

## بهینه‌سازی خواص مکانیکی سطحی و مشخصه‌یابی نانوکامپوزیت AZ31B/CNT به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) با استفاده از روش طراحی آزمایشات روش سطح پاسخ (RSM)

معاد سلطانی\*، بهزاد نیرومند و مرتضی شمعیان  
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸)

چکیده - در این تحقیق به بهینه‌سازی کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژ منیزیم AZ31B با نانولوله‌های کربنی به کمک روش فرایند اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته شد. بدین منظور پارامترهای مؤثر در فرایند شامل سرعت پیشروی، سرعت چرخش، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و تعداد پاس جوشکاری با روش طراحی آزمایش پاسخ سطح بررسی شد. جهت مشخصه‌یابی نمونه‌ها از آزمون‌های میکروسختی سنجی، کشش، پانچ برشی و سایش خشک پین بر روی دیسک استفاده شد. نتایج مدل‌سازی بر روی دو پاسخ سختی و کاهش وزن ناحیه جوش نشان می‌دهد که در سرعت پیشروی ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت چرخش ۶۶۰ دور بر دقیقه، چهار درصد وزنی نانولوله کربنی و سه پاس جوشکاری، شرایط بهینه قابل دستیابی است. همچنین شکست نگاری سطوح کشش و برش حکایت از توزیع همگن نانولوله‌های کربنی در زمینه و افزایش خواص کششی و برشی داشت.

واژه‌های کلیدی: منیزیم، نانولوله‌های کربنی، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، نانوکامپوزیت، طراحی آزمایش.

## Optimization of Surface Mechanical Properties and Characterization of AZ31B/CNT Nano-composite through Friction Stir Processing (FSP) using Response Surface Methodology (RSM) Design of Experiment

M. Soltani\*, B. Niroumand and M. Shamanian

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

**Abstract:** In this paper, the optimization of the surface composite of Mg AZ31B-carbon nanotub(CNT) via friction stir processing was investigated. Then, the most effective process parameters such as transverse speed, rotational speed, CNT weight percent and welding passes were studied by Response Surface Methodology (RSM) design of experiment. The specimens were also characterized by micro-hardness, tensile, shear punch and pin on disk dry sliding wear tests. The optimization results of hardness and weight reduction responses showed that the best conditions would be achievable with a transverse speed of 24 mm/min, rotational speed of 660 rpm, 4wt.% CNT and 3 welding passes. Moreover, fracture analysis of the surfaces proved a

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: maad.soltani@yahoo.com

*uniform distribution of CNTs in the matrix resulted in higher tensile and shear strength.*

**Keywords:** *Magnesium, Carbon Nano Tubes, Friction-Stir Processing, Nano-composites, Design of Experiment.*

## ۱- مقدمه

سایشی در حالت ترکیبی از نانوالومینا و نانولوله کربنی (نسبت یک به دو) به دست می‌آید.

نانولوله‌های کربنی با خواص کم نظیری مثل نسبت سطح به حجم بسیار زیاد، رسانایی فوق‌العاده، متصل‌کنندگی مرزانه‌ها و بهبود سختی، پتانسیل بالایی برای استفاده در کامپوزیت‌سازی سطحی دارند. اگرچه تاکنون پژوهشی مفصل در زمینه کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژهای منیزیم به کمک نانولوله‌های کربنی گزارش نشده است، اما چند تحقیق در مورد کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژهای آلومینیوم با نانولوله‌های کربنی به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی به چاپ رسیده است [۳، ۸، ۹ و ۱۰].

رایج‌ترین روش در انجام آزمایش‌ها، روش یک عامل در هر زمان<sup>۳</sup> می‌باشد که بسیار زمان‌گیر و هزینه‌بر بوده و در برخی از موارد ممکن است در صورت وقوع اندرکنش<sup>۴</sup> بین پارامترها جواب قابل قبولی ارائه نشود. مؤثرترین راه برای افزایش اعتبار کار و کاهش زمان و هزینه، استفاده از روش‌های جدید طراحی آزمایش است. به عبارت دیگر، در انجام آزمایش‌ها به روش قدیمی یک عامل در هر زمان، در هر مرحله فقط یک پارامتر تغییر کرده و بقیه پارامترها ثابت نگه‌داشته می‌شوند و به همین دلیل شناسایی اندرکنش‌ها غیرممکن خواهد بود. در روش طراحی آزمایش علاوه بر امکان بررسی اندرکنش بین دو پارامتر، می‌توان اندرکنش بین چند فاکتور را نیز مورد مطالعه قرار داد [۱۱].

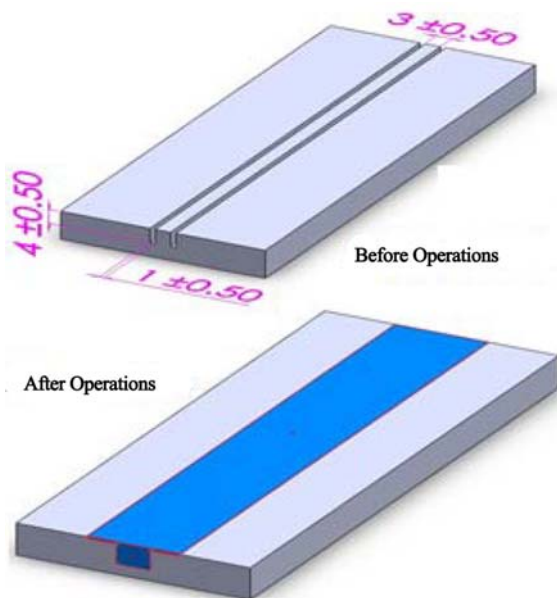
یکی از مهم‌ترین روش‌های طراحی آزمایش‌ها، روش رویه پاسخ<sup>۵</sup> است. در این روش، سطحی از پاسخ که می‌تواند به حالت منحنی باشد در دسترس بوده و در هر نقطه از سطح، پاسخ مورد نظر را مشخص کند. با استفاده از این روش، مشکل اساسی روش‌های فاکتوریل که خطی گرفتن پاسخ بین دو سطح می‌باشد رفع شده و در پایان، مدل ارائه شده می‌تواند غیرخطی باشد. در این حالت تطابق پاسخ‌ها با مدل، با دقت بیشتری انجام می‌شود [۱۲].

آلیاژهای منیزیم به دلیل چگالی پایین و استحکام ویژه بالا، پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنایع هوایی و اتومبیل‌سازی دارند [۱]. منیزیم دارای برخی خواص نامطلوب هم می‌باشد که از آن جمله می‌توان به مقاومت به خوردگی و سایش ضعیف و سختی و انعطاف پذیری پایین اشاره کرد [۲]. تحقیقات نشان داده است که با اصلاح شکل و کاهش اندازه دانه، می‌توان خواص مکانیکی این آلیاژها را بهبود بخشید [۱]. کامپوزیت‌سازی سطحی یکی از روش‌های بهبود خواص سطحی است که در آن سطح یک ماده با خواص مکانیکی معمولی به روش‌های مختلفی نظیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> با یک ماده تقویت کننده مثل ذرات اکسیدی، کربیدی، نیتریدی، نانولوله‌های کربنی<sup>۲</sup> و غیره کامپوزیت می‌شود [۳]. در این حالت، سطحی سخت با خواص مکانیکی و مقاومت به سایش بالاتر به دست می‌آید.

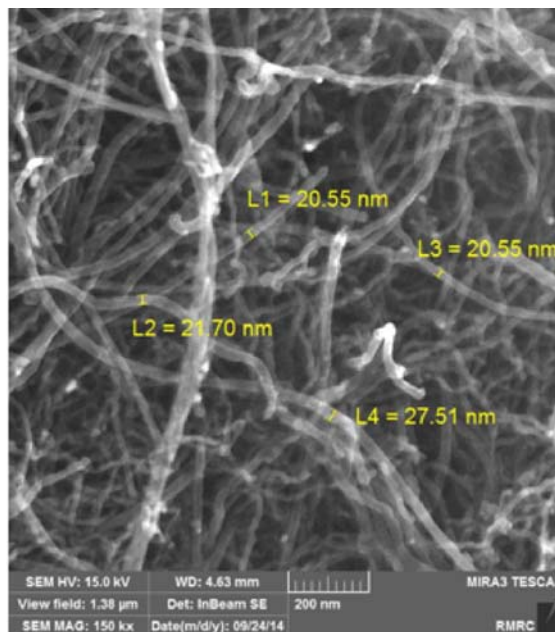
در سال‌های اخیر تحقیقاتی بر روی کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژهای منیزیم به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی با مقاصد مختلف انجام شده است. اغلب این تحقیقات بر روی معروف‌ترین دسته آلیاژهای منیزیم یعنی آلیاژهای کار شده گروه AZXX (منیزیم-آلومینیوم-روی) انجام شده است [۴]. فرجی و همکارانش (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر ریزساختار و سختی لایه کامپوزیتی AZ91/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تولید شده به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداختند [۵]. در تحقیقی دیگر، اسدی و همکارانش (۲۰۱۱) به تولید لایه کامپوزیتی AZ91/SiC به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی اقدام نمودند [۶]. همین گروه در سال ۲۰۱۱ به بررسی تأثیر نوع نانوذرات و تعداد پاس‌های فرایند در نانوکامپوزیت‌های تولید شده به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداختند [۷]. لو و همکارانش (۲۰۱۳) به بررسی خواص سایشی نانوکامپوزیت AZ31/CNT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> پرداختند. آنها دریافتند که بهترین خواص

