

# Investigation of the effect of turbulent friction process parameters on the surface mechanical properties of AZ31B/CNT nanocomposite using Sobel sensitivity analysis

Ehsan Mansouri <sup>a\*</sup>, Hasan Hooshangi <sup>a</sup>, Milad Salehi <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Industrial Engineering, Arak University, Arak, Iran

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Mansouri E, Hooshangi H, Salehi M. Investigation of the effect of turbulent friction process parameters on the surface mechanical properties of AZ31B/CNT nanocomposite using Sobel sensitivity analysis. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022;1(2):108-122.

 <https://10.52547/masm.2.1.108>.

## KEYWORDS

Friction stir,  
Process,  
Sobel sensitivity analysis,  
Nano composite

## ABSTRACT

The perturbation friction process is a solid state method used to modify the surface, improve mechanical properties, and produce composites. In this research, the effect of effective parameters on the surface compositing of AZ31B / CNT alloy with carbon nanotubes has been investigated by the turbulent friction process method and by the Sobel sensitivity analysis method. Input parameters in this study were advance speed, rotation speed, weight percentage of carbon nanotubes and number of welding passes. Also considered outputs included hardness and weight loss. In order to analyze the results, Sobel sensitivity analysis has been used to investigate the qualitative and quantitative effect of inputs on outputs. The results of this study showed that the weight percentage of carbon nanotubes, rotation speed, number of welding passes and advancing speed affect hardness, respectively. Also, the weight percentage of carbon nanotubes, the number of welding passes, the rotation speed and the advancing speed affect the weight loss.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

The attractiveness of using magnesium alloys has increased due to their strength-to-weight ratio in various industries such as automotive. However, due to the high reactivity of magnesium metal, it is not possible to form it by casting and many problems will be created. Based on this, it is preferable to use the forming method to produce parts with magnesium metal instead of the casting method. One of the newest processes of magnesium metal strength process is the use of friction Disturbing process, which is very similar to friction Disturbing welding. So far, a lot of research has been done in this field, which is reviewed below. The difference between this research and other researches is the study of different parameters and the interaction of each of them with the stiffness and weight reduction of the weld area by Sobel sensitivity analysis method.

Wang et al. Have studied magnesium (Mg) alloys that have high strength and hardness, excellent vibration absorption, electromagnetic shielding, good machinability and recyclability. In addition to introducing the principle and main benefits of perturbation friction processing, they have studied perturbation friction processing studies in cast structure modification, superplastic deformation behavior, preparation of magnesium alloys and magnesium-based surface composites, and additive production. perturbation friction processing not only refines, homogeneously and compacts the microstructure, but also eliminates the defects of the casting microstructure. It also eliminates brittle and lattice-like phases, and magnesium alloys, granular magnesium, granular and granular alloys. In fact, turbulent friction processing significantly improves the comprehensive mechanical properties of alloys and occurs at low temperatures or high strain rates. In addition, perturbation friction processing can produce magnesium-based surface composites reinforced with particles and fibers. perturbation friction processing as a method of increasing the production of light metals makes possible the production of additives of magnesium alloys [2].

Nasiri et al. In perturbation friction processing (FSP) of magnesium alloys as-cast mg-7al, mg-4al-3ca (a4x3) and mg-2al-5ca (a2x5) found that turbulent friction processing resulted in significant grain refinement and increased mechanical properties. It becomes. Due to the presence of thermally stable materials between Al-Ca metals, calcium-containing alloys showed more

\* Corresponding author. Tel.: 086-32625904; Fax: 086-32625005

E-mail address: [e-mansouri@araku.ac.ir](mailto:e-mansouri@araku.ac.ir)

DOI: <https://10.52547/masm.2.1.108>.

Received: February 13, 2022; Received in revised form: May 06, 2022; Accepted: May 17, 2022

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



intense grain refinement than Mg-7Al alloy with Mg17Al12 unstable phase. The processed AX43 alloy with a grain size of 1.7  $\mu\text{m}$  showed the best tensile properties [8].

Leo et al. Concluded that the combination of rare earth alloys (RE) and perturbation friction processing was shown to improve the corrosion resistance of Mg-9Al alloys. The microstructure and corrosion behavior of modified Mg-9Al-xRE alloys have been recorded. Electrochemical measurements showed that the corrosion resistance of Mg-9Al-xRE alloys was weakened by casting in 5.3 wt% NaCl solution with the addition of rare earth elements. It has been shown that the formation of large amounts of RE Al-like coarse band deposits is responsible for the rapid dissolution of the anodic magnesium matrix. However, the corrosion resistance of the Mg-9Al-xRE perturbation friction processing alloys was improved by the addition of a rare earth element and further improved by the addition of a rare earth alloy. This is mainly attributed to the change in corrosion behavior of magnesium alloys due to refined sediments and redistribution in the  $\alpha$ -Mg matrix. Refining of cathodic sediments increases the anode-cathode area ratio and delays the strong tendency of galvanic corrosion in magnesium alloys. In addition, the presence of large amounts of fine Al-RE sediments in the cumulative growth of the corrosion product layer during corrosion propagation is desirable and thus improves the stability and compaction of this protective layer [11].

## 2. Research method

### 2.1. Problem expression and innovation

The perturbation friction process is a method to improve the surface microstructure of the material, in which the material undergoes a severe plastic deformation in the process area, which causes dynamic recrystallization. The effective parameters in this method are advance speed, rotation speed, weight percentage of carbon nanotubes and number of welding passes. In this study, for the first time, the effect of each parameter was investigated using sensitivity analysis. Finally, the effect of each parameter on the hardness and weight loss of the weld area is investigated.

**Table 1. Low and high level of parameters**

Number of pulses	The amount of nanotubes	Fast forward	Rotational speed	Parameter
	(Weight percentage)	(mm / min)	(Rpm)	
D	A	B	C	
2	1	24	660	Low level
3	4	44	870	High level

### 2.2. Regression analysis

Regression analysis is a statistical process for estimating relationships between variables that can estimate natural changes in repetitive data such as actual change [19]. Regression analysis is used to identify the relationships between independent (variable) parameters and their effect on the dependent variable. Table 1 lists the parameters under study along with their lower and upper levels

Equations (1) and (2) are the regression equations obtained for the two output parameters, namely, hardness (1) and weight loss (2).

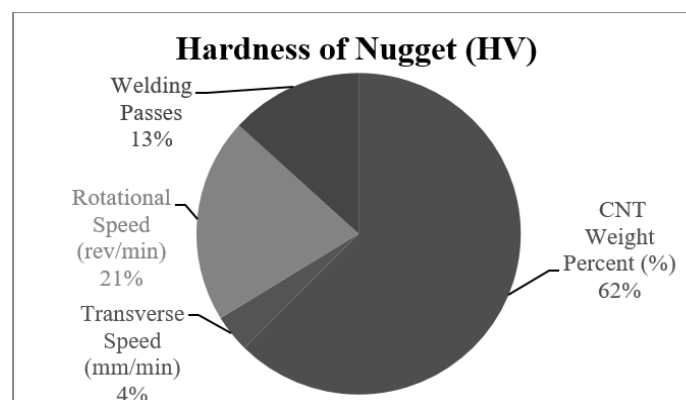
$$HV = 76.88 + 8.92A - 0.51B - 1.6C + 1.25D - 2.57AB - 2028AD - 6.20A^2 \quad (1)$$

$$mg = 11.67 + 0.32B - 0.32C + 0.78AC - 0.65AD - 0.44CD - 1.06A^2 \quad (2)$$

## 3. Review and analysis of results

It can be concluded that increasing the two parameters of nanotube quantity and number of passes increases the stiffness and increasing the two parameters of forward speed and rotation speed reduces stiffness. It can also be concluded that they have the greatest effect on the hardness of the nanotube and the least effect on the advancement speed.

