۶]، تعداد توابع هدف حداکثر ۲ تابع بوده و یا اینکه متغیرهای تاثیرگذار در مجموع ۳ متغیر هستند.

در پژوهش حاضر سه تابع هدف و پنج متغیر موثر طراحی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، بهینه‌سازی به روش ازدحام ذره چندهدفه انجام می‌گیرد که از الگوریتم‌های فراکتشافی<sup>۲</sup> به‌شمار می‌آید. سرعت بالای همگرایی و سادگی نسبی الگوریتم ازدحام ذره، آن را به عنوان کاندیدایی بسیار مناسب برای استفاده در مشکلات بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل کرده است. هدف از انجام این پژوهش بهینه‌سازی چندهدفه استحکام نهایی، چقرمگی و سختی در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی<sup>۳</sup>، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم A-H12 ۱۰۵۰ به شکل لب به لب و با ضخامت ۵ mm می‌باشد. متغیرهای فرآیند شامل قطر پین، قطر شانه، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف ابزار می‌باشند. سپس رفتار نمونه‌ها به آزمایش‌های کشش، ضربه و سختی سنجی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با استفاده

<sup>4</sup> Response Surface Method (RSM)

<sup>5</sup> Halton Sequence

<sup>6</sup> Latin Hypercube Design (LHD)

<sup>7</sup> Taguchi Method

<sup>8</sup> Classic Design

<sup>1</sup> Desirability function approach

<sup>2</sup> Meta-heuristic algorithms

<sup>3</sup> Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

**گام ۴.** اجرای الگوریتم ازدحام ذره چند هدفه: هنگامی که مدل سطح پاسخ ساخته شد، روش بهینه سازی الگوریتم ازدحام ذره چند هدفه را می توان برای جستجوی راه حل بهینه پارتو استفاده کرد. در روند بهینه سازی از انجام آزمایشگاهی جوشکاری استفاده نمی شود و تنها برای به دست آوردن تابع هدف از این طریق انجام شده و در روند بهینه سازی از توابع تخمینی استفاده می شود. در نتیجه زمان و هزینه محاسباتی بهینه سازی کاهش می یابد.

**گام ۵.** بررسی شرایط پایان: اگر تعداد تولید نسل ها به حد مورد نظر برسد، روند بهینه سازی متوقف می شود و متغیرهای بهینه مورد بررسی قرار می گیرند. در این پژوهش تعداد نسل تولید شده به عنوان شرط پایانی در نظر گرفته شده است. در صورت بررسی و رسیدن تعداد نسل مشخص شده، فرآیند بهینه سازی پایان می یابد، در غیر این صورت تحلیل های جدید به نمونه های قبلی اضافه شده و الگوریتم به گام سوم بر می گردد.

### ۲-۳- مدل بهینه سازی چند هدفه

هدف از بهینه سازی چند هدفه در این تحقیق به دست آوردن بهترین ترکیب از متغیرهای فرآیند یا متغیرهای طراحی می باشد که طراح را به سوی یک جوشکاری بهینه شده، هدایت می کند. مدل بهینه سازی چندهدفه را می توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$\text{Minimize } \mathbf{F}(\mathbf{X}) = (f_1(\mathbf{x}_1), f_2(\mathbf{x}_2), \dots, f_j(\mathbf{x}_j))$$

$$i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,m$$

$$\text{Subject to } b_i^{\text{lower}} \leq \mathbf{x}_i \leq b_i^{\text{upper}} \quad (2)$$

$$i=1,2,\dots,n$$

$$g_k(\mathbf{x}_i) \leq 0, \quad k=1,2,\dots,p$$

که  $\mathbf{X}$  بردار متغیرهای طراحی و  $x_i$  متغیر طراحی نام که زیرمجموعه ای از بردار  $\mathbf{X}$  می باشد،  $b_i^{\text{upper}}$  و  $b_i^{\text{lower}}$  کران های پایین و بالای  $x_i$  تابع هدف  $f_j(x_i)$  زام مربوط به  $x_i$  و  $g_k(x_i)$  تابع قید  $k$  ام مربوط به  $x_i$  می باشند [۱۸].

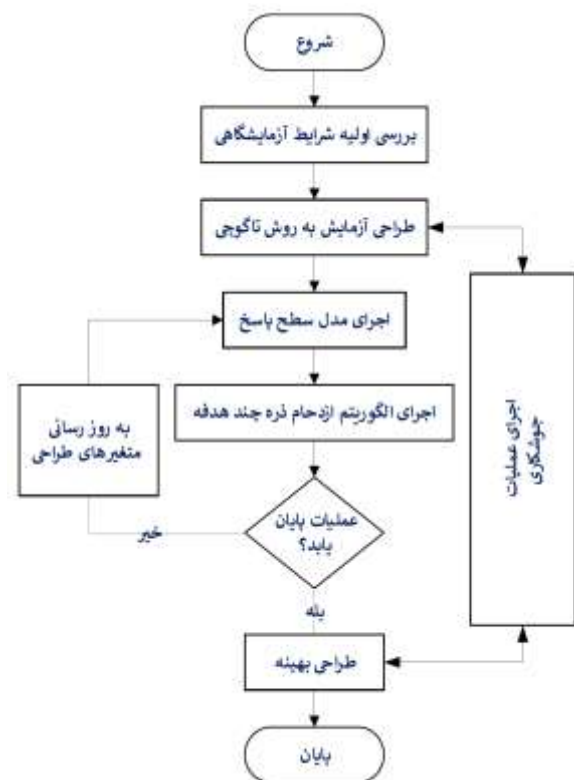
### ۲-۴- الگوریتم بهینه سازی چندهدفه

جهت بهینه سازی از مدل سطح پاسخ برای طراحی آزمایش استفاده شده است. همچنین، بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذره و جبهه پارتو برای انجام بهینه سازی ترکیب شده اند. برای یک مسئله کمینه سازی، جواب عملی یک راه حل

در این پژوهش از طراحی تاگوجی برای طراحی آزمایش استفاده و یک مدل درجه دو برای ساختن مدل سطح پاسخ با به کارگیری جعبه ابزار MBCMODEL در نرم افزار MATLAB به دست آمده است.

### ۲-۲- روند بهینه سازی

شکل ۲ دیاگرام روند بهینه سازی را نشان می دهد که به پنج گام تقسیم می شود:



شکل (۲): دیاگرام روند بهینه سازی

**گام ۱.** مدل اولیه: مدل بهینه سازی اولیه برای شرایط اولیه راه اندازی شده است.

در این پژوهش از نرم افزار MATLAB جهت کدنویسی الگوریتم چند هدفه ازدحام ذره استفاده شده است.

**گام ۲.** طراحی آزمایش: برای ساختن مدل سطح پاسخ درجه دوم، هر کدام از مدل های طراحی آزمایش، تحت شرایط آزمایشگاهی انجام شده و توابع هدف برای هر نقطه از ماتریس طراحی آزمایش به دست می آیند.

**گام ۳.** ساختن مدل سطح پاسخ: بر اساس رابطه (۱)، توابع سطح پاسخ با استفاده از طراحی آزمایش به دست می آیند.

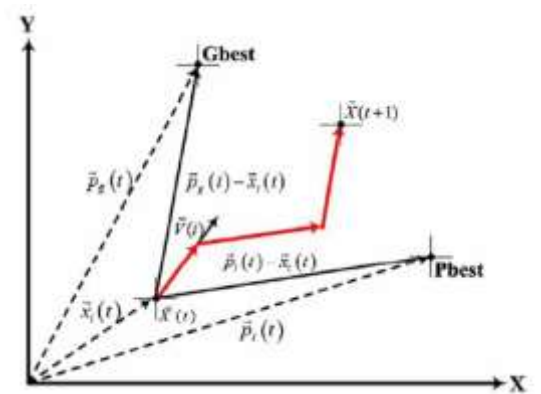
در یک مسئله خاص، هر ذره از گروه می‌تواند با یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت نمایش داده شود. تغییر موقعیت هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان پذیر است. هر ذره، اطلاعاتی شامل بهترین مقدار (موقعیتی) که تا کنون به دست آورده است (بهینه شخصی<sup>۳</sup>)؛ موقعیتی که در حال حاضر در آن قرار دارد ( $X_{i,t}$ )، و بهترین جوابی که تاکنون کل گروه به دست آمده است (بهینه فراگیر<sup>۴</sup>) را دارا می‌باشد [۲۱].

هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب موقعیت خود را با استفاده از موقعیت کنونی ( $X_{i,t}$ )، سرعت کنونی ( $V_{i,t}$ )، فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه شخصی و فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه فراگیر تغییر می‌دهد. لذا بردار سرعت جدید ( $V_{i,t+1}$ ) برای ذره  $i$ ام طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰].

$$V_{i,t+1} = wV_{i,t} + C_1r_1(P_{i,t} - X_{i,t}) + C_2r_2(G_t - X_{i,t}) \quad (5)$$

که در آن  $r_1$  و  $r_2$  بردارهای تصادفی بین صفر و یک هستند که برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه به کار می‌روند.  $C_1$  و  $C_2$  متغیرهای شناختی و اجتماعی هستند؛ انتخاب مقدار مناسب برای این متغیرها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی می‌شود. موقعیت جدید ذره نیز از رابطه ۶ به دست خواهد آمد. شکل ۴ نحوه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذره را نشان می‌دهد.

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + V_{i,t+1} \quad (6)$$



شکل (۴): عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذره [۱۹].

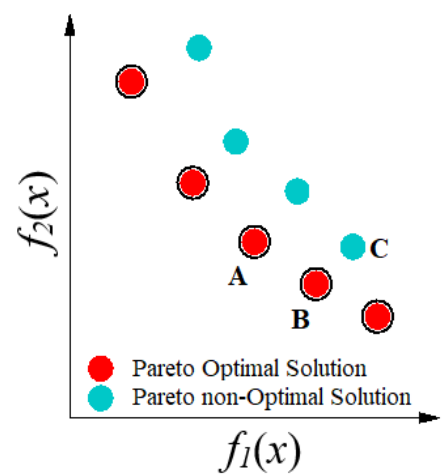
بهینه پارتو است، اگر و تنها اگر هیچگونه راه حل عملی  $x$  دیگری به صورت زیر وجود نداشته باشد:

$$f_i(x) \leq f_i(x^*) \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

و حداقل یک  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) در معادله زیر صدق کند:

$$f_j(x) < f_j(x^*) \quad (4)$$

معادلات بالا مفهوم چیرگی<sup>۱</sup> را بیان می‌کنند. در واقع تابع هدف  $f_i(x^*)$  کوچکتر از تمامی توابع هدف  $f_i(x)$  می‌باشد ولی کوچکتر از تمامی توابع هدف  $f_j(x)$  نمی‌باشد و حداقل یک تابع کوچکتر از آن وجود دارد. برای مثال، در شکل ۳ نقاط دایره‌ای نمایشگر راه‌حل‌های عملی هستند و مقادیر کوچکتر به مقادیر بزرگتر ارجح هستند. نقطه  $C$  یک راه حل پارتو نیست زیرا نقطه  $B$  بر آن چیره شده است ( $f_1(B) < f_1(C)$  و  $f_2(B) < f_2(C)$ ). دو نقطه  $A$  و  $B$  نمی‌توانند بر یکدیگر چیره شوند ( $f_1(A) < f_1(B)$ ) ولی  $f_2(A) > f_2(B)$ ، بنابراین در جبهه پارتو قرار می‌گیرند.



شکل (۳): جبهه پارتو برای یک مساله دو هدفه.

#### ۲-۴-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذره

یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی بهینه‌سازی ازدحام ذره<sup>۲</sup> (PSO) است. ایده‌ی اصلی PSO برگرفته از رفتار اجتماعی دسته از پرندگان است. از آنجایی که استفاده از الگوریتم تنها نیازمند عملگرهای محاسباتی ابتدایی است، اجرای این الگوریتم ساده و از نظر هزینه‌های اقتصادی مقرون به صرفه است [۱۹].

<sup>3</sup> Personal Best  
<sup>4</sup> Global Best

<sup>1</sup> Dominance  
<sup>2</sup> Particle swarm optimization

### ۳- مورد پژوهش

در این پژوهش بهینه‌سازی چند هدفه خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AH12 1050 با استفاده از ترکیب روش‌های سطح پاسخ و بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذره انجام شده است. متغیرهای فرآیند شامل قطر پین، قطر شانه، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف ابزار می‌باشند.



شکل (۵): الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذره.

### ۳-۱- استفاده از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش

با استفاده از طرح آزمایش‌ها می‌توان مطمئن شد که آزمایش‌های انجام شده بیشترین مقدار اطلاعات در باره آن آزمایش را ارائه می‌دهند.

### ۲-۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذره

الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذره<sup>۱</sup> (MOPSO) توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید و در واقع این الگوریتم تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذره (PSO) که برای حل مسائل چندهدفه به کار می‌رود. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن خارجی نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است که به تالار مشاهیر نیز معروف است.

برای مقایسه بهترین بردار خاطره شخصی به شکل زیر عمل می‌کنیم:

۱- اگر واقعیت جدید بهترین خاطره را مغلوب کند، آنگاه موقعیت جدید جای بهترین خاطره را می‌گیرد.

۲- اگر موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شد، کاری انجام نمی‌گیرد.

۳- اگر هیچ کدام یکدیگر را مغلوب نکنند، به تصادف یکی را به عنوان بردار بهترین موقعیت در نظر گرفته می‌شود.

ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

۱- تعیین متغیرهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم به شهرداری چند هدفه ازدحام ذره (MOPSO): حداکثر تکرار برای اجرای الگوریتم، اندازه جمعیت، مقادیر  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  و میزان اعضای مخزن [۲۲].

۲- جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.

۳- بهترین خاطره شخصی هر ذره تعیین می‌شود.

۴- اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیره می‌شوند.

۵- هر ذره از میان اعضای مخزن یک لیدر (رهبر) انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد.

(یعنی سرعت و موقعیت آن به روز می‌شود)

۶- بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذره به روز می‌شوند.

۷- اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می‌شوند.

۸- اعضای مغلوب مخزن حذف می‌شوند. در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است از شماره ۵ به بعد الگوریتم تکرار می‌شود (شکل ۵).

<sup>1</sup> Multi objective particle swarm optimization

جدول (۱): آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی.