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ منیزیم AZ۳۱B به روش کوانتومتری

Cu	Mn	Si	Zn	Al	Mg	عنصر
۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۶	۱/۶۶	۳/۶۱	پایه	درصد وزنی



(ب)



(الف)

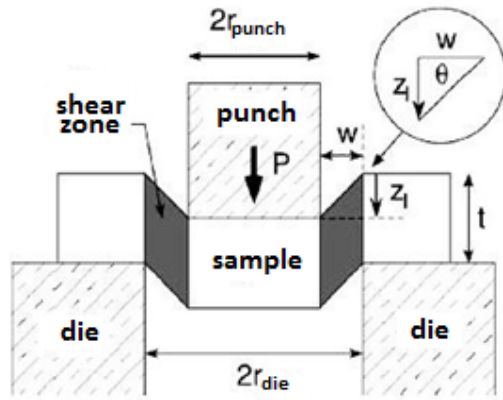
شکل ۱- الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی از نانولوله‌های مورد استفاده در این تحقیق و ب) تصویر شماتیک نمونه در قبل و بعد از عملیات اصطحکاکي- اغتشاشی

## ۲- مواد و روش تحقیق

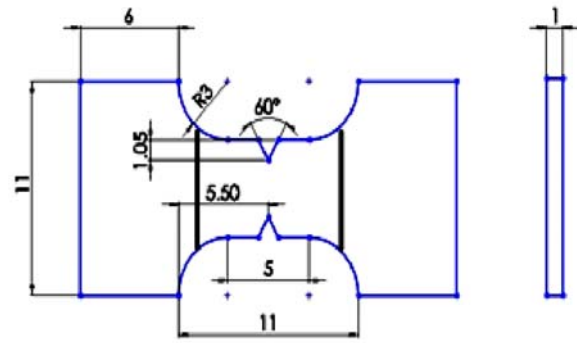
در این تحقیق آلیاژ اکستروود شده منیزیم AZ۳۱B به عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار گرفت که نمونه‌هایی به ابعاد ۵×۴×۸ میلی‌متر از این آلیاژ تهیه شد. ترکیب شیمیایی ورق توسط ارزیابی کوانتومتری شناسایی و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج با ترکیب استاندارد این آلیاژ تطابق بالایی دارد [۱۳].

در این تحقیق از نانولوله‌های کربنی چند جداره<sup>۷</sup> با خلوص بالاتر از ۹۵ درصد، قطر خارجی ۳۰-۲۰ نانومتر، قطر داخلی ۱۰-۵ نانومتر، طول ۳۰-۱۰ میکرومتر، مساحت ویژه ۱۱۰ متر مربع بر گرم و تولیدی به روش سنتز بخار شیمیایی<sup>۸</sup> استفاده شد. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۹</sup> این نانولوله‌ها در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. پین مورد

با توجه به آنچه که بیان شد، تاکنون به‌طور کامل و جدی به بررسی کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژ AZ۳۱B همراه با نانولوله‌های کربنی پرداخته نشده است. از این‌رو در این تحقیق به بهینه‌سازی خواص سایشی و سختی کامپوزیت آلیاژ منیزیم AZ۳۱B با نانولوله‌های کربنی پرداخته شده و تأثیر چهار پارامتر سرعت پیشروی ابزار، سرعت چرخش ابزار، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و تعداد پاس‌ها بر روی دو خاصیت مقاومت به سایش و سختی مورد بررسی قرار گرفت. تمام تحلیل‌ها به‌صورت کمی، آماری و همراه با ارزیابی واریانس<sup>۶</sup> و با استفاده از روش طراحی آزمایشات رویه پاسخ و زیر مجموعه D-Optimal انجام گرفته و سرانجام مشخصه‌یابی نمونه‌های بهینه انجام شد.



(ب)



(الف)

شکل ۲- الف) نمونه کشش استخراج شده از قطعات و ب) شماتیک دستگاه پانچ برشی

دو درجه و جهت چرخش بین راست گرد انتخاب شد، چرا که با استفاده از جهت چرخش بین چپ گرد، قطعه دچار عیب تونلی می‌شد.

برای بررسی ریزساختار محلول اچ با ترکیب ۴/۲ گرم پیکریک اسید، ۱۰ میلی‌لیتر استیک اسید، ۷۰ میلی‌لیتر اتانول و ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. تصویربرداری توسط میکروسکوپ نوری (Nikon Epiphot ۳۰۰) و ریزسختی سنجی به روش ویکرز با بار ۲۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۲۰ ثانیه (Buehler Micromet ۵۱۰۱) انجام شد. از هر نمونه ۱۱ سختی در منطقه سطح ناگت به دست آمد که مقدار میانگین آن گزارش شد. برای مشخص شدن گرادیان سختی (از فلز پایه تا ناگت)، آزمایش ریزسختی از مقطع عرضی نمونه با فاصله یک میلی‌متر از سطح انجام گرفت. جهت بررسی سطوح شکست ناگت، نمونه‌هایی مطابق با شکل (۲-الف) آماده‌سازی شد. در ادامه جهت بررسی خواص برشی، آزمون پانچ برشی بر روی نمونه‌های استخراج شده از ناگت به ضخامت ۸۰۰ میکرومتر انجام گرفت. نرخ برش برابر با ۰/۰۰۴ میلی‌متر بر ثانیه، قطر پانچ سه میلی‌متر و لقی بین پانچ و قالب در حدود ۱۵ تا ۲۰ میکرومتر بود. شماتیک دین دستگاه را می‌توان در شکل (۲-ب) مشاهده کرد آزمایش سایش خشک با استفاده از دستگاه پین بر روی دیسک<sup>۱</sup> به صورت چرخشی انجام شد. جنس پین از فولاد سخت شده ۵۲۱۰۰ AISI بود. قبل از انجام

استفاده از جنس فولاد گرم کار AISI H۱۳ (معادل DIN 1.2344) انتخاب شد و پس از آماده‌سازی و عملیات حرارتی سخت کاری استاندارد [۱۴]، سختی آن به حدود ۴۵ HRC رسید. قطر بخش انتهایی ابزار ۱۵ میلی‌متر، قطر شانه ابزار ۱۸ میلی‌متر، ارتفاع پین پنج میلی‌متر، قطر پین شش میلی‌متر و گام پیچ در پین برابر با یک میلی‌متر انتخاب شده و جهت چرخش گام پین به سمت راست در نظر گرفته شد. علت استفاده از پین پیچ‌دار، ایجاد اغتشاش و سیلان بیشتر ماده در حین فرایند براساس تحقیقات قبلی بود [۳، ۱۵ و ۱۶]. دستگاه مورد استفاده یک دستگاه فرز بهینه شده بود و نمونه توسط یک نگهدارنده محکم نگه داشته می‌شد.

قبل از شروع هر آزمایش، سطح نمونه به خوبی با استفاده از الکل و استون تمیزکاری و چربی زدایی شدند. سپس نانولوله‌ها در داخل دو شیار سراسری به عرض یک میلی‌متر و عمق چهار میلی‌متر قرار می‌گرفتند (شکل (۱-ب)). برای بستن شیار و ممانعت از خروج نانولوله‌ها کربنی در مرحله فرایند اصطکاکی اغتشاشی، از ابزاری بدون پین با سرعت پیشروی ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ۸۷۰ دور بر دقیقه استفاده شد. همچنین جهت خنک‌کاری از هوای فشرده استفاده گردید. در برخی از منابع، استفاده از یک سیستم خنک‌کننده منجر به بهبود خواص مکانیکی شده است [۱۷-۱۹]. عمق نفوذ شانه ابزار ۰/۱ میلی‌متر، زاویه انحراف ابزار

جدول ۲- پارامترهای انتخاب شده و سطوح آنها در طراحی آزمایشات

پارامتر	مقدار نانولوله (درصد وزنی)	سرعت پیشروی (میلی متر بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	تعداد پاسها
محدوده	A	B	C	D
محدوده پایینی (-۱)	۱	۲۴	۶۶۰	۲
محدوده بالایی (+۱)	۴	۴۴	۸۷۰	۳

بودن در مدل، تکرارپذیری، کاهش خطاهای سیستماتیک و انسانی [۲۱] و ایجاد درجه‌های آزادی<sup>۱۴</sup> اضافی برای تخمین خطای واریانس، از نقاط میانی<sup>۱۵</sup> استفاده می‌شود که در این تحقیق نیز از سه آزمایش نقطه مرکزی استفاده شد. طراحی آزمایش و نتایج آنها در جدول ۳ نشان داده شده است. شماره استاندارد آزمایش، عددی است که برای ترتیب انجام محاسبات اتخاذ می‌شود و شماره انجام آزمایش، ترتیب انجام دادن آزمایش‌ها است. استفاده از این دو عدد برای تصادفی کردن پاسخ‌ها و تأثیر کمتر پارامترهای اغتشاشی می‌باشد [۱۲]. از آنجایی که دستگاه فرز مورد استفاده در این تحقیق به صورت دنده‌ای بود، لذا پارامترهای سرعت پیشروی و سرعت چرخش همانند تعداد پاس‌ها به صورت پارامترهای کیفی در نظر گرفته شدند و تنها پارامتر کمی، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بود.