Figure 1 shows a quantitative study of the effect of the parameters on the hardness, which are the results of the Sobel sensitivity analysis. Figure 1 compares the effect of different factors on hardness with Sobel sensitivity analysis method. According to Figure 1, it is concluded that the amount of nanotubes with 62%, rotational speed with 21%, number of passes with 13% and advance speed with 4%, respectively, had the greatest effect on hardness.



**Figure 1. Quantitative comparison of the impact of different factors on hardness**

It is concluded that the speed of advancement and the number of welding passes have a direct and positive effect on weight loss, and vice versa, with increasing speed of advancement, weight loss is reduced. Figure 2 provides a quantitative study of the effect of input parameters on weight loss.

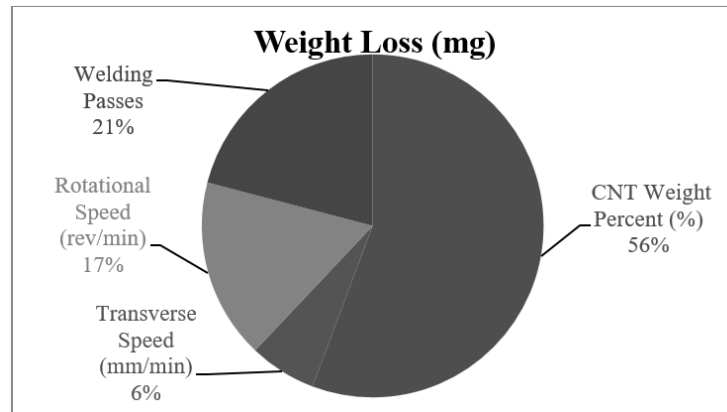


Figure 2. Quantitative comparison of the effect of different factors on weight loss

Figure 10 uses a quantitative sensitivity analysis method to quantitatively compare the effect of input factors on weight loss. According to Figure 10, the weight percentage of carbon nanotubes has the greatest effect with 56%, followed by the number of welding passes with 21% has the greatest effect on weight loss. Also, rotation speed and forward speed with 17% and 6%, respectively, were effective in reducing weight.

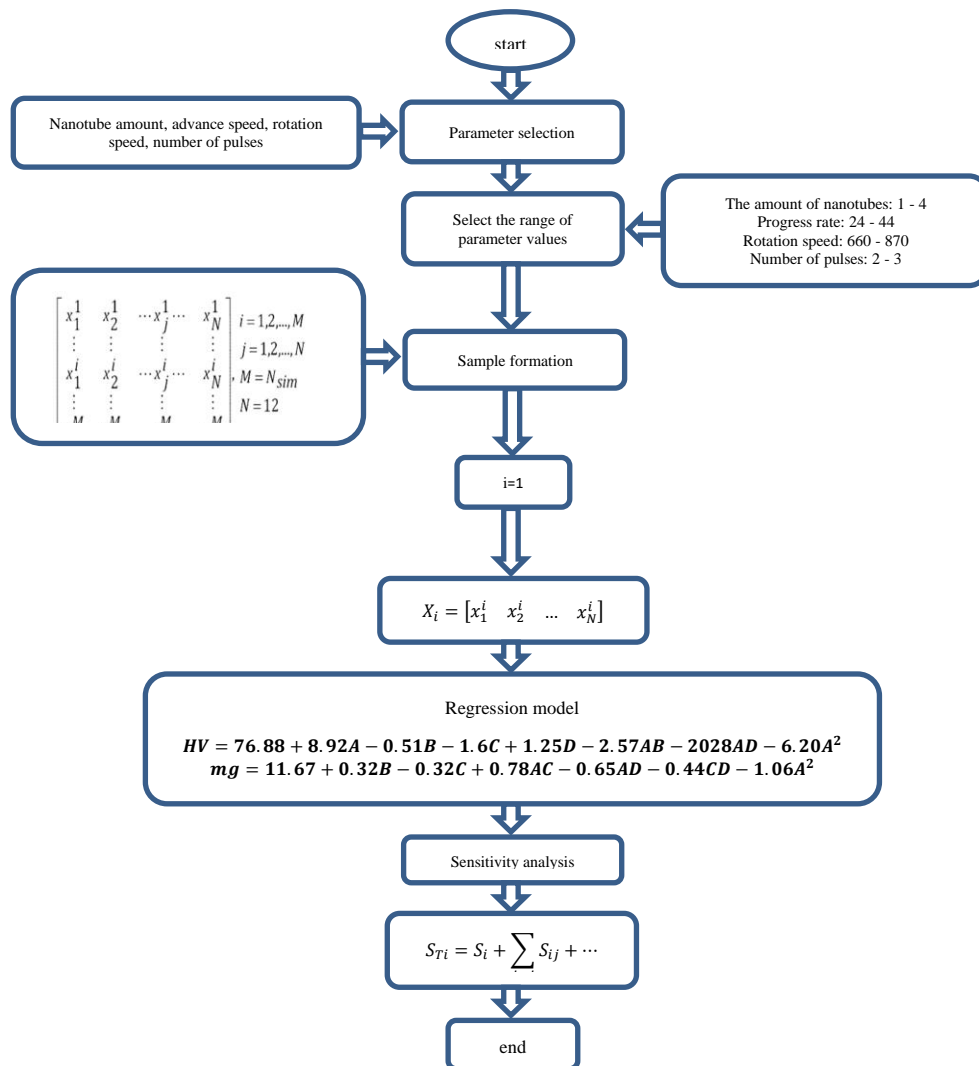


Figure 3. Complete sensitivity analysis algorithm

#### **4. Conclusion**

Sensitivity analysis method in recent years has various applications in quantitative and qualitative analysis of the effect of input parameters on outputs. In this study, for the first time, Sobel sensitivity analysis has been used to investigate the effect of turbulent friction process input parameters on test outputs. The parameters studied in this study were the weight percentage of carbon nanotubes, the number of welding passes, the rotation speed and the advancing speed. In addition, the outputs studied were sample hardness and weight loss. According to the data analysis using Sobel sensitivity analysis, it was found that the weight percentage of carbon nanotubes has the greatest effect on the hardness and weight loss of the sample. Also, after the percentage of carbon nanotubes, respectively, rotation speed, number of welding passes and forward speed have the greatest effect on hardness. Regarding the weight loss of the test sample after the weight percentage of carbon nanotubes, the number of welding passes, rotational speed and advancement speed have the greatest impact on the weight loss of the test sample, respectively. In the continuation of this research, other effective parameters can be examined, while other methods of sensitivity analysis can be used to examine and analyze the results.



## بررسی تاثیر پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی سطحی نانو کامپوزیت AZ31B/CNT با استفاده از آنالیز حساسیت سوبل

احسان منصوری<sup>الف\*</sup>، حسن هوشنگی<sup>ب</sup>، میلاد صالحی<sup>ب</sup>

<sup>الف</sup> استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [e-mansouri@araku.ac.ir](mailto:e-mansouri@araku.ac.ir)

<sup>ب</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه آموزشی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [hsn313315@gmail.com](mailto:hsn313315@gmail.com)

<sup>ب</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه آموزشی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [mld.salehi78@gmail.com](mailto:mld.salehi78@gmail.com)