ردیف	قطر پین (mm)	قطر شانه (mm)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	زاویه انحراف (degree)
۱	۴	۱۴	۳۱/۵	۶۳۰	۳
۲	۴	۱۸	۸۰	۱۰۰۰	۳
۳	۵	۱۴	۵۰	۱۰۰۰	۳
۴	۵	۱۸	۳۱/۵	۸۰۰	۳
۵	۶	۱۴	۸۰	۸۰۰	۳
۶	۶	۱۸	۵۰	۶۳۰	۳
۷	۴	۱۴	۳۱/۵	۶۳۰	۳/۵
۸	۴	۱۶	۵۰	۸۰۰	۳/۵
۹	۵	۱۴	۵۰	۱۰۰۰	۳/۵
۱۰	۵	۱۶	۸۰	۶۳۰	۳/۵
۱۱	۶	۱۴	۸۰	۸۰۰	۳/۵
۱۲	۶	۱۶	۳۱/۵	۱۰۰۰	۳/۵
۱۳	۴	۱۶	۵۰	۸۰۰	۲/۵
۱۴	۴	۱۸	۸۰	۸۰۰	۲/۵
۱۵	۵	۱۶	۸۰	۶۳۰	۲/۵
۱۶	۵	۱۸	۳۱/۵	۸۰۰	۲/۵
۱۷	۶	۱۶	۳۱/۵	۱۰۰۰	۲/۵
۱۸	۶	۱۸	۵۰	۶۳۰	۲/۵

جدول (۲): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A-H121۰۵۰

ردیف	جنس	درصد وزنی
۱	آلومینیوم	پایه
۲	آهن	۰/۴
۳	مس	۰/۰۵
۴	منیزیم	۰/۰۵
۵	منگنز	۰/۰۵
۶	سیلیکون	۰/۲۵
۷	تیتانیوم	۰/۰۵
۸	روی	۰/۰۷

جدول (۳): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A-H121۰۵۰ [۲۵]

ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	سختی برینل (HRB)	استحکام برشی (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)
۲۳۰	۲۸	۵۸	۱۰۰	۷۰

به جهت بررسی اثر رزوه، ابزارها دو طرفه (یک سمت استوانه رزوه‌دار و یک قسمت مخروط ساده) ساخته شدند.

برای دستیابی به نتیجه مطلوب نیاز به انجام آزمایش‌های متعدد وجود داشت. بنابراین روش‌های مختلفی از طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با توجه به پله‌ای بودن متغیرهای مؤثر و همچنین تعداد متغیرهای مؤثر و پاسخ، روش طراحی آزمایش تاگوچی انتخاب گردید.

متغیرهای موجود شامل ۵ متغیر مستقل و ۳ متغیر پاسخ بوده که عبارتند از: قطر پین، قطر شانه، سرعت دورانی، سرعت پیشروی، زاویه انحراف (به عنوان متغیرهای مؤثر) و استحکام نهایی، چقرمگی و سختی (به عنوان متغیرهای پاسخ). جدول ۱ آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی را نشان می‌دهد. انتخاب متغیرها با توجه میزان تأثیرگذاری آن‌ها و دامنه‌ها با توجه به تحقیق‌های پیشین و امکانات موجود در نظر گرفته شدند.

### ۳-۲- مواد استفاده شده

ورق‌های استفاده شده از آلیاژ آلومینیوم A-H121050 با ضخامت ۵ mm تهیه شدند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این آلیاژ در جداول شماره ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. نمونه‌ها در ابعاد ۵۰ × ۵۰ mm جهت اتصال لبه به لبه تهیه و قبل از عملیات جوشکاری به وسیله استون تمیزکاری شدند.

### ۴- ابزار و تجهیزات جوشکاری

از آنجا که بهترین جنس برای جوشکاری قطعات آلومینیومی فولاد گرمکار H13 می‌باشد [۲۳]، از همین جنس در قطرهای ۱۴، ۱۶ و ۱۸ mm برای ساخت ابزار استفاده شد. هندسه مورد نظر توسط دستگاه تراش TN50B-R تبریز روی مواد اولیه پیاده‌سازی گردید. طبق مطالعات صورت گرفته در اتصال لب به لب آلیاژهای آلومینیوم بهترین شکل پین، استوانه‌های رزوه‌دار و مخروطی است [۲۴].

### ۳-۳-۱- آزمایش کشش

به منظور بررسی خواص کششی اتصال، قطعات جوشکاری شده، مطابق استاندارد ASTM E8-02 جهت آزمایش کشش تهیه شدند. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش ۱۵ تن و در دمای اتاق و شرایط شبه استاتیک، مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۸ نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه و همچنین نمونه‌های بعد شکست نشان داده شده است.



شکل (۸): نمونه‌های آزمایش کشش پس از آزمایش.

### ۳-۳-۲- آزمایش سختی سنجی

سختی نمونه‌ها در نقاط واقع در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی<sup>۱</sup> پیشرو توسط سختی سنج به روش راکول B (ابزار سختی سنج ساچمه فولادی با قطر ۱/۱۶ اینچ) و با اعمال نیروی ۱۰۰ کیلوگرم در زمان ۱۰ ثانیه مطابق استاندارد ASTM-E18 اندازه‌گیری شد (شکل ۹).



شکل (۹): نمونه‌های آزمایش سختی.

جدول شماره ۵ و ۶ نتایج کامل آزمایش کشش و سختی نمونه‌های جوشکاری شده با به‌ترتیب پین مخروطی و رزوه‌دار را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۰ نمودار میله‌ای مقادیر هدف به ازای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

برای ایجاد اتصال با استحکام بیشتر تمام شانه‌ها با زاویه تقعر ۵° ساخته شدند [۲۶]. شکل ۶ ابزارهای ساخته شده را نشان می‌دهد. پس از ساخت، ابزارها با فرآیند عملیات حرارتی تا ۵۰ HRC سخت کاری شدند. جدول شماره ۴ خصوصیات ابزار مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل (۶): ابزار دوطرفه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

### جدول (۴): مشخصات ابزار.

ارتفاع پین (mm)	زاویه تقعر شانه (degree)	قطر شانه (mm)	قطر پین (mm)	نوع پین
۴/۷	۴	۱۸-۱۶-۱۴	۴	استوانه رزوه دار
		۱۸-۱۶-۱۴	۵	
		۱۸-۱۶-۱۴	۶	
		۱۸-۱۶-۱۴	۴	مخروطی ساده
		۱۸-۱۶-۱۴	۵	
		۱۸-۱۶-۱۴	۶	

### ۳-۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

قطعات جوش داده شده پس از عملیات سوهان‌زنی و پلیسه‌گیری توسط اره مجموعه‌ای برش داده شده و آماده آزمایش‌های نهایی شدند (شکل ۷).



شکل (۷): برش قطعات پس از جوشکاری.

<sup>۱</sup> Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

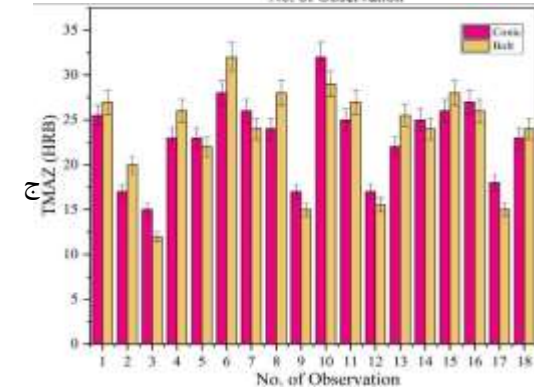
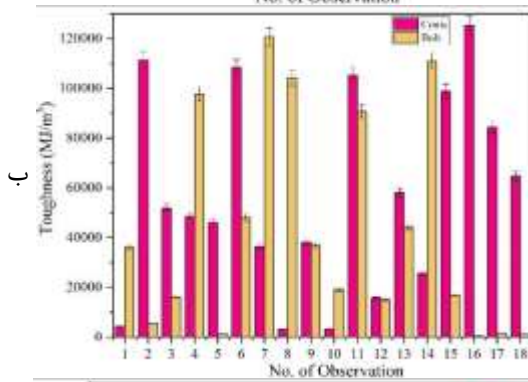
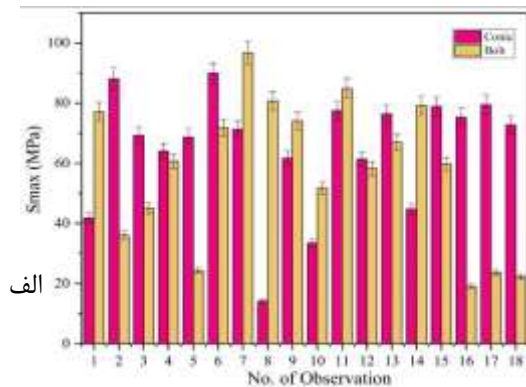