مدل‌سازی بر روی دو پاسخ سختی منطقه ناگت و میزان کاهش وزن در آزمون سایش بوده و محدوده اطمینان<sup>۱۶</sup> مدل‌سازی برابر با ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است [۱۲]. مدل ارائه شده برای هر پاسخ و مباحث مربوطه به شرح زیر است:

#### - مدل‌سازی سختی ناگت

مدل کلی براساس حالت کد گذاری شده (+۱ تا -۱) به صورت زیر است:

$$\text{Hardness of Nugget (HV)} = +۷۶/۸۸ + ۸/۹۲ \times A - ۰/۵۱ \times B - ۱/۶۰ \times C + ۱/۲۸ \times D - ۲/۵۷ \times A \times B - ۲/۲۸ \times A \times D - ۶/۲۰ \times A^2 \quad (۱)$$

در این مدل سختی براساس ویکرز و پارامترهای A، B، C و D به ترتیب نشانگر درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، سرعت

آزمایش سایش، زبری سطح نمونه‌ها یکسان‌سازی گردید. برای هر نمونه دو بار آزمون سایش در ۵۰۰ مترانجام و از مجموع دو عدد میانگین گرفته می‌شد. شایان ذکر است که قبل از انتخاب بار مناسب، آزمون بارپذیری انجام گرفت. سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه و بار ۲۰ نیوتون به عنوان شرایط آزمون سایش انتخاب شدند. همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل MIRA<sup>۳</sup> TESCAN و ارزیابی عنصری آزمون طیفسنجی تفریق انرژی<sup>۱۱</sup> (EDS) جهت بررسی سطوح شکست استفاده گردید.

همان‌طور که بیان شد، در این تحقیق از روش طراحی آزمایش استفاده شد. طراحی آزمایش، ارزیابی آماری، مدل‌سازی و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار Design Expert Version 7.0.0 (DXV) انجام شد. پارامترهای انتخاب شده و سطوح آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.

پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج به دست آمده وارد نرم‌افزار شد. خروجی نرم‌افزار، جدول ارزیابی واریانس، مدل ریاضی و پیشنهاد آزمایش تأییدیه<sup>۱۲</sup> بود. با استفاده از جدول ANOVA میزان تأثیر هر عامل بر پاسخ مشخص و تعیین و فرایند، مدل‌سازی و بهینه‌سازی گردید. سپس آزمایش تأییدیه انجام گرفته و نتیجه آن با پیش‌بینی مدل مقایسه شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از طراحی آزمایش

در این تحقیق از روش سطح پاسخ و زیر مجموعه D-Optimal استفاده شد. آزمایش‌ها به حالت تصادفی انجام شد تا تأثیر عوامل غیرقابل کنترل بر فرایند، کمتر شود [۲۰]. معمولاً برای افزایش دقت مدل، بررسی انحنا<sup>۱۳</sup> و غیرخطی

جدول ۳- استاندارد طراحی آزمایش‌ها، شرایط آزمایش‌ها و نتایج آنها براساس روش سطح پاسخ

شماره استاندارد	شماره انجام آزمایش	درصد وزنی نانولوله کربنی	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	تعداد پاس‌ها	سختی ناگت (ویکرز)	کاهش وزن ساییش (میلی‌گرم)
۱	۶	۲/۵	۲۴	۸۷۰	۲	۷۲/۰	۱۲/۳
۲	۳	۱/۰	۴۴	۶۶۰	۳	۶۹/۳	۱۴/۰
۳	۱	۴/۰	۲۴	۶۶۰	۲	۸۴/۵	۱۰/۳
۴	۹	۲/۵	۴۴	۸۷۰	۳	۷۴/۵	۱۰/۶
۵	۱۰	۱/۰	۲۴	۶۶۰	۲	۵۶/۵	۱۰/۰
۶	۱۴	۳/۰	۲۴	۶۶۰	۳	۸۳/۰	۱۱/۳
۷	۴	۴/۰	۴۴	۶۶۰	۳	۷۹/۵	۱۱/۵
۸	۱۱	۴/۰	۲۴	۸۷۰	۳	۸۰/۶	۱۰/۵
۹	۵	۲/۵	۴۴	۶۶۰	۲	۷۷/۳	۱۳/۰
۱۰	۱۶	۱/۰	۲۴	۸۷۰	۳	۶۱/۸	۸/۸
۱۱	۱۲	۱/۰	۴۴	۸۷۰	۲	۵۸/۷	۱۰/۱
۱۲	۱۵	۳/۵	۴۴	۸۷۰	۲	۷۹/۰	۱۱/۴
۱۳	۱۳	۱/۵	۴۴	۶۶۰	۲	۶۹/۹	۱۰/۰
۱۴	۱۷	۲/۵	۲۴	۸۷۰	۳	۸۰/۹	۱۰/۶
۱۵	۱۸	۲/۰	۲۴	۸۷۰	۲	۶۹/۷	۱۰/۲
۱۶	۷	۴/۰	۲۴	۶۶۰	۲	۸۴/۵	۹/۹
۱۷	۲	۲/۵	۴۴	۸۷۰	۳	۷۲/۶	۱۲/۲
۱۸	۸	۴/۰	۴۴	۶۶۰	۳	۷۴/۶	۸/۹

مقدار نانولوله‌های کربنی است، چرا که دارای بالاترین مجموع مربعات بوده و با هر دو توان یک و دو ظاهر شده است. از طرفی، مشاهده می‌شود که مقدار مجموع مربعات عدم برازش<sup>۱۹</sup> و میزان احتمال تأثیر آن پایین می‌باشد. نکته‌ای که بایستی به آن دقت کرد تأثیر پایین سرعت پیشروی (پارامتر B) است اما با این حال در مدل‌سازی ارائه شده است. حضور این پارامتر در مدل به موضوع تسلسل مراتب برمی‌گردد [۱۲]. زیرا با توجه به حضور پارامتر AB در مدل، بهتر است پارامتر B نیز در مدل حضور داشته باشد. خطای خالص آزمایش‌ها نیز پایین گزارش شده است که بیانگر تکرارپذیری خوب نتایج می‌باشد. همچنین ضریب همبستگی برای این مدل برابر با ۰/۹۵۰۱ می‌باشد. مقدار F (آزمون فیشر)<sup>۲۰</sup> مدل برابر با ۲۷/۲۲ بوده که حاکی از مدلی معنی‌دار است. برطبق آزمایش فیشر، عدد مقدار F در مراجع

پیشروی، سرعت چرخش و تعداد پاس‌ها می‌باشند. همچنین به دلیل کمی بودن سه پارامتر (B، C و D) محدوده پارامترها بایستی به صورت کد شده یعنی از -۱ تا +۱ در مدل قرار گیرد. با توجه به علائم پشت اعداد، پارامترهای A و D تأثیر هم افزا<sup>۱۷</sup> و پارامترهای C، AB، AD و A<sup>۲</sup> تأثیر کم افزا<sup>۱۸</sup> دارند. به دلیل اینکه این مدل در حالت کد شده ارائه شده است، مقدار اعداد پشت هر پارامتر بیانگر میزان تأثیرگذاری آن عامل بر پاسخ است. از این رو می‌توان گفت عوامل A و A<sup>۲</sup> مؤثرتر از بقیه عوامل هستند. جدول ۴، اطلاعات ارزیابی واریانس این مدل را نشان می‌دهد.

براساس نتایج (جدول ۴) می‌توان گفت که مدل ارائه شده با احتمال بیش از ۹۹ درصد معنی‌دار است بدین معنی که به احتمال بیش از ۹۹ درصد رفتار پاسخ از مدل ارائه شده تبعیت می‌نماید. همچنین مؤثرترین فاکتور این مدل،

جدول ۴- نتایج آزمون آماری ANOVA برای مدل سختی ناگت

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آزمون فیشر (مقدار F)	احتمال (مقدار P)
مدل	۱۱۵۱/۰۰	۷	۱۶۴/۴۳	۲۷/۲۲	<۰/۰۰۰۱
مقدار نانولوله‌های کربنی (A)	۷۴۸/۹۳	۱	۷۴۸/۹۳	۱۲۳/۹۶	<۰/۰۰۰۱
سرعت پیشروی (B)	۴/۲۶	۱	۴/۲۶	۰/۷۱	۰/۴۲۰۷
سرعت چرخش (C)	۳۶/۹۹	۱	۳۶/۹۹	۶/۱۲	۰/۰۳۲۹
تعداد پاس‌ها (D)	۲۶/۹۴	۱	۲۶/۹۴	۴/۴۶	۰/۰۶۰۹
AB	۶۰/۸۷	۱	۶۰/۸۷	۱۰/۰۷	۰/۰۰۹۹
AD	۴۷/۷۹	۱	۴۷/۷۹	۷/۹۱	۰/۰۱۸۴
A <sup>۲</sup>	۱۲۲/۲۸	۱	۱۲۲/۲۸	۲۰/۲۴	۰/۰۰۱۱
باقی‌مانده	۶۰/۴۲	۱۰	۶/۰۴		
عدم برازش	۴۶/۶۱	۷	۶/۶۶	۱/۴۵	۰/۴۱۴۳
خطای خالص	۱۳/۸۱	۳	۴/۶۰		
مجموع کل	۱۲۱۱/۴۲	۱۷			