چکیده	واژگان کلیدی
<p>فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک روش حالت جامد است که برای اصلاح سطح، بهبود خواص مکانیکی و تولید کامپوزیت استفاده می‌گردد. در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژ AZ31B/CNT با نانولوله‌های کربنی، به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و با استفاده از آنالیز حساسیت سوبل پرداخته شده است. پارامترهای ورودی در این پژوهش، سرعت پیشروی، سرعت چرخش، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و تعداد پاس‌های جوشکاری و همچنین خروجی‌های در نظر گرفته شده شامل سختی و کاهش وزن بوده است. به منظور تحلیل و واکاوی نتایج، از آنالیز حساسیت سوبل برای بررسی تأثیر کیفی و کمی ورودی‌ها بر خروجی‌ها استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که به ترتیب، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، سرعت چرخش، تعداد پاس‌های جوشکاری و سرعت پیشروی بر سختی تأثیرگذار است. همچنین درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، سرعت چرخش، تعداد پاس‌های جوشکاری و سرعت پیشروی بر کاهش وزن نیز تأثیرگذار هستند.</p>	<p>فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، آنالیز حساسیت سوبل، نانو کامپوزیت.</p> <p>تاریخ دریافت: 1400/11/24</p> <p>تاریخ بازنگری: 1401/02/16</p> <p>تاریخ پذیرش: 1401/02/27</p>

### 1- مقدمه

جذابیت استفاده از آلیاژهای منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن آن‌ها در صنایع مختلف مثل خودروسازی افزایش پیدا کرده است. با این حال به علت واکنش‌پذیری بالای فلز منیزیم، امکان شکل‌دهی آن به وسیله ریخته‌گری میسر نیست و مشکلات زیادی ایجاد خواهد شد. بر این اساس ترجیح داده می‌شود به جای روش ریخته‌گری از روش شکل‌دهی برای تولید قطعات با فلز منیزیم استفاده گردد. یکی از جدیدترین فرآیندهای استحکام فلز منیزیم، استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) است که شباهت زیادی به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارد. تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده که در ادامه به بررسی این تحقیقات پرداخته شده است. تفاوت این پژوهش با تحقیقات پیشین، بررسی پارامترهای مختلف و برهم‌کنش هر کدام از آن‌ها با سختی و کاهش وزن ناحیه‌ی جوش و استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل<sup>2</sup> است.

<sup>1</sup> Friction stir processing (FSP)

<sup>2</sup> Sobol sensitivity analysis

داراس و همکارانش به تحقیق روی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از طریق اصلاح ریزساختار به عنوان ابزاری مؤثر برای افزایش خواص ورق فلز پرداخته‌اند. با این روش پالایش، همگن‌سازی قابل توجهی را می‌توان در یک گذر پردازش همزن اصطکاکی برای ریزساختار به دست آورد که منجر به بهبود شکل‌پذیری به‌ویژه در دماهای بالا می‌شود. در این کار، امکان استفاده از پردازش اصطکاکی اغتشاشی برای اصلاح ساختار و خواص ورق‌های تجاری آلیاژ منیزیم AZ31B-H24 بررسی شده است. نتایج اولیه نشان می‌دهد که پردازش اصطکاکی اغتشاشی منجر به ساختار دانه‌های ریزتر و یک‌دست‌تر می‌شود [۱].

وانگ و همکارانش آلیاژهای منیزیم را که دارای استحکام و سختی بالا، جذب عالی ارتعاشات، اثر محافظ الکترومغناطیسی، قابلیت ماشین‌کاری خوب و قابلیت بازیافت دارند را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها علاوه بر معرفی اصل و مزایای اصلی پردازش اصطکاکی اغتشاشی، مطالعات پردازش اصطکاکی اغتشاشی را در اصلاح ساختار ریخته‌گری، رفتار تغییر شکل سوپر پلاستیکی، آماده‌سازی آلیاژهای ریزدانه منیزیم و کامپوزیت‌های سطحی مبتنی بر منیزیم و تولید افزودنی بررسی کرده‌اند. پردازش اصطکاکی اغتشاشی نه تنها ریزساختار را تصفیه، همگن و متراکم می‌کند، بلکه نقص‌های ریزساختار ریخته‌گری را از بین برده و فازهای شکننده و شبیه شبکه را نیز از بین می‌برد و آلیاژهای منیزیم، منیزیم ریزدانه، فوق‌ریز و نانو دانه را آماده می‌کند. در واقع، پردازش اصطکاکی اغتشاشی به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی جامع آلیاژها را بهبود می‌بخشد و در دمای پایین و یا نرخ کرنش بالا ایجاد می‌شود. علاوه بر این، پردازش اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند کامپوزیت‌های سطحی مبتنی بر منیزیم تقویت شده با ذرات و الیاف تولید کند. پردازش اصطکاکی اغتشاشی به‌عنوان یک روش تولید افزایش‌دهنده فلزات سبک، تولید افزودنی آلیاژهای منیزیم را امکان‌پذیر می‌کند [۲].

سیفیان و همکارانش تأثیر شرایط پردازش اصطکاکی اغتشاشی بر ویژگی خوردگی آلیاژ منیزیم AZ31B را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش نمونه‌های ساخته‌شده از آلیاژ AZ31B تحت اصطکاک با شرایط مختلف، پردازش شدند و ساختار و رفتار خوردگی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. رفتار خوردگی با قطبی شدن پتانسیودینامیکی<sup>۱</sup>، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی<sup>۲</sup> و آزمایش غوطه‌وری در محلول ۵/۳ درصد کلرید سدیم<sup>۳</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت خوردگی آلیاژ AZ31B پردازش‌شده در اثر اصطکاک ایجاد شده است. این بهبود به احتمال زیاد در نتیجه محصولات خوردگی پایدارتر و پالایش ریزساختار پس از پردازش اصطکاک ایجاد شده است [۳].

لئو و همکارانش اصلاح ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم ریخته‌گری AZ61 از طریق پردازش اصطکاکی اغتشاشی حالت جامد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به بررسی تأثیر پارامترهای پردازش بر تکامل ریز ساختاری، بافت و رفتار مکانیکی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که پردازش اصطکاکی اغتشاشی قادر به تولید آلیاژ منیزیم ریزدانه AZ61 از طریق تبلور مجدد پویا و از بین بردن ذرات نامطلوب بزرگ شبه شبکه‌ای  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> است که در امتداد مرزدانه در آلیاژ منیزیم ریخته‌گری وجود دارد. با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت تراورس<sup>۴</sup>، اندازه دانه و کسر مرزدانه با زاویه بالا افزایش می‌یابد که در مقایسه با آلیاژ ریخته‌گری اصلی، سختی و خاصیت کششی نمونه‌های پردازش اصطکاکی اغتشاشی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است [۴].

لئو و همکارانش، آلیاژ منیزیم AZ61 را با فرآیند چند فاز اصطکاکی اغتشاشی و با نسبت همپوشانی ۵۰ درصد تهیه کرده‌اند و ریزساختارها و خواص کششی صفحه چند فاز اصطکاکی اغتشاشی با نمونه‌های کششی جهت‌دار دارای دو جهت عرضی و ۴۵ درجه، جهت پردازش را مورد مطالعه قرار دادند. مقیاس بزرگ فرآیند چند فاز اصطکاکی اغتشاشی صفحه آلیاژ AZ61 عاری از نقص‌های کلان مشاهده شد. اندازه دانه صفحه AZ61 با ریخته‌گری به دلیل وجود تبلور مجدد پویا به‌طور قابل توجهی از طریق فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تصفیه شد. در مقایسه با صفحه ریخته‌گری، به دلیل پالایش دانه و از بین بردن نقص‌های ریخته‌گری، بهبود مؤثر در قدرت و شکل‌پذیری در صفحه منیزیم چند فاز پردازش اصطکاکی اغتشاشی در جهت عرضی و جهت ۴۵ درجه حاصل شد درحالی‌که شکل‌پذیری در نمونه‌هایی که در امتداد ۴۵ درجه تا جهت عرضی قرار دارند پایین‌تر و همچنین مقاومت

<sup>1</sup> Potentiodynamic

<sup>2</sup> Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

<sup>3</sup> NaCl

<sup>4</sup> Traverse speed

نیز بیشتر از صفحه ورقه‌ای بود. همچنین وابستگی جهت خواص کششی صفحه منیزیم چند فاز پردازش اصطکاکی اغتشاشی AZ61 عمدتاً به ریزساختار و بافت محلی نسبت داده شد [۵].