**جدول (۵):** نتایج آزمایش کشش و سختی نمونه‌های جوشکاری شده با پین مخروطی.

کد	استحکام نهایی (MPa)	چقرمگی (MJ/m <sup>3</sup> )	سختی (HBR)
c1	۴۱/۸۰	۴۳۳۲/۳	۲۵/۵
c2	۸۸/۱۰	۱۱۱۳۵۵/۰	۱۷
c3	۶۹/۳۰	۵۱۹۱۴/۰	۱۵
c4	۶۴/۱۰	۴۸۴۹۸/۲	۲۳
c5	۶۸/۷۰	۴۶۰۰۰/۹	۲۳
c6	۸۹/۹۰	۱۰۸۳۹۳/۰	۲۸
c7	۷۱/۳۰	۳۶۵۰۹/۹	۲۶
c8	۱۴/۱۰	۳۱۲۹/۱	۲۴
c9	۶۱/۷۰	۳۸۲۴۱/۸	۱۷
c10	۳۳/۴۰	۵۰۴۸۸۸	۳۲
c11	۷۷/۵۰	۱۰۵۲۲۲/۰	۲۵
c12	۶۱/۴۰	۱۵۶۵۵/۹	۱۷
c13	۷۶/۴۰	۵۸۰۶۵/۳	۲۲
c14	۴۴/۸۰	۲۵۶۳۲/۴	۲۵
c15	۷۸/۹۰	۹۸۹۲۳/۸	۲۶
c16	۷۵/۴۰	۱۲۵۳۷۵/۰	۲۷
c17	۷۹/۵۰	۸۴۴۷۸/۸	۱۸
c18	۷۲/۸۰	۶۴۶۵۵/۴	۲۳

**ادامه جدول (۶):** نتایج آزمایش کشش و سختی نمونه‌های جوشکاری شده با پین رزوه‌دار.

کد	استحکام نهایی (MPa)	چقرمگی (MJ/m <sup>3</sup> )	سختی (HBR)
b11	۸۴/۹۰	۹۰۸۲۸/۵۰	۲۷
b12	۵۸/۳۰	۱۴۹۱۰/۳۰	۱۵/۵
b13	۶۶/۹۰	۴۴۳۶۴/۸۰	۲۵/۵
b14	۷۹/۲۰	۱۱۰۹۷۴/۰۰	۲۴
b15	۵۹/۷۰	۱۶۸۲۰/۵۰	۲۸
b16	۱۹/۱۰	۴۵۱/۰۰	۲۶
b17	۲۳/۶۰	۱۵۶۱/۴۰	۱۵
b18	۲۲/۲۰	۱۰۸۰/۶۰	۲۴



**شکل (۱۰):** نمودار میله‌ای مقادیر هدف به ازای آزمایش‌ها: الف) استحکام بیشینه ب) چقرمگی، و ج) سختی در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی

**جدول (۶):** نتایج آزمایش کشش و سختی نمونه‌های جوشکاری شده با پین رزوه‌دار.

کد	استحکام نهایی (MPa)	چقرمگی (MJ/m <sup>3</sup> )	سختی (HBR)
b1	۷۷/۱۰	۳۶۱۸۴/۶۰	۲۷
b2	۳۶/۰۰	۵۶۱۹/۷۰	۲۰
b3	۴۵/۱۰	۱۶۱۲۱/۴۰	۱۲
b4	۶۰/۷۰	۹۷۶۹۱/۶۰	۲۶
b5	۲۴/۳۰	۱۲۶۸/۱۰	۲۲
b6	۷۱/۸۰	۴۸۱۳۹/۲۰	۳۲
b7	۹۶/۷۰	۱۲۰۶۳۶/۰۰	۲۴
b8	۸۰/۷۰	۱۰۴۲۲۴/۰۰	۲۸
b9	۷۴/۱۰	۳۶۹۳۸/۴۰	۱۵
b10	۵۱/۸۰	۱۹۱۵۱/۵۰	۲۹

### ۵- بحث و نتایج

#### ۵-۱- مدل‌های سطح پاسخ

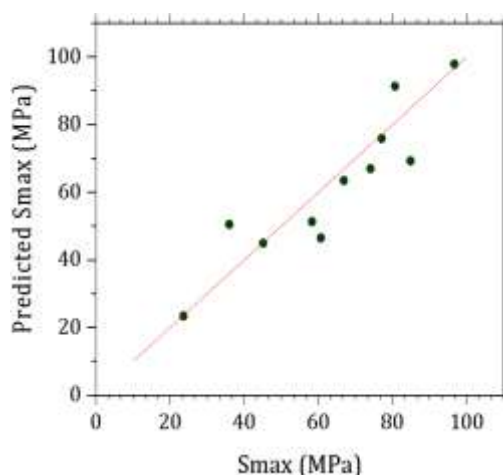
پس از انجام آزمایش‌ها، مدل‌های سطح پاسخ توابع هدف به صورت چند جمله‌ای درجه ۲ به دست آمدند.

#### ۵-۱-۱- پین استوانه‌های رزوه دار

##### تابع استحکام بیشینه

$$S_{max} = 697.3958 - 84.83202PD - 31.66152SHD + 0.9626526F + 0.1471003S - 165.795ITA + 7.327154PD^2 + 0.9344101SHD^2 - 0.009015027F^2 - 0.0001172061S^2 + 32.2839TA^2 \quad (۷)$$

شکل ۱۱ سطح پاسخ استحکام بیشینه نسبت به قطر پین، قطر شانه، زاویه ابزار و پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای استحکام بیشینه در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



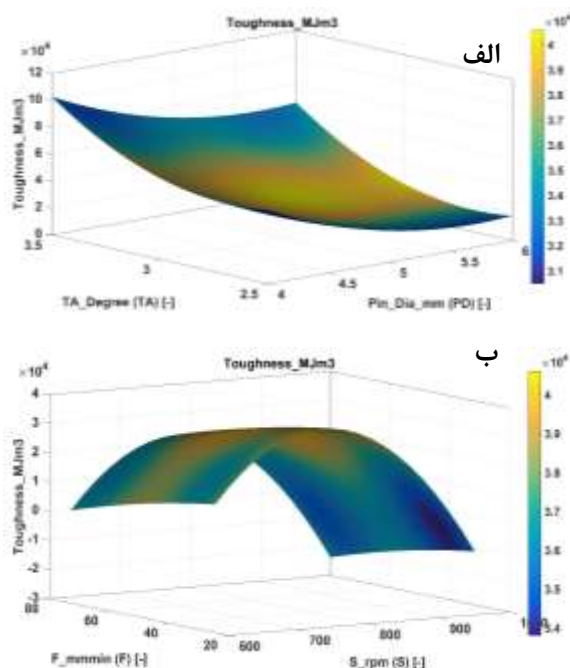
شکل (۱۲): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر

تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای استحکام بیشینه.