جدول ۵- نتایج آزمون آماری ANOVA برای مدل کاهش وزن در آزمایش سایش

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آزمون فیشر (مقدار F)	احتمال (مقدار P)
مدل	۱۸/۲۱	۶	۳/۰۴	۲/۵۵	<۰/۰۰۰۱
سرعت پیشروی (B)	۱/۶۸	۱	۱/۶۸	۱/۴۲	۰/۴۲۰۷
سرعت چرخش (C)	۱/۵۵	۱	۱/۵۵	۱/۳۱	۰/۰۳۲۹
تعداد پاس‌ها (D)	۵/۵۵	۱	۵/۵۵	۴/۶۷	۰/۰۶۰۹
AB	۳/۹۱	۱	۳/۹۱	۳/۲۹	۰/۰۰۹۹
AD	۳/۰۲	۱	۳/۰۲	۲/۵۴	۰/۰۱۸۴
A <sup>۲</sup>	۳/۵۰	۱	۳/۵۰	۲/۹۴	۰/۰۰۱۱
باقی‌مانده	۱۳/۰۷	۱۱	۱/۱۹		
عدم برازش	۸/۳۳	۸	۱/۰۴	۰/۶۶	۰/۴۱۴۳
خطای خالص	۴/۷۴	۳	۱/۵۸		
مجموع کل	۳۱/۲۸	۱۷			

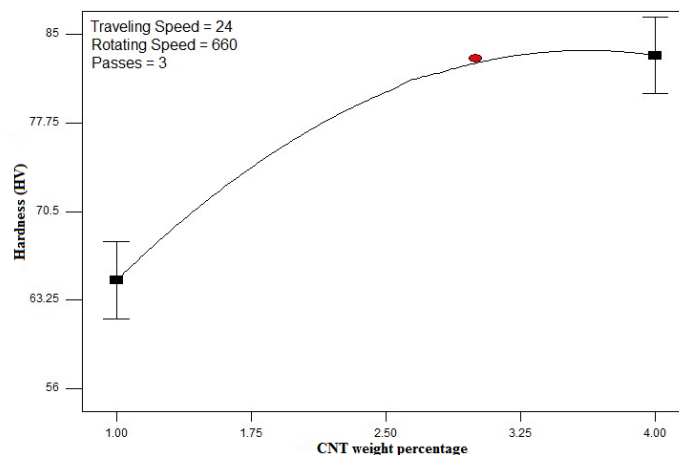
با توجه به علائم پشت اعداد، پارامترهای B و AC تأثیر هم افزا و پارامترهای C، AD، CD و A<sup>۲</sup> تأثیر کم افزا دارند. با توجه به بزرگی اعداد پشت هر عامل، می‌توان گفت که A<sup>۲</sup> مؤثرترین عامل است. جدول ۵، ارزیابی واریانس این مدل را نشان می‌دهد. نکته قابل تأمل در این مدل عدم وجود پارامتر A به صورت خطی است. به عبارتی می‌توان گفت تأثیر مقدار نانولوله‌های کربنی تنها رابطه توان دوم با پاسخ (کاهش وزن) دارد. با توجه به p-value مدل، می‌توان گفت که مدل ارائه شده برای هر دو پاسخ، با احتمال بیشتر از ۹۹ درصد معنی‌دار است. به علاوه

برای (۱۰ و ۷) F برابر با ۳/۱۳۵ گزارش شده است [۱۲]. درجه آزادی مدل و باقی‌مانده‌ها به ترتیب برابر با هفت و ده می‌باشد. تفاضل بسیار زیاد بین مقدار F مدل و کمترین F مجاز، بیانگر قدرت مدل است.

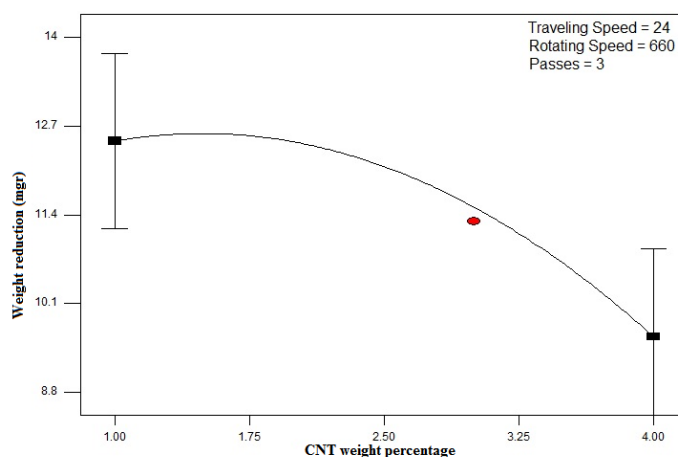
#### - مدل‌سازی کاهش وزن در آزمایش سایش

مدل کلی براساس حالت کد شده (۱+ تا ۱-) به صورت زیر است:

$$\text{Weight Loss (mg)} = +11.67 + 0.32 \times B - 0.32 \times C + 0.78 \times A \times C - 0.65 \times A \times D - 0.44 \times C \times D - 1.06 \times A^2 \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل ۳- (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی غیرخطی رابطه درصد وزنی نانولوله با: الف) سختی ناگت و ب) کاهش وزن ناگت در آزمون سایش

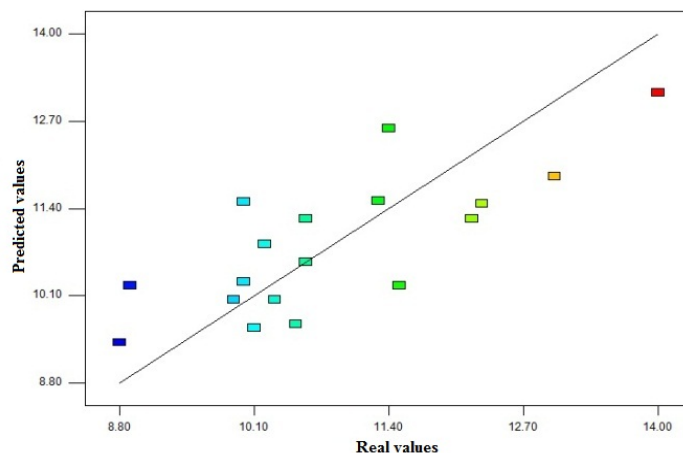
نانولوله‌های کربنی) با پاسخ‌ها ارائه شده است. مشاهده می‌شود که هر دو رابطه حالت منحنی وار داشته و با توجه به مدل، پاسخ‌ها با درجه دوم مقدار نانولوله‌های کربنی رابطه دارند. علاوه بر این نقاط قرمز موجود در نمودارها بیانگر تطابق آزمایش‌ها بر روی مدل است. با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، سختی ناگت افزایش و میزان افت وزن آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی منجر به بهبود هر دو خاصیت مکانیکی سطحی شده است. با دقت در تصویر (۳-الف) می‌توان

معنی‌دار نبودن عدم برازش حاکی از تأثیر پایین عوامل مخمل (نویز) و قوی بودن مدل است. مقدار  $F$  (آزمون فیشر) مدل برابر با  $2/55$  است که حاکی از مدلی معنی‌دار می‌باشد. برطبق آزمایش فیشر، عدد مقدار  $F$  در مراجع برای  $F(6,11)$  برابر با  $2/389$  می‌باشد [۱۲]. با این حال بهترین راه محک زدن مدل، مقایسه نتایج مدل شده با نتایج واقعی و انجام آزمون تأییدیه بود.

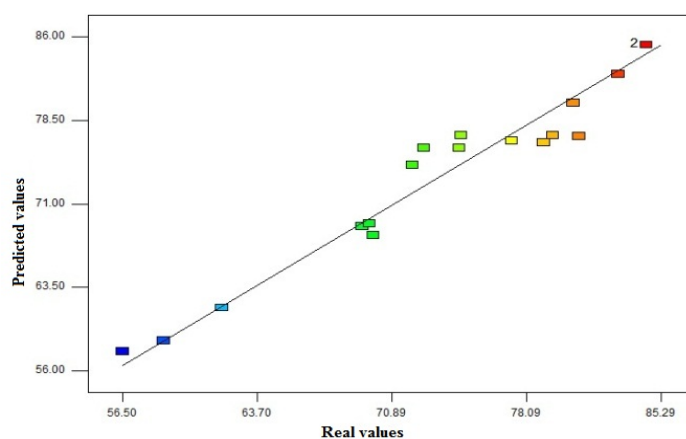
### ۳-۲- مقایسه‌های آماری و دلایل متالورژیکی

در شکل (۳) منحنی غیرخطی پارامتر  $A$  (درصد وزنی





(الف)



(ب)

شکل ۴- (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برای: الف) سختی ناگت و ب) کاهش وزن نمونه سایش

در شکل (۴) تصاویر مقادیر واقعی و مقادیر مدل شده برای هر پاسخ مشخص شده است. خط راست با زاویه ۴۵ درجه، بیانگر مدل و نقاط مربعی بیانگر نتایج حاصل از آزمایشات است [۲۲]. هر چه نقاط به خط نزدیک‌تر باشند، قدرت مدل بالاتر خواهد بود. جدول ۶ مقدار عددی مقادیر حاصل از آزمایشات و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد. با دقت در این اعداد می‌توان دقت بالای مدل‌سازی را تأیید کرد.

#### – آزمایش تأییدیه

در مرحله بعد از مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری، بایستی

گفت که شیب بهبود سختی از مقدار سه درصد وزنی نانولوله‌های کربنی کاهش یافته و تغییر محسوس نداشت است. اما در مورد کاهش وزن، موضوع برعکس بوده و با افزایش میزان نانولوله‌های کربنی شیب افت وزن، افزایش یافته است. می‌توان احتمال داد که در مقادیر بالاتر از سه درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، مکانیزم استحکام بخشی تغییر کرده و از این‌رو شیب افزایش سختی کاهش و شیب افت وزن، افزایش یافته است. با این حال با توجه به شیب نمودار سختی می‌توان گفت که اگر مقدار نانولوله‌های کربنی بیشتر از مقدار ذکر شده شود، احتمال افزایش محسوس سختی کمتر است.