جمیلی و همکارانش پردازش اصطکاکی اغتشاشی را به عنوان یک‌روال مؤثر پردازش مکانیکی، تحت سرعت‌های مختلف چرخشی بر روی محلول آلیاژ منیزیم که دارای خاک کمیاب بود مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اعمال فرآیند بر روی مواد اولیه با محلول اولیه منجر به توسعه ریزساختارهای کاملاً تبلور مجدد می‌شود جایی که قابلیت پالایش، مستقیماً از طریق کنترل میزان کرنش و دما تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۶].

لئو و همکارانش پردازش اصطکاکی اغتشاشی برای اصلاح ساختار سطحی آلیاژ منیزیم ریخته‌گری AZ91 را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌های تکامل الکتروشیمیایی و هیدروژنی نشان می‌دهد که میزان خوردگی آلیاژ فرآوری شده در محلول ۵/۳ درصد وزنی NaCl به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این امر عمدتاً به تغییر فرآیند خوردگی ناشی از تغییر در مورفولوژی و توزیع فاز  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> از طریق پردازش اصطکاکی اغتشاشی نسبت داده می‌شود. در اصل گزارش شده است که تشکیل یک‌لایه فاز فشرده و پیوسته بر روی سطح پردازش اصطکاکی اغتشاشی به دلیل جداسازی فاز بتا به‌طور مؤثری ثابت و انفعال فیلم محصول خوردگی را افزایش می‌دهد [۷].

نصیری و همکارانش در پردازش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای منیزیم (as-cast mg-7al,mg-4al-3ca(a4x3) و mg-2al-5ca(a2x5) دریافتند که پردازش اصطکاکی اغتشاشی منجر به پالایش قابل توجه دانه و افزایش خواص مکانیکی می‌شود. به دلیل وجود مواد بین فلزات Al-Ca پایدار از نظر حرارتی، آلیاژهای حاوی کلسیم در مقایسه با آلیاژ Mg-7Al با فاز ناپایدار Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> پالایش دانه شدیدتری را نشان دادند. آلیاژ فرآوری شده AX43 با اندازه دانه ۱/۷ میکرومتر، بهترین خواص کششی را به نمایش گذاشت [۸].

دیناهاران و همکارانش، خاکستر بادی<sup>۱</sup> را که یک تقویت‌کننده ارزان‌تر از مواد دیگر است، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها کامپوزیت‌های ماتریس فلزی تقویت‌شده خاکستر بادی را بر اساس آلیاژ آلومینیوم AA6061، آلیاژ منیزیم AZ31 و مس گزارش کرده‌اند. کامپوزیت‌ها با استفاده از جدیدترین روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی سنتز شدند. ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> و پراش پراکنده الکترونی<sup>۳</sup> به عقب<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار گرفت. توزیع همگن ذرات خاکستر بادی در همه کامپوزیت‌ها مشاهده شد. تغییر شکل پلاستیکی شدید این فرآیند باعث شکستن ذرات خاکستر بادی شد. به دلیل تبلور مجدد پویا و اثر سنجاق، دانه‌ها به‌طور قابل توجهی در کامپوزیت‌ها تصفیه شدند. تقویت ذرات خاکستر بادی باعث افزایش سختی کامپوزیت‌ها شد [۹].

بابو و همکارانش متوجه شدند که خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم AZ31 پردازش شده با روش اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به دلیل دانه‌بندی ریزساختار که برای فرم دهی فوق پلاستیکی مناسب است، بهبود بخشید. پارامترهای پردازش همزن اصطکاکی برای آلیاژهای منیزیم AZ31، سرعت پیشروی و سرعت چرخشی بودند. نتایج نشان می‌دهد که کوچک‌ترین اندازه رسوب در سرعت اسپین دل و سرعت تغذیه ۸۰۰ دور در دقیقه و ۴۰ میلی‌متر در دقیقه به دست می‌آید [۱۰].

لئو و همکارانش دریافتند که ترکیب آلیاژهای حاکی کمیاب و پردازش اصطکاکی اغتشاشی در بهبود مقاومت خوردگی آلیاژهای Mg-9Al مطلوب است و ریزساختار و رفتار خوردگی آلیاژهای اصلاح شده Mg-9Al-xRE به ثبت رسیده است. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی نشان داد که مقاومت خوردگی آلیاژهای Mg-9Al-xRE به‌صورت ریخته‌گری در محلول ۵/۳ درصد وزنی NaCl با افزودن عناصر حاکی کمیاب ضعیف شده است. از طرفی مشخص شد که تشکیل مقدار زیادی رسوب Al-RE مانند نوار درشت، عامل انحلال سریع ماتریس منیزیم آندی است. با این حال، مقاومت در برابر خوردگی آلیاژهای پردازش اصطکاکی اغتشاشی Mg-9Al-xRE با افزودن عنصر حاکی کمیاب بهبود یافت و با افزایش میزان افزودن آلیاژ حاکی کمیاب، بهبود بیشتری حاصل شد. این امر عمدتاً به تغییر رفتار خوردگی آلیاژهای منیزیم به دلیل رسوبات تصفیه‌شده و توزیع

<sup>1</sup> Fly Ash (FA)

<sup>2</sup> Scanning electron microscope (SEM)

<sup>3</sup> Electron Backscatter Diffraction (EBSD)

مجدد در ماتریس  $\alpha$ -Mg نسبت داده می‌شود. پالایش رسوبات کاتدی نسبت ناحیه آند و کاتد را افزایش داده و تمایل شدید خوردگی گالوانیکی را در آلیاژهای منیزیم به تأخیر می‌اندازد. علاوه بر این، وجود مقدار زیادی از رسوبات ریز Al-RE در رشد تجمعی لایه محصول خوردگی در حین انتشار خوردگی مطلوب است و ثبات و فشردگی این لایه محافظ را بهبود می‌بخشد [۱۱].

لثو و همکارانش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را با استفاده از نسبت سرعت یکسان به‌عنوان یک روش جایگزین برای پردازش ورق‌های آلیاژ منیزیم AZ31 برای افزایش عملکرد خوردگی و خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر خواص مکانیکی، تکامل ریزساختار و عملکرد خوردگی منطقه هم‌زده<sup>۱</sup> با استفاده از یک دستگاه آزمون جهانی الکترونیکی و یک ایستگاه کاری الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. میانگین اندازه دانه و تعداد  $\beta$ -Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> که در منطقه هم‌زده رسوب می‌کند، علاوه بر اینکه به‌طور قابل توجهی ظریف‌تر و بیشتر از آلیاژ AZ31 است، به تدریج با افزایش سرعت پردازش، افزایش می‌یابد و یکنواختی و پراکندگی  $\beta$ -Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> در منطقه هم‌زده به دلیل ورودی گرمای کافی ناشی از افزایش سرعت پردازش رسوب می‌کند. علاوه بر تغییرات جزئی در خواص مکانیکی، بدیهی است که پردازش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت بالا و به‌ویژه پردازش اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخش بالا، عملکرد خوردگی آلیاژ AZ31 را به دلیل تشکیل توزیع همگن و پراکنده رسوبات  $\beta$ -Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> بهبود بخشیده است. منطقه هم‌زده به‌دست آمده در ۵۰۰۰ دور در دقیقه و ۱۲۵ میلی‌متر در دقیقه مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی از خود نشان داد. پتانسیل خوردگی منطقه هم‌زده از ۵۶۳/۱ ولت تا ۲۳۰/۱ ولت افزایش‌یافته و جریان خوردگی در مقایسه با آلیاژ AZ31 دریافتی از  $1/55 \times 10^{-4}$  A تا  $2/87 \times 10^{-5}$  A کاهش‌یافته است [۱۲].