##### تابع چقرمگی

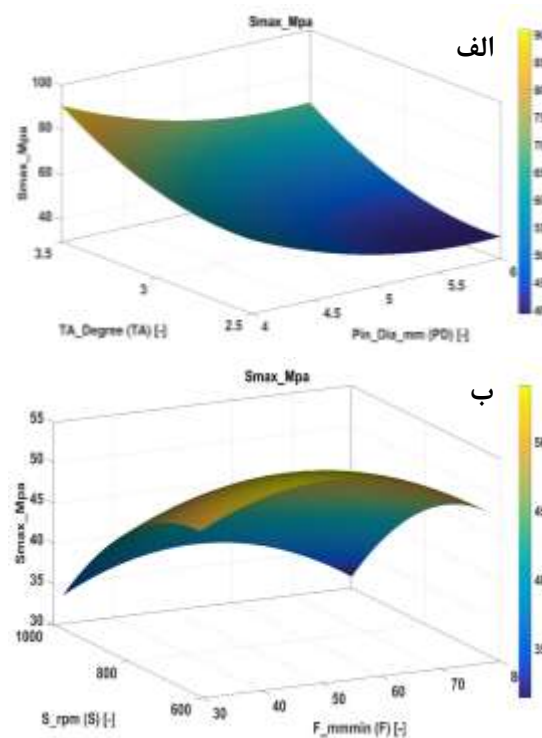
$$Toughness = 1546611.2887 - 150949.02191PD - 149203.03727SHD - 8.198919338F + 1538.565087S - 391195.71948TA + 13277.391386PD^2 + 4740.0956929SHD^2 - 2.172820422F^2 - 0.98285200217S^2 + 73180.131086TA^2 \quad (۸)$$

شکل ۱۳ رویه سطح پاسخ چقرمگی نسبت به قطر پین، قطر شانه، زاویه ابزار و پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای چقرمگی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



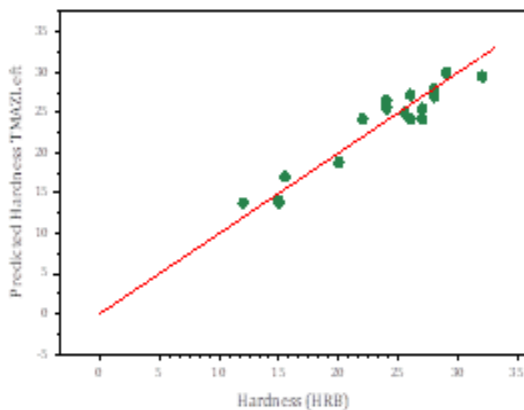
شکل (۱۳): سطح پاسخ چقرمگی نسبت به قطر پین

و قطر شانه (ب) زاویه ابزار و پیشروی.



شکل (۱۱): سطح پاسخ استحکام بیشینه نسبت به الف)

قطر پین و قطر شانه (ب) زاویه ابزار و پیشروی.



شکل (۱۶): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای سختی.

### ۱-۲- بین مخروطی

### تابع استحکام بیشینه

$$S_{max} = 1106.1843 - 21.457397PD - 99.695131SHD - 0.43079798F - 0.45383266S - 6.7250936TA + 2.965824PD^2 + 3.1120787SHD^2 + 0.0042578429F^2 + 0.00029349005S^2 - 2.3400749TA^2 \quad (10)$$

شکل ۱۷ سطح پاسخ استحکام بیشینه نسبت به قطر پین، قطر شانه، زاویه ابزار و پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای استحکام بیشینه در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

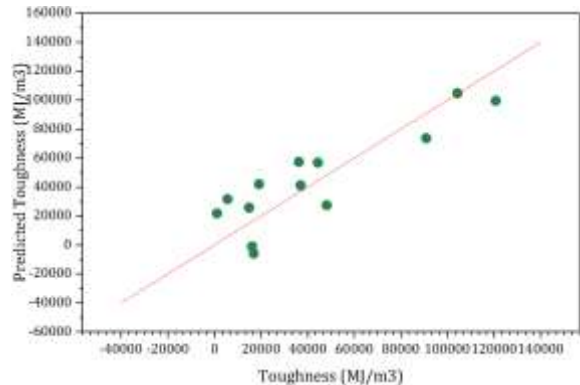
### تابع چقرمگی

$$Toughness = 1700258.4017 + 62476.686275PD - 187783.31977SHD - 505.66237767F - 174.22017741S - 183273.53758TA - 4798.3245098PD^2 + 6006.898366SHD^2 + 7.226567896F^2 + 0.12946283004S^2 + 24603.788889TA^2 \quad (11)$$

شکل ۱۹ رویه سطح پاسخ چقرمگی نسبت به قطر پین، قطر شانه، زاویه ابزار و پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای چقرمگی در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

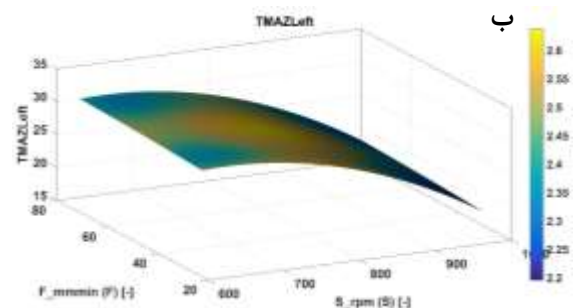
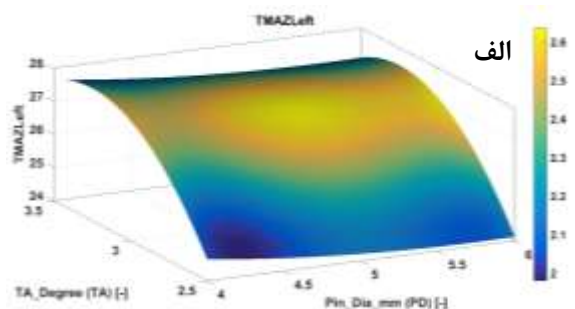
### تابع سختی در منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی

$$TMAZ = -206.6276 - 2.009363PD + 15.53464SHD + 0.03882484F + 0.1376191S + 38.58427TA + 0.1750936PD^2 - 0.4541199SHD^2 - 0.0001447585F^2 - 0.0001039519S^2 - 5.932584TA^2 \quad (9)$$

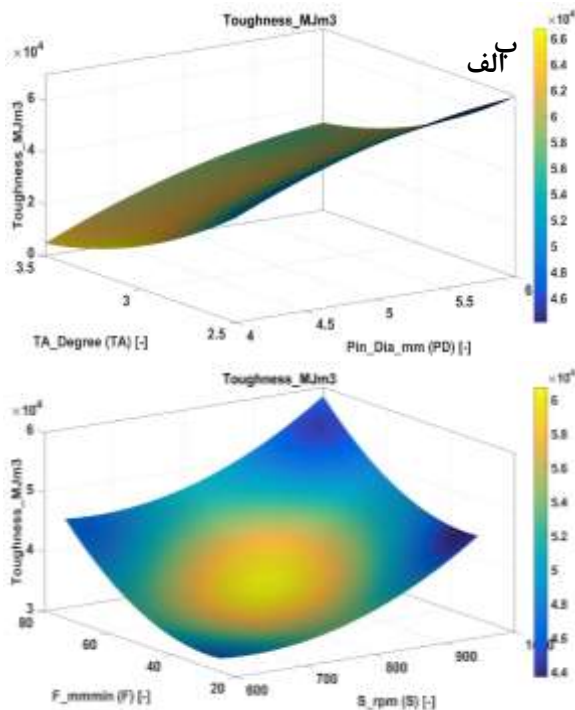


شکل (۱۴): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای چقرمگی.

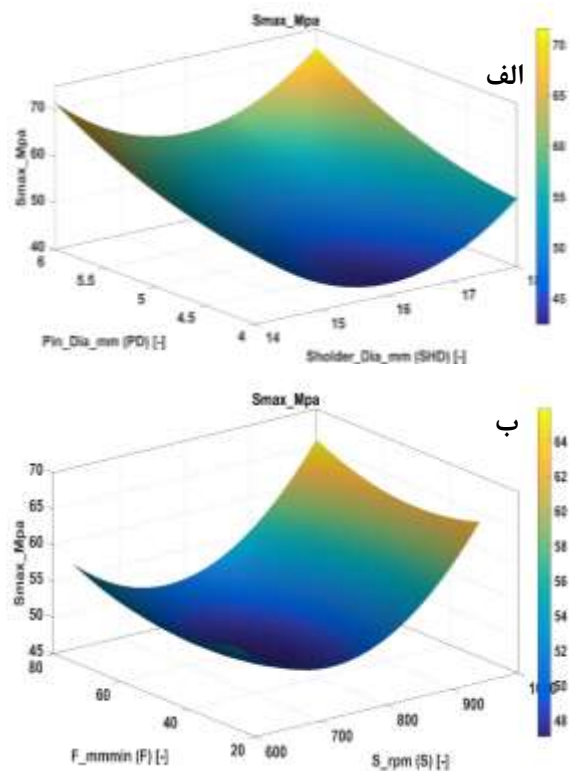
شکل ۱۵ سطح پاسخ سختی منطقه متاثر از کار و حرارت نسبت به قطر پین، قطر شانه، زاویه ابزار و پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای سختی در منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