جدول ۶- مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برای سختی ناگت (ویکرز) و کاهش وزن نمونه سایش (میلی گرم)

شماره استاندارد آزمون	مقدار پیش‌بینی شده سختی	مقدار واقعی سختی	مقدار پیش‌بینی شده کاهش وزن	مقدار واقعی کاهش وزن
۱	۷۴/۵۱	۷۲/۰	۱۱/۴۷	۱۲/۳
۲	۶۸/۹۸	۶۹/۳	۱۳/۱۲	۱۴/۰
۳	۸۵/۲۹	۸۴/۵	۱۰/۰۴	۱۰/۳
۴	۷۶/۰۵	۷۴/۵	۱۱/۲۴	۱۰/۶
۵	۵۷/۷۴	۵۶/۵	۱۰/۳۱	۱۰/۰
۶	۸۲/۶۵	۸۳/۰	۱۱/۵۱	۱۱/۳
۷	۷۷/۱۳	۷۹/۵	۱۰/۲۶	۱۱/۵
۸	۸۰/۰۸	۸۰/۶	۹/۶۷	۱۰/۵
۹	۷۶/۷۰	۷۷/۳	۱۱/۸۸	۱۳/۰
۱۰	۶۵/۶۱	۶۱/۸	۹/۴۰	۸/۸
۱۱	۵۸/۶۶	۵۸/۷	۹/۶۲	۱۰/۱
۱۲	۷۶/۵۰	۷۹/۰	۱۲/۶۰	۱۱/۴
۱۳	۶۸/۱۹	۶۹/۹	۱۱/۵۰	۱۰/۰
۱۴	۷۷/۰۶	۸۰/۹	۱۰/۶۰	۱۰/۶
۱۵	۶۹/۲۳	۶۹/۷	۱۰/۸۷	۱۰/۲
۱۶	۸۵/۲۹	۸۴/۵	۱۰/۰۴	۹/۹
۱۷	۷۶/۰۵	۷۲/۶	۱۱/۲۴	۱۲/۲
۱۸	۷۷/۱۳	۷۴/۶	۱۰/۲۶	۸/۹

جدول ۷- نتایج پیش‌بینی آزمایش بهینه و محدوده آنها به همراه نتایج واقعی آزمایش بهینه

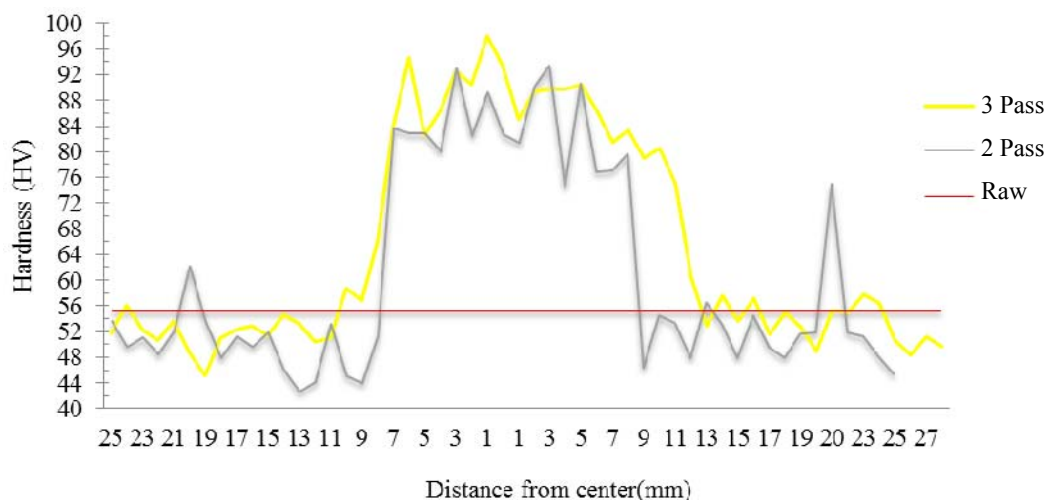
نتایج	سختی ناگت نمونه ۲ پاسه (ویکرز)	کاهش وزن نمونه ۲ پاسه (میلی گرم)	سختی نمونه ۳ پاسه (ویکرز)	کاهش وزن نمونه ۳ پاسه (میلی گرم)
پیش‌بینی پاسخ‌ها	۸۵/۳	۱۰/۰	۸۳/۳	۹/۶
محدوده پیش‌بینی پاسخ‌ها	۸۱/۷-۸۸/۹	۸/۶-۱۱/۵	۷۹/۲-۸۷/۴	۸/۰-۱۱/۲
نتایج واقعی	۸۵/۲	۱۱/۵	۸۴/۹	۱۰/۲
درصد خطا از مقدار پیش‌بینی شده (درصد)	۱/۹	۱۵/۰	۰/۱	۶/۳

همچنین مقادیر خطای سختی بسیار کم و منطقی می‌باشد. در مورد خطای مقادیر واقعی کاهش وزن هم می‌توان گفت که در محدوده اطمینان قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج آزمایش سه پاسه بهتر و منطقی‌تر بوده و از این‌رو به عنوان حالت بهینه نهایی انتخاب شد.

### ۳-۳- مشخصه‌یابی نمونه‌های بهینه

روند تغییرات سختی نمونه‌های بهینه دو و سه پاسه در

بهینه‌سازی و صحت مدل بررسی شود [۱۲]. لذا بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار انجام شده و دو آزمایش برای بررسی صحت مدل انتخاب شدند. شرایط این دو آزمایش عبارت بود از سرعت پیشروی ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت چرخش ۶۶۰ دور بر دقیقه، ۴ درصد وزنی نانولوله کربنی و تعداد پاس‌های دو و سه. با دقت در جدول ۷ می‌توان گفت که تمام نتایج واقعی در محدوده اطمینان قرار گرفته‌اند. به علاوه با دقت در خطای مدل سختی، می‌توان مدل‌سازی این بخش را قوی‌تر اعلام کرد.



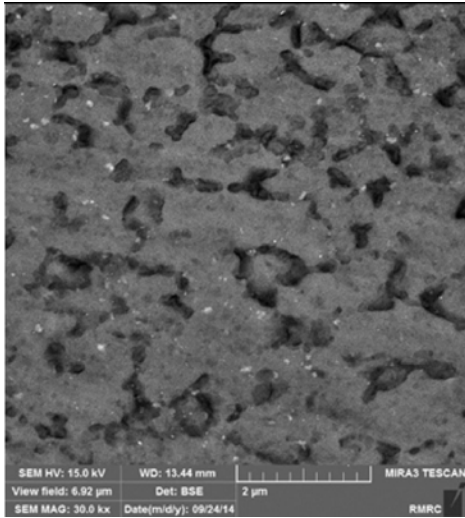
شکل ۵- (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار تغییرات سختی در نمونه‌های بهینه دو و سه پاسه به همراه سختی نمونه خام

جهت مقایسه ارائه شده است. رشد زیاد دانه‌ها در منطقه متاثر از حرارت به دلیل گرمای بالای ناشی از اصطکاک در حین فرایند است. شکل (۶-د) مناطق دورتر از منطقه متاثر از حرارت در فلز پایه را نشان می‌دهد. مناطق تبلور مجدد یافته و دانه‌های جدید در این تصویر قابل رویت هستند (مثل مناطق داخل دایره‌ها).

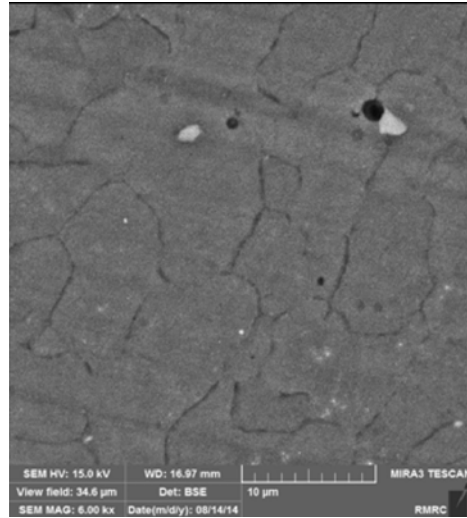
در ادامه شکست نگاری<sup>۲۲</sup> بر روی سطوح شکست حاصل از آزمایش کشش بر روی نمونه بهینه و خام انجام شد (شکل ۷). با دقت در شکل (۷-الف)، به‌خصوص بزرگ‌نمایی چهار هزار برابر و با توجه به دیمپل‌های موجود در سطح شکست، می‌توان گفت که شکست غالب در نمونه خام به‌صورت نرم می‌باشد [۴۸]. در بزرگ‌نمایی بالاتر به‌خوبی می‌توان مرز دانه‌ها را دید. اگرچه مشاهده سطوح شکست در این بزرگ‌نمایی‌های بالا چندان رایج نیست، اما به جهت مقایسه با نمونه‌های فرایند اصطکاکی اغتشاشی شده بهینه، این تصاویر ارائه شد. در شکل (۷-ب) سطح شکست نمونه بهینه دارای نانولوله‌های کربنی در دو بزرگ‌نمایی ارائه شده است. در هر دو بزرگ‌نمایی، سطح شکست این نمونه متفاوت از سطح شکست نمونه خام است. در بزرگ‌نمایی پایین نمی‌توان حالت شکست ترد یا نرم را به این نمونه نسبت داد اما در بزرگ‌نمایی‌های بالا می‌توان دیمپل‌ها

شکل (۵) نشان داده شده است. سختی نمونه خام برابر با ۵۵/۲ ویکرز بوده و به‌صورت یک خط ممتد نشان داده شده است. تبلور مجدد در منطقه اغتشاش منجر به ایجاد دانه‌های ریز و هم‌محور می‌شود. با توجه به افت سختی، منطقه متاثر از حرارت<sup>۲۱</sup> حاوی دانه‌های درشت‌تری بوده و فقط تعداد محدودی از آنها تبلور مجدد یافته‌اند. در نتیجه در این منطقه هم تبلور مجدد دینامیک رخ می‌دهد، اما به دلیل عدم تغییر شکل پلاستیک کامل، فرایند تبلور مجدد به‌صورت ناکامل انجام می‌شود [۲۳].