دینهاران و همکارانش از پردازش اصطکاکی اغتشاشی برای توسعه کامپوزیت‌های ماتریس منیزیم AZ31B تقویت‌شده با کامپوزیت زمینه فلزی<sup>۲</sup> ذرات تیتانیوم خالص (Ti) استفاده کرده‌اند. در ابتدا از استراتژی شیار ماشین برای بسته‌بندی ذرات تیتانیوم استفاده شد و پردازش اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از یک ماشین معمولی فرز عمودی انجام گرفت. در این مطالعه سرعت عبور، تعداد پاس‌ها و کسر حجمی ذرات تیتانیوم متفاوت بود. تکامل ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نوری و روبشی مشاهده و مناطق مختلف ریزساختاری بر اساس توزیع ذرات تیتانیوم در منطقه هم‌زدن مشخص شد. به‌طور کلی مشاهده شد که تمایل به تشکیل خوشه‌ها در سرعت‌های کمتر و تعداد بیشتر پاس‌ها کاهش می‌یابد. افزایش سرعت تراورس و تعداد پاس‌ها، دانه‌های ماتریس منیزیم را تصفیه کرد. تغییرات در رفتار کششی به دلیل پارامتر فرآیند انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفت. کامپوزیت‌های ساخته‌شده با سرعت عرض ۳۰ میلی‌متر در دقیقه و ۵ پاس بیشترین مقاومت کششی و کشیدگی را نشان دادند [۱۳].

ودابوریس واران و همکارانش، کامپوزیت ماتریس سطحی بر روی آلیاژ منیزیم کمیاب زمین RZ5 با پردازش اصطکاکی اغتشاشی تک مرحله‌ای را با استفاده از ذرات تقویت‌کننده میکرو یا نانو با اندازه‌های مختلف مانند کاربرد بور (B4C)، نانولوله‌های کربنی چند جداره<sup>۳</sup> و مخلوطی مورد مطالعه قرار دادند. ذرات  $ZrO_2 + Al_2O_3$  کامپوزیت‌های ماتریس دانه‌ریز با اندازه دانه بین ۱/۸ تا ۱/۸۷ میکرومتر ایجاد می‌کند. چسباندن مرز دانه توسط ذرات تقویت‌کننده منجر به تبدیل مواد پایه دانه‌درشت به کامپوزیت ماتریس فلزی دانه‌ریز شده است. ساختار دانه‌های ریزتر و وجود آرماتورها در ناحیه هم‌زن منجر به افزایش و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های توسعه یافته شده است. کامپوزیت‌های ماتریس فلزی که با استفاده از تقویت‌کننده‌های مختلف توسعه یافته‌اند، افزایش قدرت بین ۲۵۰ MPa و ۳۲۰ MPa را نشان می‌دهند [۱۴].

ما و همکارانش، در مورد آلیاژهای منیزیم با پردازش اصطکاکی اغتشاشی پژوهشی انجام دادند. این مطالعه نشان می‌دهد که تصفیه دانه قابل توجه و تجزیه ذرات در مرحله دوم را می‌توان به‌طور هم‌زمان با پردازش اصطکاکی اغتشاشی به دست آورد. مقادیر بالای افزایش طول پلاستیک در آلیاژهای منیزیم پردازش اصطکاکی اغتشاشی در طیف وسیعی از نرخ کرنش و درجه حرارت به دست آمد. چسباندن ذرات مقاوم در برابر حرارت بر روی دانه در آلیاژهای Mg-RE ریزساختار را تثبیت کرده و منجر

<sup>1</sup> Stir Zone (SZ)

<sup>2</sup> Metal matrix composite (MMCs)

<sup>3</sup> Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNTs)



به بروز فوق در دمای بالاتر و نرخ کرنش بیشتر می شود [۱۱۵].

کومار و همکارانش در مطالعه خود به بررسی تاثیر پروفیل های پین ابزارهای استوانه ای رزوه ای و استوانه ای مستقیم بر خواص مکانیکی شامل استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول و راندمان اتصال آلیاژ آلومینیوم فرآوری شده با اصطکاکی اغتشاشی پرداخته اند. آن ها در این روش برای انتخاب سرعت عرضی و چرخشی ابزار در سه متغیر متمایز شکل ابزار، سرعت و نرخ خوردگی از روش تاگوچی<sup>۱</sup> بهره برده اند. نتایج نشان داد که اتصال ساخته شده توسط پروفیل ابزار رزوه ای، حداکثر استحکام کششی و درصد کشیدگی را نسبت به پروفیل پین ابزار استوانه ای تغییر می دهد. همچنین مشخص شد که پین ابزار رزوه دار در مقایسه با ابزار استوانه ای، کارایی مفصل خوبی دارد. علاوه بر این، اتصالات ساخته شده توسط پروفیل پین ابزار رزوه ای، شکل پذیری بیشتری نسبت به پروفیل ابزار استوانه ای از خود نشان داد [۱۱۶].

باقری و همکاران، به ادغام ذرات سلیسیم کاربید در اندازه نانو با آلیاژ منیزیم و به روش پردازش اغتشاشی اصطکاکی و پردازش ارتعاشی اصطکاکی اغتشاشی (FSVP)<sup>۲</sup> برای تولید لایه های نانو کامپوزیت سطحی پرداخته اند. پردازش ارتعاشی اصطکاکی اغتشاشی یک روش اصلاح شده از پردازش اغتشاشی اصطکاکی است که در آن نمونه در طول ارتعاش می یابد و تاثیر اعداد عبوری FSP و FSVP بر رفتارهای مکانیکی و ریزساختاری سطوح توسعه یافته مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان داد که لایه های نانو کامپوزیت تولید شده توسط FSVP دارای ریزساختارهای ظریف تری در مقایسه با لایه های تولید شده توسط FSP است و ذرات در اندازه نانو به طور همگن توزیع می شوند. علاوه بر این، خواص مکانیکی از جمله سختی، مقاومت در برابر خراش، شکل پذیری و استحکام نمونه های فراوری شده FSVP، بیشتر از نمونه های فراوری شده بوده است و با افزایش عبور FSP، میزان تخلخل کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که افزایش فرکانس ارتعاش در طول فرآیند FSVP باعث پراکندگی یکنواخت تر ذرات مرکب و در نتیجه کاهش خوشه بندی ذرات می شود [۱۱۷].

بوپاتی و همکاران، به ساخت مواد کامپوزیت سطحی آلیاژ آلومینیوم تقویت شده با کاربید بور از طریق روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته اند. آلیاژ آلومینیوم و ذرات کاربید بور به ترتیب به عنوان ماتریس و مواد تقویت شده استفاده شده اند. در این پژوهش به کمک روش تاگوچی پارامترهای تاثیرات درصد حجمی بور-کاربید، نرخ تغذیه، سرعت دورانی بر استحکام کششی و سایش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که بالاترین استحکام کششی ۳۴۷ مگاپاسکال و حداقل سایش ۵۵ میکرومتر از ۱۵ درصد حجم ذرات کاربید بور، سرعت چرخش ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت حرکت ۴۰ میلی متر بر دقیقه ابزار حاصل شده است [۱۱۸].

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- بیان مسئله و نوآوری

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک روش جهت بهبود ریز ساختار سطحی مواد می باشد، در این فرآیند مواد در ناحیه فرآیند، تحت یک تغییر شکل پلاستیکی شدید قرار می گیرند که موجب تبلور مجدد دینامیکی می شود. پارامترهای اثرگذار در این روش سرعت پیشروی، سرعت چرخش، درصد وزنی نانولوله های کربنی و تعداد پاس جوشکاری هستند. در این تحقیق برای اولین بار به بررسی تاثیر هر یک از پارامترها با استفاده از آنالیز حساسیت پرداخته شد. در انتها به بررسی تاثیر هر پارامتر بر سختی و کاهش وزن ناحیه جوش پرداخته شده است.