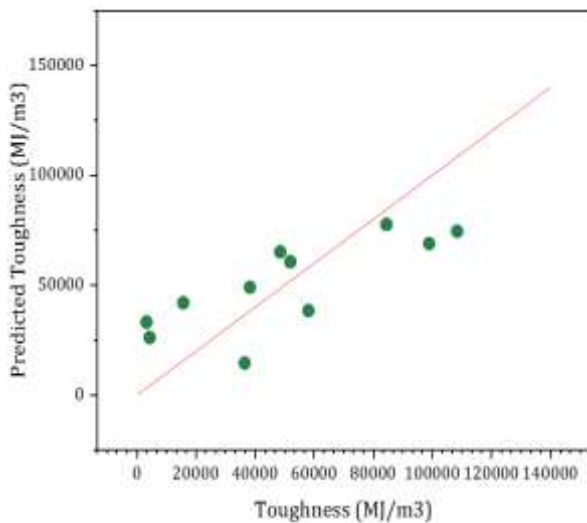
شکل (۱۵): سطح پاسخ سختی نسبت به الف) قطر پین و ب) قطر شانه و زاویه ابزار و پیشروی.



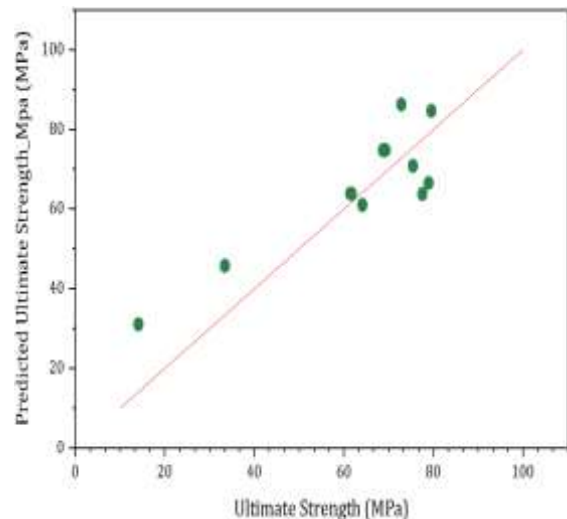
شکل (۱۹): سطح پاسخ چقرمگی نسبت به الف) قطر پین و ب) زاویه شانه ابزار و پیشروی.



شکل (۱۷): سطح پاسخ استحکام بیشینه نسبت به الف) قطر پین و ب) زاویه شانه ابزار و پیشروی.



شکل (۲۰): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای چقرمگی.

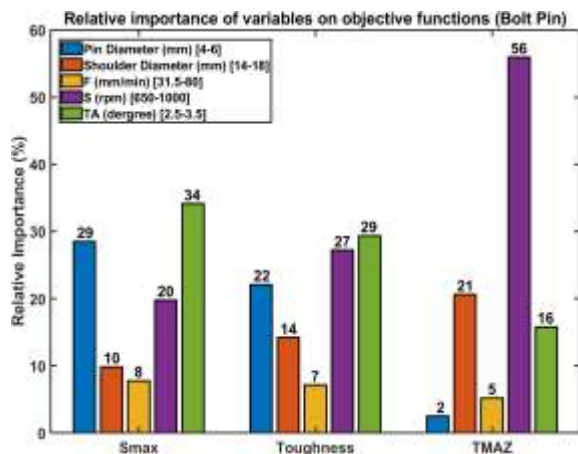


شکل (۱۸): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای استحکام بیشینه.

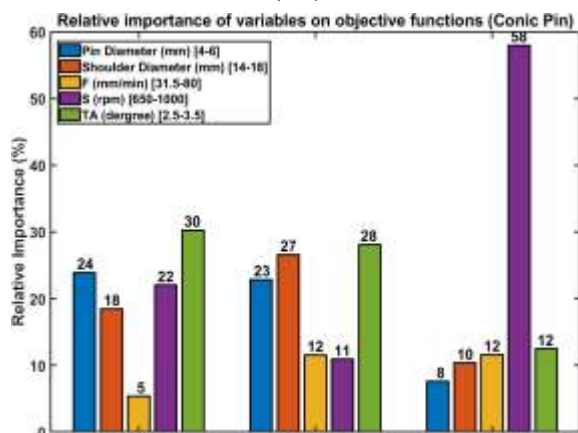
شکل ۲۱ سطح پاسخ سختی منطقه متاثر از کار و حرارت نسبت به قطر پین، زاویه شانه، ابزار و پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده توسط سطح پاسخ برای سختی در منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

تابع سختی در منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی

$$\begin{aligned}
 TMAZ = & -36.3967 + 11.6119PD + 4.78184SHD \\
 & - 0.290724F + 0.0646493S - 14.882TA \\
 & - 1.14654PD^2 - 0.135768SHD^2 \\
 & + 0.00273811F^2 - 5.60786e - 05S^2 \\
 & + 2.82772TA^2
 \end{aligned}
 \tag{۱۲}$$



(الف)



(ب)

شکل (۲۳): تغییرات توابع هدف به ازای متغیرهای

نرمال‌سازی شده برای ابزار مخروطی:

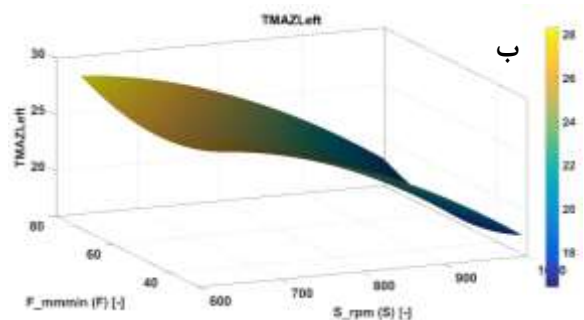
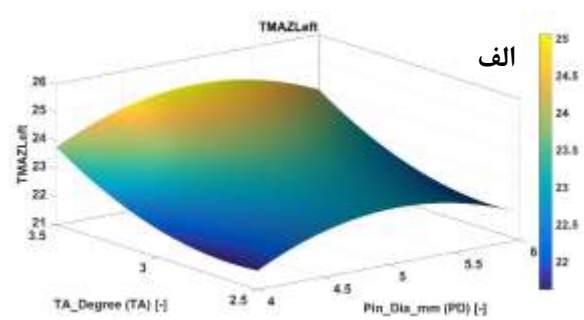
(الف) استحکام بیشینه، (ب) چقرمگی و

(ج) سختی منطقه متأثر از کار و حرارت.

همانگونه که در شکل ۲۳ مشخص می‌باشد، اثر متغیرها در هر دو بین روند تقریباً یکسانی دارد، سرعت دورانی بیشترین اثر را روی تابع سختی داشته است، در حالی که موثرترین متغیر روی استحکام بیشینه و چقرمگی زاویه شیب ابزار می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نرخ تغذیه در مقایسه با متغیرهای دیگر کمترین تاثیر را از خودش نشان می‌دهد.