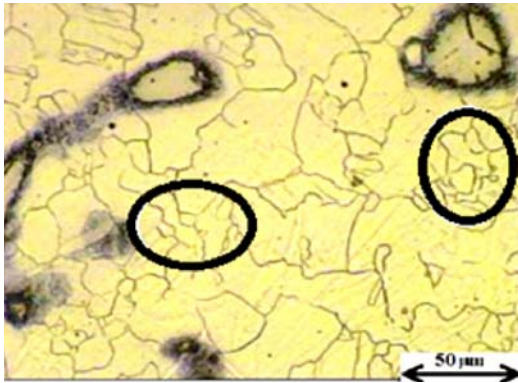
در شکل (۶) تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های بهینه سه پاسه شکل (۶-الف) و نمونه فرایند اصطکاکی اغتشاشی شده تک پاسه بدون پرکننده شکل (۶-ب) ارائه شده است. تصاویر نشان می‌دهد که دانه‌بندی نمونه بدون پرکننده در حدود ۱۵-۱۰ میکرومتر است در حالی که نمونه فرایند اصطکاکی اغتشاشی شده دارای دانه‌بندی بسیار ریزتر در حدود ۳-۱ میکرومتر است. شایان ذکر است که دانه‌بندی نمونه خام در حدود ۲۰ میکرومتر می‌باشد. ریزدانه‌گی ایجاد شده در این نمونه بهینه منجر به افزایش سختی و بهبود خواص مکانیکی آن شده است. در شکل (۶-ج) منطقه فصل مشترک، اغتشاش و منطقه متاثر از حرارت نمونه بهینه



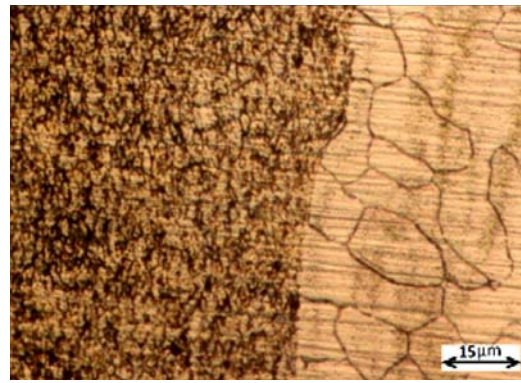
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی نوری از: الف) نمونه حاصل از فرایند اصطکاکی اغتشاشی تک پاسه بدون پرکننده، ب) نمونه کامپوزیتی حاصل از فرایند اصطکاکی اغتشاشی بهینه، ج) مناطق مختلف نمونه بهینه و د) منطقه متأثر از حرارت در نمونه بهینه

نتایج آزمون پانچ برشی در جدول ۸ نشان داده شده است. برای مقایسه این آزمایش با آزمایش کشش به یک ضریب تصحیح نیاز است. در مورد ضریب تصحیح باید گفت که با توجه به مطالعات دیگر محققان [۲۴ و ۲۵] تنش برشی و تنش کششی مطابق با معادله زیر با استفاده از یک ضریب ثابت، به یکدیگر مربوط می‌شوند:

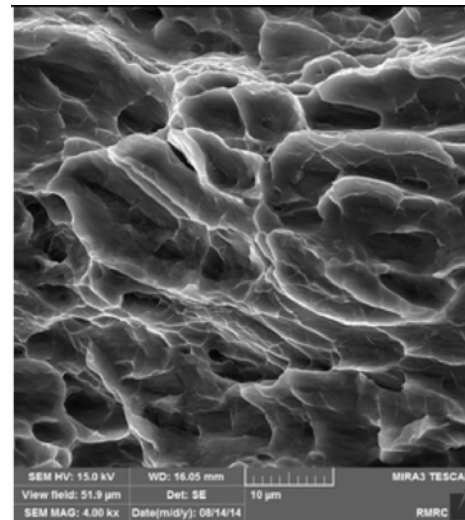
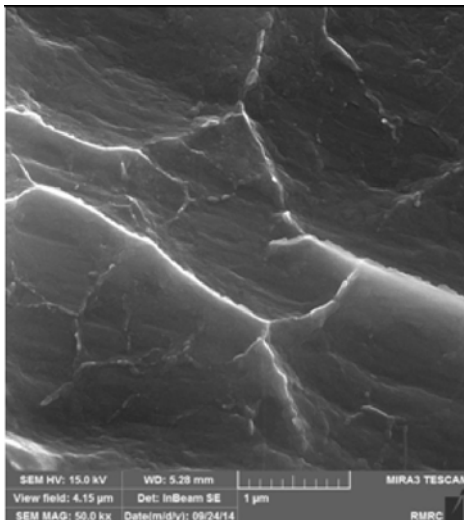
$$\sigma = C\tau \quad (۳)$$

جایی که  $\sigma$  تنش کششی،  $\tau$  تنش برشی و  $C$  ضریب تصحیح است.  $C$  عددی بدون بعد است. این عدد برای استحکام کششی نهایی ( $\sigma_{US}$ ) و استحکام برشی نهایی ( $\tau_{US}$ ) در حدود

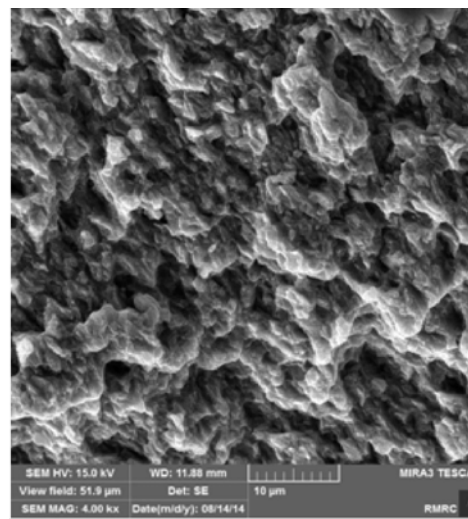
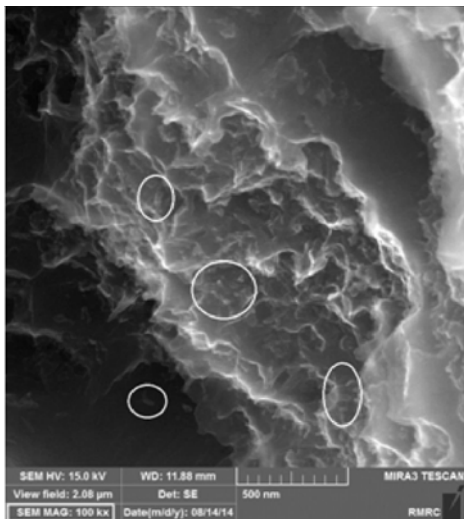
را به خوبی مشاهده کرد. ریزتر شدن دیمپل‌ها را می‌توان به ریزدانه شدن نمونه پس از فرایند نسبت داد. در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ هزار برابر، لوله‌های شکسته شده نانولوله‌های کربنی در سطح شکست جستجو گردیده و مناطق مشابه داخل دایره‌ها، احتمالاً نانولوله‌هایی هستند که در حین کشش، شکسته شده و از داخل زمینه بیرون زده‌اند. به علاوه یک ارزیابی آزمون طیف سنجی تفرق انرژی (EDS) از زمینه گرفته شد تا زیاده‌تر بودن مقدار کربن را تأیید کند (منیزیم ۹۲/۵۱ درصد، آلومینیوم ۱/۰۸ درصد، اکسیژن ۰/۷۲ درصد، کربن ۵/۶۸ درصد).

جدول ۸- نتایج آزمایش پانچ برشی: تنش برشی نهایی و ازدیاد طول در منطقه اغتشاش و HAZ

میانگین ازدیاد طول HAZ در (درصد)	میانگین استحکام برشی در HAZ (مگاپاسگال)	میانگین ازدیاد طول در SZ (درصد)	میانگین استحکام برشی در SZ (مگاپاسگال)	مشخصه	نمونه
$34/0 \pm 1/0$	$146/6 \pm 4/9$	$40/3 \pm 1/2$	$160/3 \pm 3/5$	خام	بهینه حاوی نانولوله کربنی



(الف)



(ب)

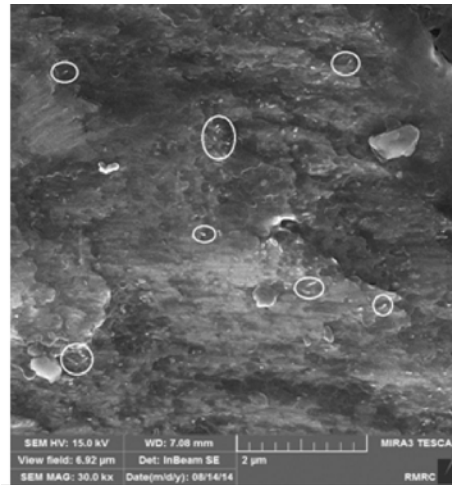
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی از سطح شکست در بزرگ‌نمایی‌های مختلف برای: (الف) نمونه خام و (ب) نمونه بهینه حاوی نانولوله‌های کربنی

نتایج دیده می‌شود که استحکام کششی نهایی نمونه بهینه دارای نانولوله‌های کربنی در حدود ۴۰ مگاپاسگال بهبود یافته است.