### ۲-۲- تحلیل رگرسیون

تحلیل رگرسیون، یک فرآیند آماری برای تخمین روابط بین متغیرهاست که می تواند تغییرات طبیعی در داده های مکرر را مانند تغییر واقعی تخمین بزند [۱۱۹]. تحلیل رگرسیون برای شناسایی روابط بین پارامترهای (متغیرهای) مستقل و تاثیر آن ها بر متغیر وابسته، مورد استفاده قرار می گیرد. در جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی به همراه سطح پایین و بالایی آن ها آورده شده

<sup>1</sup> Taguchi methods

<sup>2</sup> friction stir vibration processing (FSVP)

است.

جدول ۱ سطح پایین و بالای پارامترها

پارامتر	مقدار نانولوله (درصد وزنی)	سرعت پیشروی (میلی متر بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	تعداد پالس
	A	B	C	D
سطح پایین	۶۶۰	۲۴	۱	سطح پایین
سطح بالا	۸۷۰	۴۴	۴	سطح بالا

معادلات (۱) و (۲)، معادلات رگرسیون به دست آمده برای دو پارامتر خروجی یعنی، سختی (۳) و کاهش وزن (۴) هستند.

$$HV = 76.88 + 8.92A - 0.51B - 1.6C + 1.28D - 2.57AB - 2.28AD - 6.20A^2 \quad (1)$$

$$mg = 11.67 + 0.32B - 0.32C + 0.78AC - 0.65AD - 0.44CD - 1.06A^2 \quad (2)$$

### ۳-۲- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی می کند و بیان می کند که این عدم قطعیت در خروجی چگونه به عدم قطعیت در ورودی مربوط می شود. این روش برای شناسایی پارامترهای مؤثر و پارامترهای غیر مؤثر در خروجی مدل مورد استفاده قرار می گیرد. آنالیز حساسیت را به چند طریق طبقه بندی می کنند. برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب فرم مدل، که به روش های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه بندی می شود.

روش سوبل یکی از روش های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه ی تجزیه واریانس می باشد. از این روش می توان برای توابع و مدل های غیر خطی و غیریکنواخت استفاده کرد. در این روش برای مدل تعریف شده با تابع  $Y = f(x)$ ، که  $Y$  خروجی مدل و  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار پارامترهای ورودی می باشد و واریانس خروجی مدل ( $V$ ) به صورت مجموع واریانس های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه (۳) می باشد:

$$(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1\dots n} \quad (3)$$

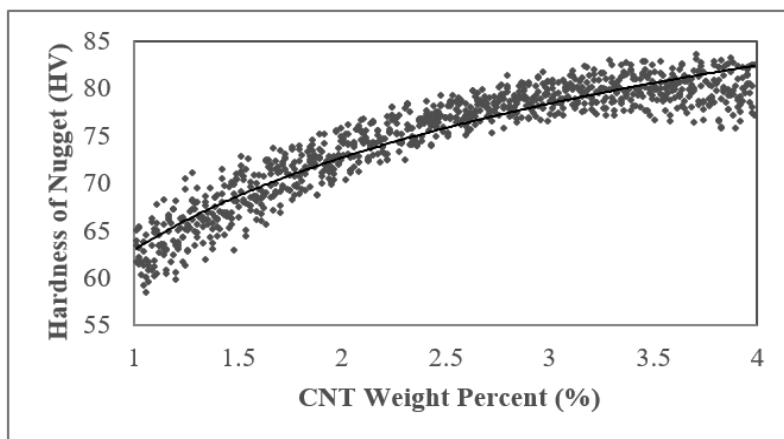
که در آن،  $V_i$  تأثیر مرتبه اول برای هر فاکتور ورودی  $SV_{ij} = V[E(Y | x_i, x_j)] - V_i - V_{ij}$  و  $Xi (V_i = V[E(Y | x_i)])$  که  $V_i$  تا  $V_{1\dots n}$  برهم کنش بین  $n$  فاکتور را نشان می دهند.

شاخص های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می آیند  $Si = Vi/V$  شاخص حساسیت مرتبه ی اول  $Si = Vij/V$ ، شاخص حساسیت مرتبه ی دوم و...). شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه ی مرتبه های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (۴) به دست می آید:

$$3 - S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (4)$$

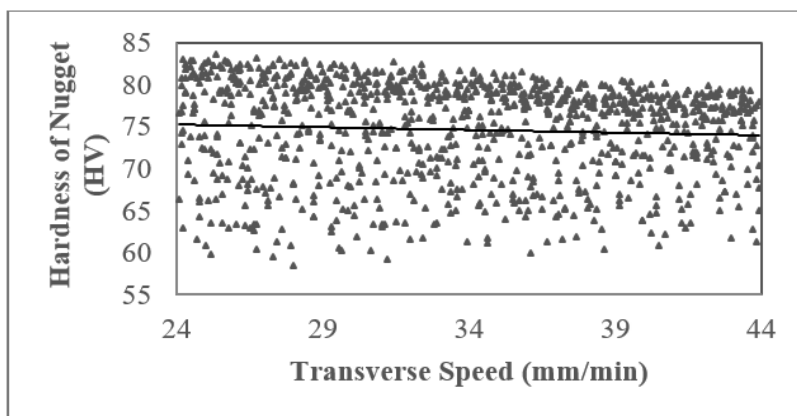
### ۳- بررسی و تحلیل نتایج

در ابتدا اثر پارامترهای ورودی بر سختی مورد بررسی قرار می گیرد. اولین پارامتر، تأثیر مقدار نانولوله بر سختی است. از نتایج به دست آمده و با کمک رسم نمودار تأثیر مقدار نانو لوله بر سختی در شکل ۱ بررسی شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش درصد مقدار نانولوله، سختی نیز افزایش پیدا می کند.



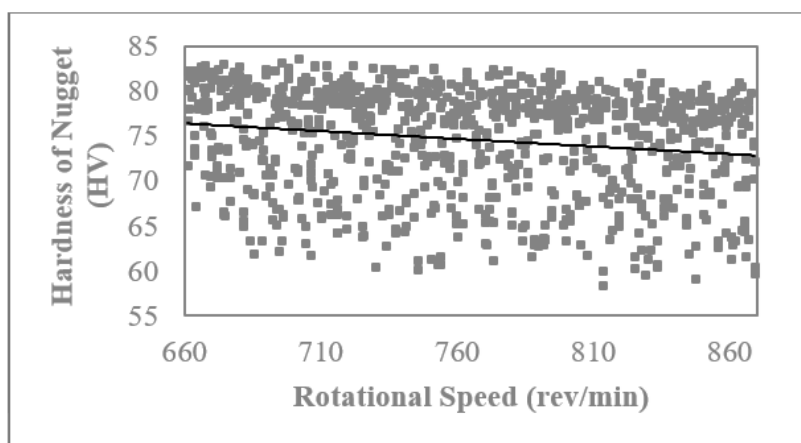
شکل ۱ بررسی اثر مقدار نانو لوله بر سختی

پارامتر اثرگذار بعدی، سختی بر سرعت پیشروی است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی، میزان سختی با شیبی ملایم کم می شود.



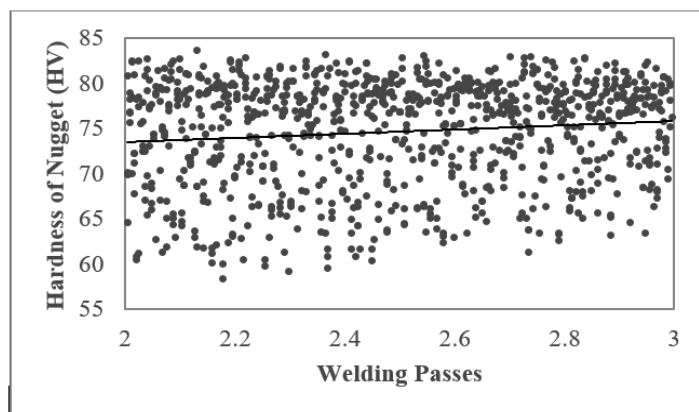
شکل ۲ بررسی اثر سرعت پیشروی بر سختی

در شکل ۳ تأثیر پارامتر سرعت چرخشی بر سختی مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که ملاحظه می شود همانند سرعت پیشروی با افزایش سرعت چرخشی سختی با شیب منفی کاهش پیدا کرده است.