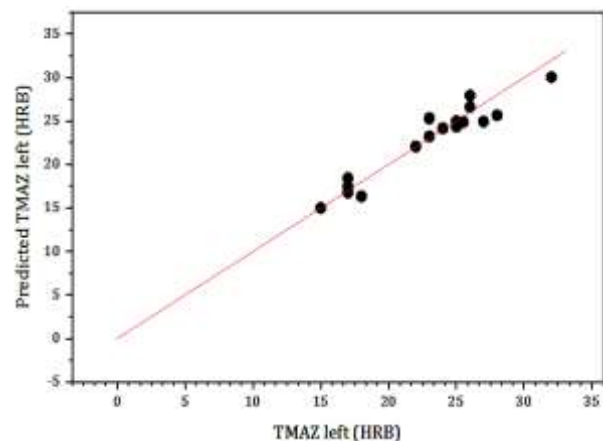
### ۵-۳- بررسی نقاط بهینه به صورت آزمایشگاهی

پس از انجام آزمایش‌ها و دستیابی به نتایج آن‌ها، فرآیند بهینه‌سازی بر اساس روش چند هدفه ازدحام ذره انجام گرفت. متغیرهای برای الگوریتم مذکور در جدول ۷ آورده شده است.



شکل (۲۱): سطح پاسخ سختی نسبت به قطر پین و

قطر شانه (ب) زاویه ابزار و پیشروی.



شکل (۲۲): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تخمین

زده شده توسط سطح پاسخ برای سختی.

### ۵-۲- بررسی اثر متغیرها

برای بررسی اثر متغیرها روی مدل به دست آمده، اهمیت نسبی متغیرهای در توانایی تغییر توابع هدف محاسبه گردید است (شکل ۲۳):

$$RI_{Var} = \frac{Obj_{max}^{var} - Obj_{min}^{var}}{Obj_{max}^{overall} - Obj_{min}^{overall}} \quad (13)$$

که  $Obj_{max}^{var}$  و  $Obj_{min}^{var}$  به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف به ازای متغیر مورد محاسبه در بازه تعریف شده، و  $Obj_{max}^{overall}$  و  $Obj_{min}^{overall}$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار توابع هدف در کل فضای طراحی و به در نظر گرفتن تمام متغیرها می‌باشند.

نزدیکترین نقطه به مبدا می‌تواند به‌عنوان بهینه انتخاب شود، در این پژوهش اولویت بیشتری برای استحکام بیشینه و چقرمگی نسبت به سختی در نظر گرفته شده است، لذا برای هر نوع از ابزار نقطه نشان داده شده در شکل ۲۴ جهت بررسی آزمایشگاهی انتخاب شده و دو نمونه را با داده‌های بهینه شده جوشکاری کرده و توابع هدف با استفاده از آزمایش‌های کششی و سختی به‌دست آمده‌اند (شکل ۲۵). همچنین جدول ۸ نتایج آزمایش‌های کششی و سختی نمونه‌های فوق را نشان می‌دهد.



شکل (۲۵): جوشکاری نمونه‌های بهینه‌سازی شده.

جدول (۸): نتایج آزمایشگاهی مقادیر بهینه.

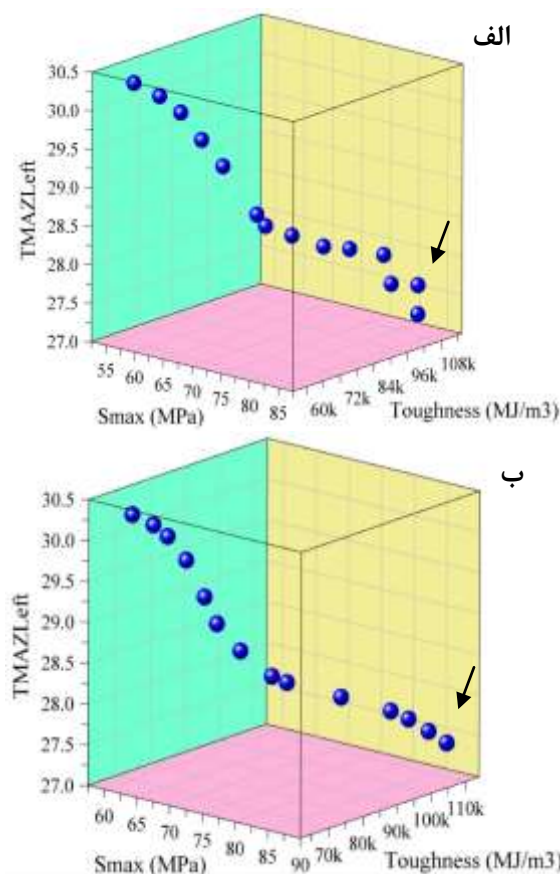
متغیر/هدف	بین مخروطی	بین رزوه دار
قطر بین (mm)	۶	۴
قطر شانه (mm)	۱۸	۱۴
سرعت پیشروی (mm/min)	۷۹/۹۴	۴۵/۵
سرعت دورانی (rpm)	۶۴۰/۱۱	۶۴۳/۹۶
زاویه انحراف ابزار (Degree)	۲/۶	۳/۴۹
استحکام بیشینه (پیش‌بینی شده) (MPa)	۸۲/۲۷	۸۴/۴۱
استحکام بیشینه (آزمایشگاهی) (MPa)	۸۰/۶	۸۵/۸
دقت پیش‌بینی استحکام بیشینه (%)	۹۷/۹۲	۹۸/۳۸
چقرمگی (پیش‌بینی شده) (MJ/m <sup>3</sup> )	۱۰۲۸۸۹	۱۰۸۲۵۴
چقرمگی (آزمایشگاهی) (MJ/m <sup>3</sup> )	۱۰۱۹۹۴	۱۱۵۵۱۷
دقت پیش‌بینی چقرمگی (%)	۹۹/۱۲	۹۳/۷۱
سختی (پیش‌بینی شده) (HRB)	۲۷/۸۱	۲۶/۸۲
سختی (آزمایشگاهی) (HRB)	۲۶	۲۶
دقت پیش‌بینی سختی (%)	۹۳/۰۳	۹۶/۸۴

جدول (۷): متغیرهای الگوریتم بهینه‌سازی

چندهدفه ازدحام ذره

متغیر	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰۰
ظرفیت مخزن خارجی	۳۵
بیشترین تکرار مجاز	۳۰۰
وزن اینرسی	۱
فاکتور یادگیری فردی	۲
فاکتور یادگیری جمعیت	۲
سرعت اولیه ذرات	۰
نرخ تورم	۰/۱
تعداد شبکه در هر بعد	۱۰

شکل ۲۴ جبهه پارتو به‌دست آمده را برای هر دو نوع ابزار مخروطی و رزوه‌دار نشان می‌دهد.



شکل (۲۴): جبهه پارتو به‌دست آمده و نقطه بهینه انتخابی

برای ابزارهای الف) مخروطی و ب) رزوه‌دار

هر کدام از نقاط شکل می‌توانند به‌عنوان یک نقطه بهینه در نظر گرفته شوند، این انتخاب بستگی به اولویت تابع هدف دارد، در صورت یکسان در نظر گرفتن اولویت‌ها

۵- ایجاد رزوه در ابزارهای با پین استوان‌های باعث بهبود جریان مواد اطراف پین می‌شود و اختلاط مواد در محل اتصال مطلوب‌تر انجام می‌شود که نتیجه آن بهبود خواص مکانیکی خواهد بود.

۶- سرعت دورانی بیشترین اثر را روی تابع سختی داشته است،

۷- موثرترین متغیر روی استحکام بیشینه و چقرمگی زاویه شیب ابزار می‌باشد.

۸- نرخ تغذیه در مقایسه با متغیرهای دیگر کمترین تاثیر را از خودش نشان می‌دهد.

۹- ترکیب روش سطح پاسخ و الگوریتم ازدحام ذره چند هدفه منجر به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند با دقت بسیار خوب و هزینه آزمایشگاهی کم شد.

#### ۷- تشکر و قدردانی

این تحقیق برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان (بهینه‌سازی چندهدفه فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی) می‌باشد که با حمایت مالی دانشگاه آیت‌ا... العظمی بروجردی (ره) و با کد رهگیری (۲۱۲۷۴۳-۱۵۶۶۴) انجام پذیرفته است.