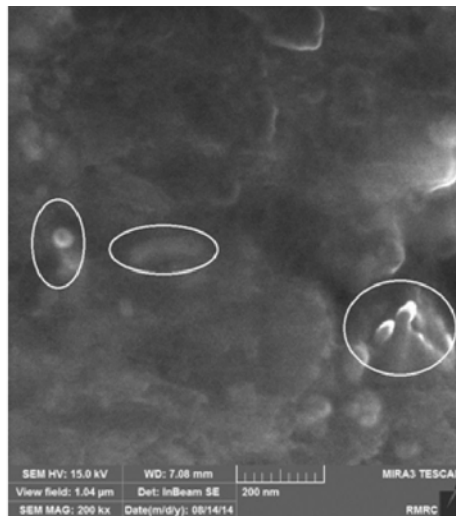
محاسبه شد و با به دست آمدن ضریب C، استحکام نهایی کششی دیگر نمونه‌ها به دست آمد که در جدول ۹ گزارش شده‌اند. با مقایسه

جدول ۹- تنش کششی محاسبه شده با استفاده از روابط آزمایش پانچ برشی

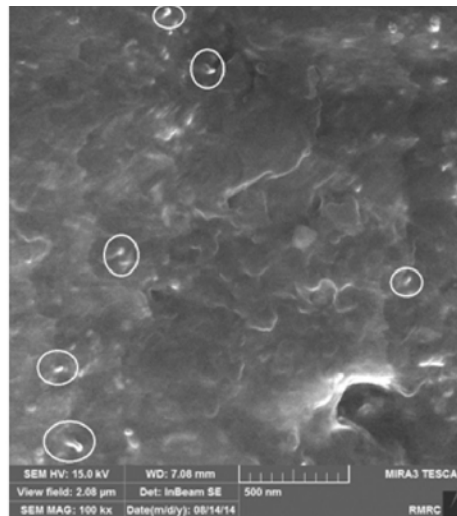
نمونه	خام	حاوی نانولوله کربنی
تنش برشی نهایی حاصل از آزمایش	۱۶۰/۳	۱۹۰/۷
تنش کششی نهایی با محاسبات (مگا پاسگال)	۲۱۴/۹	۲۵۵/۷



(الف)



(ج)

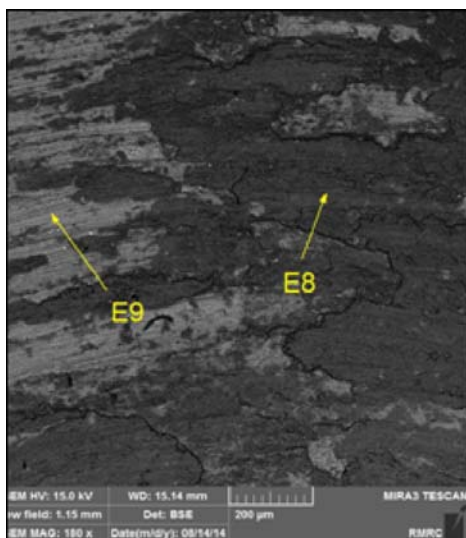


(ب)

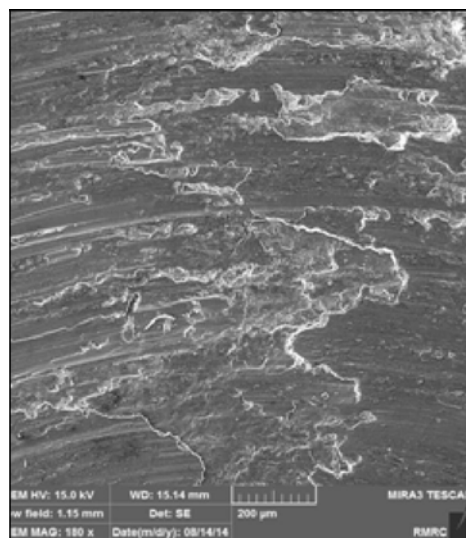
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح برش نمونه بهینه حاوی نانولوله کربنی در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت

از مناطق که حاوی نانولوله هستند مشخص شده و در داخل دایره قرار گرفته‌اند. جهت خروج نانولوله‌ها در جهت برش بوده که موجب بالا بردن استحکام برشی می‌گردد. با دقت در تصویر با بزرگ‌نمایی ۳۰ هزار برابر می‌توان توزیع مناسب نانولوله‌ها را در زمینه مشاهده کرد.

محاسبه ضریب تصحیح:  $1/34 \rightarrow C = 160/3 = C \times 214/9$  است [۲۴]. در این تحقیق، این رابطه بین میانگین استحکام کششی نهایی و میانگین استحکام برشی نهایی برای نمونه خام شکل (۸) تصاویر سطح مقطع برش نمونه بهینه دارای نانولوله‌های کربنی بهینه را نشان می‌دهد. در این تصاویر، برخی



(ب)



(الف)

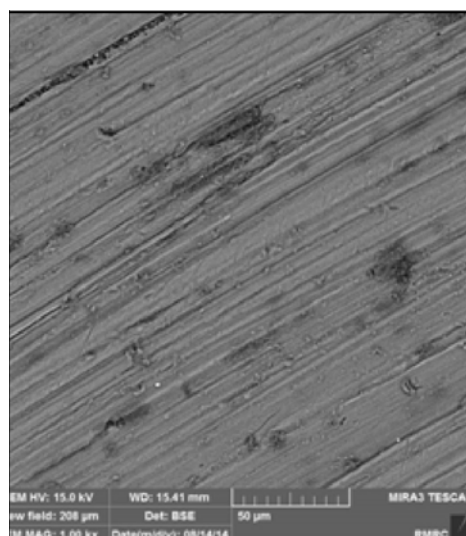
E8

Element	Wt%
Mg	47.51
Al	1.18
O	36.83
C	14.48

E9

Element	Wt%
Mg	76.79
Al	2.23
O	4.08
C	16.90

(د)



(ج)

شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی سطح سایش نمونه بهینه: الف) در حالت الکترون ثانویه (بررسی مورفولوژی)، ب) در حالت الکترون بازگشتی (بررسی توزیع عناصر)، ج) بررسی حالت خراشان سایش و د) نتایج حاصل از طیف سنجی تفرق انرژی نقاط مشخص شده در تصویر (ب)

چسبنده<sup>۲۵</sup> به صورت همزمان در این نمونه عمل کرده‌اند [۲۷]. ارزیابی‌های آزمون طیف سنجی تفرق انرژی (EDS) نشان داده شده در شکل (۹-د) بیانگر اکسند بودن مکانیزم سایش هستند. مقدار اکسیژن در منطقه سیاهرنگ شکل (۹-ب) بسیار بیشتر از منطقه خاکستری رنگ خراشیده شده است. بخش تیره رنگ در شکل (۹-ب) می‌تواند مربوط به ورقه شدن و تجمع محصولات سایش باشد که در اثر مجاورت با هوا به صورت اکسید در آمده و

در شکل (۹) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی سطح سایش نمونه بهینه نشان داده شده است. شکل‌های (۹-الف) و (ب) حالت‌های الکترون ثانویه و الکترون برگشتی را نشان می‌دهند. الکترون ثانویه برای بررسی حالت مورفولوژی سطحی و الکترون بازگشتی برای بررسی توزیع عناصر سطح استفاده می‌شود [۲۶]. با توجه به شکل‌های (۹-الف، ب و ج) می‌توان گفت مکانیزم‌های سایش اکسند<sup>۲۳</sup>، خراشان<sup>۲۴</sup> و

جدول ۱۰- نتایج آزمایش سایش برای نمونه‌های سیکل‌های بهینه طراحی آزمایش

کد نمونه	کاهش وزن نمونه (گرم)	میانگین ضریب اصطکاکها ( $\mu$ )	نیروی اصطکاک (نیوتون)	نرخ سایش ویژه ( $\frac{\text{cm}^3}{\text{N.m}}$ ) <sup>۱۰-۷</sup>
بهینه نانولوله دار ۳ پاره	۰/۰۱۰۲	۰/۲۸۷۲	۵/۷۴۴	۵/۷۶
بهینه نانولوله دار ۲ پاره	۰/۰۱۱۵	۰/۳۰۶۳	۶/۱۲۶	۶/۵۰

\*هر کدام از ضریب اصطکاکها حاصل میانگین کل ضریب اصطکاکهای لحظه‌ای در مسافت پیموده شده است.

محاسبات، نرخ سایش ویژه برای سه نمونه بهینه در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی کامپوزیت‌سازی سطحی آلیاژ منیزیم AZ۳۱B با نانولوله‌های کربنی به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شد. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت چرخش، سرعت پیشروی، تعداد پاس‌ها و کسر وزنی نانولوله‌های کربنی بودند. همچنین پاسخ‌های مورد بررسی، سختی منطقه ناگت و کاهش وزن نمونه بود.