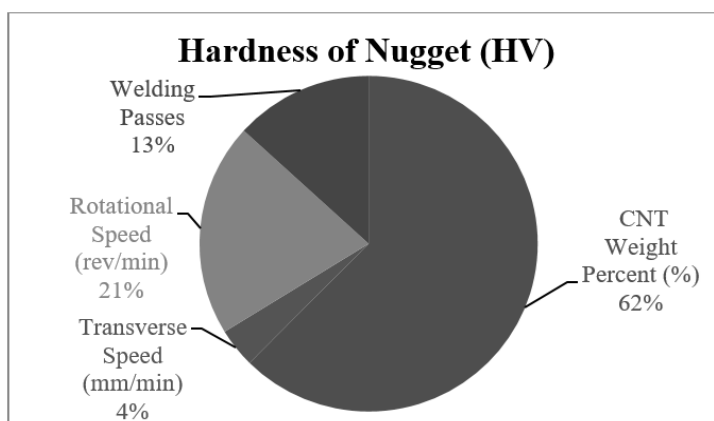
شکل ۳ بررسی اثر سرعت چرخشی بر سختی

پارامتر دیگری که اثر آن بر سختی مورد بررسی قرار گرفته، تعداد پالس است. در شکل ۴ ملاحظه می شود در بازه بین دو تا سه پالس، با افزایش پالس، سختی نیز با شیب ملایم افزایش می یابد.



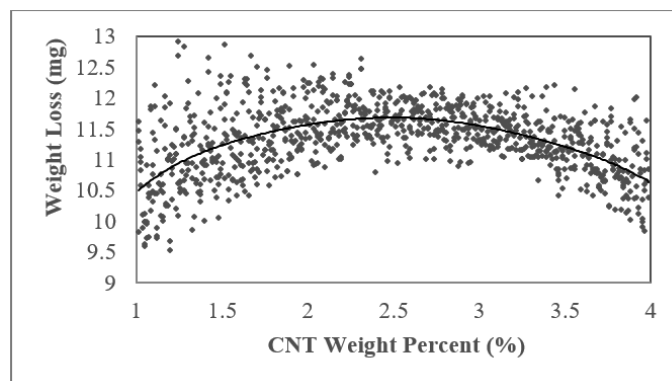
شکل ۴ بررسی اثر تعداد پاس بر سختی

از شکل‌های یک تا چهار می‌توان نتیجه گرفت افزایش دو پارامتر مقدار نانولوله و تعداد پاس باعث افزایش سختی و افزایش دو پارامتر سرعت پیشروی و سرعت چرخش باعث کاهش سختی می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت بیشترین اثر را بر سختی مقدار نانولوله و کمترین اثر را سرعت پیشروی دارند. شکل ۵ بررسی کمی میزان تأثیر پارامترها بر سختی را نشان می‌دهد که نتایج از آنالیز حساسیت سوپل به دست آمده‌اند. شکل ۵ به مقایسه کمی تأثیر فاکتورهای مختلف بر سختی با روش آنالیز حساسیت سوپل پرداخته است. با توجه به شکل ۵ این نتیجه به دست می‌آید که، به ترتیب مقدار نانولوله با ۶۲ درصد، سرعت چرخشی با ۲۱ درصد، تعداد پاس با ۱۳ درصد و سرعت پیشروی با ۴ درصد به ترتیب بیشترین تأثیر را بر سختی داشته‌اند.



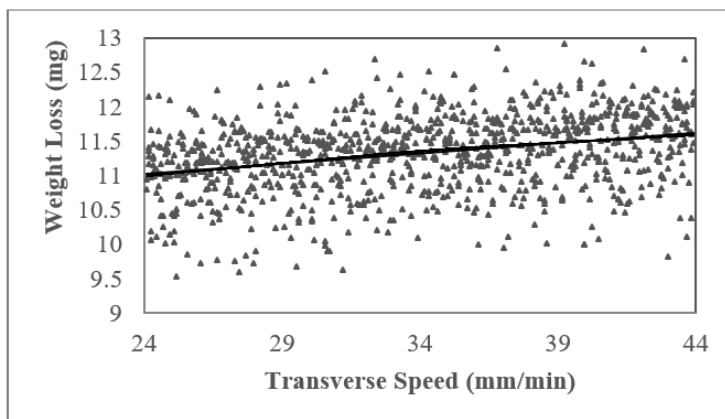
شکل ۵ مقایسه کمی تأثیر فاکتورهای مختلف بر سختی

پس از بررسی تأثیر پارامترها بر سختی، به بررسی اثر پارامترها بر کاهش وزن پرداخته شده است. در ابتدا اثر پارامتر مقدار نانولوله مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در ابتدا با افزایش مقدار نانولوله میزان کاهش وزن افزایش می‌یابد اما پس از رسیدن به بیشترین کاهش وزن نمودار کاهش وزن به صورت نزولی کاهش می‌یابد.



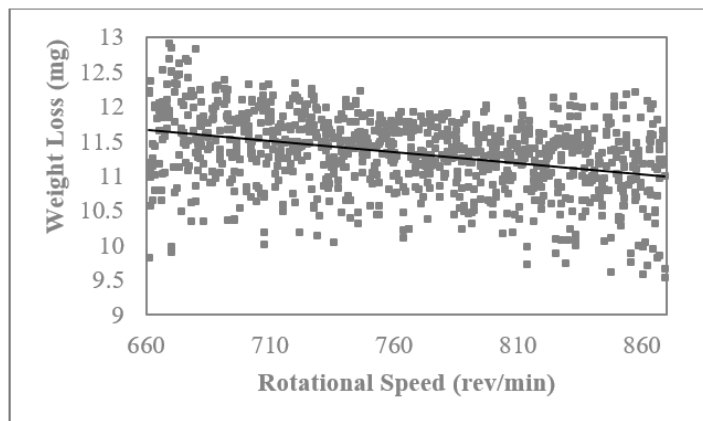
شکل ۶ بررسی اثر مقدار نانولوله بر کاهش وزن

پارامتر بعدی که مورد بررسی قرار گرفته است سرعت پیشروی است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، با افزایش سرعت پیشروی مقدار کاهش وزن نیز افزایش پیدا کرده است.



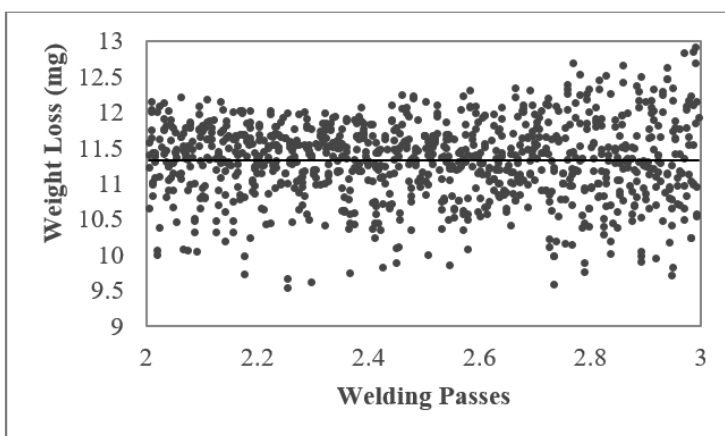
شکل ۷ بررسی اثر سرعت پیشروی بر کاهش وزن

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، تأثیر سرعت چرخشی بر کاهش وزن نیز مانند تأثیر سرعت چرخشی بر سختی، منفی است لذا با افزایش سرعت چرخشی، میزان کاهش وزن کمتر می شود.