#### ۸- مراجع

- [1] Mishra, R. S., Mahoney, M. W., "Friction Stir Welding and Processing", ASM International, 2007.
- [2] Guerra, M., Schmidt, C., McClure, J., Murr, L., Nunes, A., "Flow patterns during friction stir welding", MATER CHARACTER, Vol. 49, No. 2, pp. 95-101, 2002.
- [3] Sahin, M., "Joining with Friction Welding of High Speed Steel And Medium - Carbon Steel", J MATER PROCESS TECH, Vol. 168, pp. 202-210, 2005.
- [4] Sahin, M., Akata, H.E., Gulmez, T., "Characterization of Mechanical Properties in AISI 1040 Parts Welded by Friction Welding", MATER CHARACTER, Vol. 58, pp. 1033-1038, 2007.
- [5] Moradi, M. M., Jamshidi, Aval H., Jamaati, R., "Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys", Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 394-402, 2016 (in Persian).
- [6] Stephen Leon, J., Jayakumar, V., "Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding", International Journal of Students' Research in Technology & Management, Vol. 2, pp. 140-144, 2014.

همانگونه که در جدول ۸ ملاحظه می‌شود دقت مدل برای استحکام نهایی در پین رزوه دار ۹۸/۳۹٪ و برای پین مخروطی ۹۸٪ می‌باشد. دقت پیش‌بینی چقرمگی برای پین رزوه دار ۹۳/۳۲ و برای پین مخروطی ۹۳/۱۳٪ است. همچنین دقت مدل در تخمین سختی در پین رزوه دار ۹۶/۸۵ درصد و در پین مخروطی ۹۳/۰۴٪ می‌باشد. این مقادیر نشان از قابل اعتماد بودن مدل ارائه شده دارد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهینه‌سازی چندهدفه توابع بیشترین استحکام، چقرمگی و سختی در منطقه در منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم A-H12 1050 به روش‌های سطح پاسخ و روش بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذره با موفقیت انجام شده است. همچنین تأثیر متغیرهای قطر پین و شانه، سرعت دورانی و پیشروی و زاویه انحراف بر اهداف فوق بررسی و نتایج زیر حاصل شد.

۱- مدل ایجاد شده قابلیت پیش‌بینی حداقل ۹۸ درصدی استحکام، ۹۳٪ چقرمگی و ۹۳٪ سختی با شرایط تحقیق حاضر را دارا می‌باشد.

۲- براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مکانیکی مشخص گردید هر چقدر سرعت دورانی کمتر و سرعت پیشروی بیشتر باشد حرارت تولیدی فرآیند کمتر و در نتیجه استحکام و سختی بیشتر خواهد شد که البته متغیرهایی مانند عمق نفوذ ابزار به شدت می‌تواند در تغییر نتایج اثرگذار باشد.

۳- افزایش یا کاهش حرارت فرآیند به واسطه تغییر سرعت دورانی و یا پیشروی محدوده بهینه‌ای دارد که نباید از آن مقدار بیشتر یا کمتر شود. افزایش حرارت یا کاهش آن تا محدوده مشخصی سبب افزایش یا کاهش استحکام می‌گردد و بیشتر از آن محدوده تأثیر معکوس گذاشته یا بدون اثر خواهد بود.

۴- نتایج نشان داد که پین‌های رزوه دار نسبت به پین‌های مخروطی نتایج نزدیک‌تری به مقادیر مدل‌سازی شده دارند بنابراین دقت مدل آن‌ها نیز بیشتر می‌باشد.

- [17] Kahhal P., Ahmadi, S.Y., Deilami, H., "Investigation of Drawing Bead Parameters and Multi Objective Optimization in Deep Drawing Process", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 21-31, 2017 (in Persian).
- [18] Kahhal, P., Ahmadi Brooghani, S.Y., Azodi, H.D., "Multi-objective optimization of sheet metal forming die using FEA coupled with RSM", *J MECH SCI TECHNOL*, Vol. 27, pp. 3835-3842, 2013.
- [19] Najafi, A. A., Mushakhian, S., "Optimization of investment portfolio using multi-objective particle swarm algorithm for probabilistic multi-period model of mean semi-variance" *Financial engineering and portfolio management*, Vol. 6, No. 23, pp. 133-147, 2015 (in Persian).
- [20] Shi, Y., Eberhart, R., "Parameter selection in particle Swarm Optimization", *Evolutionary Programming*, Vol. 7, pp. 611-616, 1998.
- [21] Mohamad Reza Pour, O., Haghigatjou, P., Zeynali, M.J., "Compression of Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm models for Optimizing Coefficients of Sediment Rating Curve in estimation of Suspended Sediment in Sistan River; Case Study Kohak station", *Journal of Irrigation & Water Engineering*, Vol. 6, No. 22, pp. 76-89, 2015 (in Persian).
- [22] Coello, A. C., Pulido, G. T., Lechuga, M. S., "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", *IEEE T EVOLUT COMPUT*, Vol. 8, No. 3, pp. 256-279, 2004.
- [23] Sajed, H., Bisadi, M., "Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys", *Weld World*, Vol. 60, pp. 33-40, 2016.
- [24] Akinlabi, E. T., "Characterisation of Dissimilar Friction Stir Welds between 5754 Aluminum Alloy and C11000 Copper", PhD Thesis, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, 2010.
- [25] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/1050-H12-Aluminum>.
- [26] Zhang, Z. H., Li, W. Y., Feng, Y., Li, J. L., Chao, Y. J., "Improving mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 joints by using a composite backplate", *MATER SCI ENG*, Vol. 598, pp. 312-318, 2014.
- [7] Yousif, Y.K., Daws, K.M., Kazem, B.I., "Prediction of friction stir welding characteristic using neural network", *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 151-155, 2008.
- [8] Shanmuga Sundaram, N., Murugan, N., "Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminum alloys", *MATER DESIGN*, Vol. 31, No. 9, pp. 4184-4193, 2010.
- [9] Ghaffarpour, M., Kolahgar, S., Mollaei Dariani, B., Dehghani, K., "Evaluation of dissimilar welds of 5083-H12 and 6061-T6 produced by friction stir welding", *METALL MATER TRANS A*, Vol. 44, No. 8, pp. 3697-3707, 2013.
- [10] Sakhaeie, A., Kazemi Nasrabadi, M., Jalali Aghchai, A., Barimani Varandi, A., "Optimization of friction stir spot welding process parameters to achieve maximum failure load", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-27, 2018 (in Persian).
- [11] Fallahi Arezoudar, A., Hosseini, A., "Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar AA5052 and AA6061-T6 joint for achieving optimum microstructure and mechanical properties", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 20-30, 2017 (in Persian).
- [12] Yuvaraj, K. P., Ashoka Varthanan, P., Haribabu, L., "Optimization of FSW tool parameters for joining dissimilar AA7075-T651 and AA6061 aluminium alloys using Taguchi Technique", in *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [13] Marimuthu, R. Pandiyarajan, S., "Parametric optimization and tensile behaviour analysis of AA6061 - ZrO<sub>2</sub> - C FSW samples", in *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [14] Jangra, K. K., Sharma N., Khanna, R., Matta, D., "An experimental investigation and optimization of friction stir welding process for AA6082 T6 (cryogenic treated and untreated) using an integrated approach of Taguchi, grey relational analysis and entropy method", *Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 230, No. 2, pp. 454-469, 2016.
- [15] Shubham, V., Deepika, G., Joy, P. M., Usha, B., "Multi-objective optimum design for FS welded 7039 aluminium alloy considering weld quality issues", *Materials Today Communications*, p. in Press, 2021.
- [16] Khalili, Kh., Eftekhari Shahri, S. E., Kahhal P., Khalili M S., "Wrinkling study in tube hydroforming process", *KEY ENG MAT*, Vol. 473, pp. 151-158, 2011.