شکل ۸ بررسی اثر سرعت چرخشی بر کاهش وزن

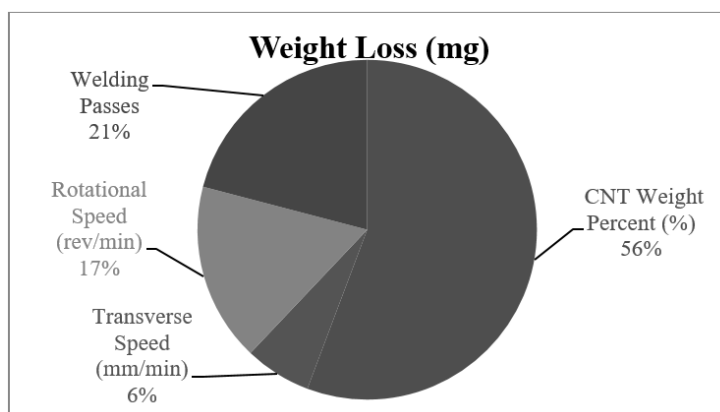
در شکل ۹ تأثیر پارامتر آخر یعنی تعداد پالس مشاهده می شود. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد پاس به مقدار کمی کاهش جرم افزایش یافته است.



شکل ۹ بررسی تأثیر تعداد پاس بر کاهش وزن

با توجه به شکل های ۶ تا ۹ این نتیجه حاصل می شود که سرعت پیشروی و تعداد پاس جوشکاری تأثیر مستقیم و مثبتی بر کاهش وزن دارند و بالعکس با افزایش سرعت پیشروی کاهش وزن کاهش یافته است. در شکل ۱۰ به بررسی کمی اثر پارامترهای

ورودی بر کاهش وزن پرداخته شده است.



شکل ۱۰ مقایسه کمی تأثیر فاکتورهای مختلف بر کاهش وزن

در شکل ۱۰ با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل به مقایسه کمی تأثیر فاکتورهای ورودی بر کاهش وزن پرداخته شده است. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین تأثیر را درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با ۵۶ درصد تأثیر دارا می‌باشد و پس از آن تعداد پاس جوشکاری با ۲۱ درصد بیشترین تأثیر را بر کاهش وزن دارد. همچنین سرعت چرخش و سرعت پیشروی به ترتیب با ۱۷ و ۶ درصد بر کاهش وزن تأثیرگذار بوده‌اند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

روش آنالیز حساسیت در سال‌های اخیر کاربردهای گوناگونی در بررسی کمی و کیفی تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی‌ها دارد. در این پژوهش نخستین بار از آنالیز حساسیت سوبل برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خروجی‌های آزمایش استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، تعداد پاس جوشکاری، سرعت چرخش و سرعت پیشروی بوده‌اند. علاوه بر این، خروجی‌های مورد بررسی، سختی و کاهش وزن نمونه بوده‌اند. با توجه به تحلیل داده‌ها با استفاده از آنالیز حساسیت سوبل، مشخص شد که درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بیشترین تأثیر را بر سختی و کاهش وزن نمونه مورد آزمایش دارد. همچنین پس از درصد نانولوله‌های کربنی به ترتیب سرعت چرخش، تعداد پاس جوشکاری و سرعت پیش روی، بیشترین تأثیر را بر سختی دارند. درحالی‌که در خصوص کاهش وزن نمونه مورد آزمایش پس از درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، تعداد پاس جوشکاری، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر کاهش وزن نمونه مورد آزمایش دارند. در ادامه این پژوهش می‌توان به بررسی سایر پارامترهای اثرگذار نیز پرداخت، ضمن این‌که برای بررسی و تجزیه نتایج می‌توان از روش‌های دیگر آنالیز حساسیت استفاده کرد.

#### ۵- مراجع

- [1] Darras B M, Khraisheh M K, Abu-Farha F K, Omar M A. Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy. *Journal of materials processing technology*. 2007;191:77-81.
- [2] Wang W, Han P, Peng P, Zhang T, Liu Q, Yuan S-N, Huang L-Y, Yu H-L, Qiao K, Wang K-S. Friction stir processing of magnesium alloys: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2020;33:43-57.
- [3] Seifiyan H, Sohi M H, Ansari M, Ahmadkhaniha D, Saremi M. Influence of friction stir processing conditions on corrosion behavior of AZ31B magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2019;7:605-616.
- [4] Luo X C, Kang L M, Liu H L, Li Z J, Liu Y F, Zhang D T, Chen D L. Enhancing mechanical properties of AZ61 magnesium alloy via friction stir processing: Effect of processing parameters. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;797:139945.

- [5] Luo X C, Zhang D T, Zhang W W, Qiu C, Chen D L. Tensile properties of AZ61 magnesium alloy produced by multi-pass friction stir processing: Effect of sample orientation. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;725:398-405.
- [6] Jamili A M, Zarei-Hanzaki A, Abedi H R, Mosayebi M, Kocich R, Kunčická L. Development of fresh and fully recrystallized microstructures through friction stir processing of a rare earth bearing magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;775:138837.
- [7] Liu Q, Ma Q-x, Chen G-q, Cao X, Zhang S, Pan J-l, Zhang G, Shi Q-y. Enhanced corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy through refinement and homogenization of surface microstructure by friction stir processing. *Corrosion science*. 2018;138:284-296.
- [8] Nasiri Z, Khorrami M S, Mirzadeh H, Emamy M. Enhanced mechanical properties of as-cast Mg-Al-Ca magnesium alloys by friction stir processing. *Materials Letters*. 2021;296:129880.
- [9] Dinaharan I, Akinlabi E T. Low cost metal matrix composites based on aluminum, magnesium and copper reinforced with fly ash prepared using friction stir processing. *Composites Communications*. 2018;9:22-26.
- [10] Babu J, Anjaiah M, Mathew A. Experimental studies on Friction stir processing of AZ31 Magnesium alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:4515-4522.
- [11] Liu Q, Chen G-q, Zeng S-b, Zhang S, Long F, Shi Q-y. The corrosion behavior of Mg-9Al-xRE magnesium alloys modified by friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;851:156835.
- [12] Liu F, Ji Y, Sun Z, Liu J, Bai Y, Shen Z. Enhancing corrosion resistance and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy by friction stir processing with the same speed ratio. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;829:154452.
- [13] Dinaharan I, Zhang S, Chen G, Shi Q. Development of titanium particulate reinforced AZ31 magnesium matrix composites via friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;820:153071.
- [14] Vedabouriswaran G, Aravindan S. Development and characterization studies on magnesium alloy (RZ 5) surface metal matrix composites through friction stir processing. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2018;6:145-163.
- [15] Ma Z Y, Xiao B L, Yang J, Feng A H. Friction stir processing: a novel approach for microstructure refinement of magnesium alloys. *638;1191-1196*.
- [16] Kumar R, Kumar H, Kumar S, Chohan J S. Effects of tool pin profile on the formation of friction stir processing zone in AA1100 aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2022;48:1594-1603.
- [17] Bagheri B, Abdollahzadeh A, Sharifi F, Abbasi M. The role of vibration and pass number on microstructure and mechanical properties of AZ91/SiC composite layer during friction stir processing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236:2312-2326.
- [18] Boopathi S, Thillaivanan A, Pandian M, Subbiah R, Shanmugam P. Friction stir processing of boron carbide reinforced aluminium surface (Al-B4C) composite: Mechanical characteristics analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50:2430-2435.
- [19] Hamby D M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental monitoring and assessment*. 1994;32:135-154.