از روش طراحی آزمایش و زیر مجموعه روش رویه پاسخ استفاده شد. نتایج مدل‌سازی به خوبی با نتایج واقعی در تطابق و حاکی از قدرت بالای آن بود. از ارزیابی واریانس در مدل‌سازی استفاده شد.

شرایط بهینه با سختی ناگت ۸۴/۹ و کاهش وزن ۱۰/۲ میلی‌گرم عبارت بود از: ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه، ۶۶۰ دور بر دقیقه، ۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و ۳ پاس.

تصاویر میکروسکوپی نوری نشان داد که دانه‌های نمونه پس از فرایند به خوبی اصلاح شده و در منطقه متأثر از حرارت رشد دانه رخ داده است.

شکست‌نگاری سطوح کشش و برش توزیع همگن نانولوله‌های کربنی در زمینه و افزایش خواص کششی و برشی را تأیید کرد. همچنین استحکام برشی در حدود ۲۰ درصد افزایش یافت.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی بیانگر تأثیر هم‌زمان سه مکانیزم سایش اکسیداسیونی، چسبنده و

در اینجا مکانیزم سایش اکسند، عمل کرده است [۲۸]. چسبنده بودن لایه‌های اکسیدی را نیز می‌توان از مقایسه دو شکل (۹- الف و ب) متوجه شد. با توجه به شکل (۹- ج) که بزرگ‌نمایی بالاتری از بخش خراشان نمونه است، مکانیزم سوم، حالت سایش خراشان می‌باشد.

بر طبق قوانین اصطکاک، رابطه بین ضریب اصطکاک و نیروی اصطکاک، به صورت زیر است [۲۹]:

$$F = \mu W \quad (4)$$

که در آن  $F$  نیروی اصطکاکی برحسب نیوتون،  $\mu$  ضریب اصطکاک و بدون بعد و  $W$  نیروی عمودی تکیه‌گاه است که در این تحقیق برابر با ۲۰ نیوتون انتخاب شد. با توجه ضرایب اصطکاک ارائه شده در جدول ۱۰، نیروی اصطکاک، قابل محاسبه است و نتایج محاسبات، در جدول مذکور نشان داده شده است. با توجه به نیروهای اصطکاک، می‌توان گفت که نیروی اصطکاکی کمتر در نمونه بهینه منجر به تغییر شکل کمتر، مناطق تحت تسلیم کمتر و در نتیجه کاهش وزن و سایش کمتر شده است.

نرخ سایش ویژه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۳۰]:

$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho F_N L} \quad (5)$$

که در آن  $W_s$  نرخ سایش ویژه برحسب سانتی‌متر مکعب بر نیوتن،  $F_N$  نیروی عمودی تکیه‌گاه در حین لغزش،  $\Delta m$  تغییر وزن نمونه برحسب گرم،  $\rho$  چگالی نمونه برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و  $L$  مسافت لغزش برحسب متر است. چگالی آلیاژ AZ۳۱ ۱/۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب معرفی شده است. همچنین  $F_N$  برابر با ۲۰ نیوتن، مسافت لغزش ۵۰ متر و میزان تغییر وزن نمونه در جدول ۱۰ ارائه شده است. پس از انجام



برای نمونه بهینه در حدود ۰/۲۹ بود.

خراشان بود. نتایج ارزیابی آزمون طیف سنجی تفرق انرژی (EDS) اکسیداسیونی بودن مکانیزم را تأیید کرد. ضریب سایش

## واژه‌نامه

1. friction stir processing (Fsp)
2. carbon nano tubes (Cnts)
3. one factor at a time (Ofat)
4. interaction
5. response surface methodology (Rsm)
6. analysis of variance (Anova)
7. multi-wall carbon nano tube (Mwcnt)
8. chemical vapor deposition (Cvd)
9. field emission scanning electron microscopy (Fesem)
10. pin-on-disk
11. EDS
12. confirmation test
13. curvature
14. degree of freedom
15. center point
16. confidence interval
17. synergism
18. antagonism
19. lack of fit
20. Fisher test
21. heat affected zone (Haz)
22. fractography
23. oxidative
24. abrasive
25. adhesive

## مراجع

1. Zhang, D. T., Xiong, F., Zhang W. W., Qui, C., and Zhang, W., "Superplasticity of AZ31 Magnesium Alloy Prepared by Friction Stir Processing", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 1911-1916, 2011.
2. Gray, J. E., and Luan, B., "Protective Coatings on Magnesium and Its Alloys-a Critical Review", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 336, pp. 88-113, 2002.
3. Lim, D. K., Shibayanagi, T., and Gerlich, A. P., "Synthesis of Multi-Walled CNT Reinforced Aluminium Alloy Composite via Friction Stir Processing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 507, pp. 194-199, 2009.
4. Woo, W., Choo, H., Brown, D. W., Liaw, P. K., and Feng, Z., "Texture Variation and its Influence on the Tensile Behavior of a Friction-Stir Processed Magnesium Alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 1859-1864, 2006.
5. Faraji, G., Dastani, O., and Akbari Mousavi, S. A. A., "Effect of Process Parameters on Microstructure and Micro-Hardness of AZ91/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Surface Composite Produced by FSP", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 9, pp. 1583-1590, 2011.
6. Asadi, P., Faraji, G., and Besharati, M. K., "Producing of AZ91/SiC Composite by Friction Stir Processing (FSP)", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, pp. 247-260, 2010.
7. Lu, D., Jiang, Y., and Zhou, R., "Wear Performance of Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles and CNTs Reinforced Magnesium Matrix Composites by Friction Stir Processing", *Wear*, Vol. 305, pp. 286-290, 2013.
8. Izadi, H. and Gerlich, A. P., "Distribution and Stability of Carbon Nanotubes During Multi-Pass Friction Stir Processing of Carbon Nanotube/Aluminum Composites", *Carbon*, Vol. 50, pp. 4744-4749, 2012.
9. Johannes, L. B., Yowell, L. L., Sosa, E., Arepalli, S., and Mishra, R. S., "Survivability of Single-Walled Carbon Nanotubes During Friction Stir Processing", *Nanotechnology*, Vol. 17, pp. 3081-3084, 2006.
10. Liu, Q., Ke, L., Liu, F., Huang, C., and Xing, Li., "Microstructure and Mechanical Property of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated by Friction Stir Processing", *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 343-348, 2013.
11. Gonzalez, A., "Two Level Factorial Experimental Designs Based on Multiple Linear Regression Models: a Tutorial Digest Illustrated by Case Studies", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 360, pp. 227-241, 1998.
12. Anderson, M., and Whitecomb, P., *DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation*, 1 ed., pp. 1-196, Oregon: Productivity Inc., 2000.
13. Housh, S., and Mikucki, B., *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials: Selection and Application of Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM Handbook, Vol. 2, United States of America: ASM International, 1990.
14. Becherer, B. A., and Witheford, T. J., *Heat treating: Heat Treating of Ultrahigh-Strength Steels*, ASM Handbook, Vol. 4, United States of America: ASM International, 1991.

15. Azizieh, M., Kokabi, A. H., and Abachi, A., "Effect of Rotational Speed and Probe Profile on Microstructure and Hardness of AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites Fabricated by Friction Stir Processing", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 2034-2041, 2011.
16. Yu, Z., Zhang, W., Choo, H., and Feng, Z., "Transient Heat and Material Flow Modeling of Friction Stir Processing of Magnesium Alloy using Threaded Tool", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 43, pp. 724-737, 2011.
17. Alavi Nia, A., Omidvar, H., and Nourbakhsh, S. H., "Investigation of the Effects of Thread Pitch and Water Cooling Action on the Mechanical Strength and Microstructure of Friction Stir Processed AZ31", *Materials and Design*, Vol. 52, pp. 615-620, 2013.
18. Chang, C. I., Du, X. H., and Huang, J. C., "Producing Nanograined Microstructure in Mg-Al-Zn Alloy by Two-Step Friction Stir Processing", *Scripta Materialia*, Vol. 59, No. 3, pp. 356-359, 2008.
19. Chang, C. I., Du, X. H., and Huang, J. C., "Achieving Ultrafine Grain Size in Mg-Al-Zn Alloy by Friction Stir Processing", *Scripta Materialia*, Vol. 57, No. 3, pp. 209-212, 2007.
20. Kehoe, S., Ardhaoui, M., and Stokes, J., "Design of Experiments Study of Hydroxyapatite Synthesis for Orthopaedic Application using Fractional Factorial Design", *Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, pp. 1423-1437, 2010.
21. Ghadiri, M., Vatanara, A., Doroud, D., and Najafabadi, A., "Paromomycin Loaded Solid Lipid Nanoparticles Characterization of Production Parameters", *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Vol. 92, pp. 2580-2585, 2011.
22. DX7 Help, Design-Expert Software, Version 7.1, User's Guide, Technical Manual, Stat-Ease Inc., Minneapolis, 2007.
23. Xin, R., Liu, D., Li, B., Sun, L., Zhou, Z., and Liu, Q., "Mechanisms of Fracture and Inhomogeneous Deformation on Transverse Tensile Test of Friction-Stir-Processed AZ31Mg Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 565, pp. 333-341, 2013.
24. Guduru, R. K., Darling, K. A., Kishore, R., Scattergood, R. O., Koch, C. C., and Murty, K. L., "Evaluation of Mechanical Properties using Shear-Punch Testing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 395, No. 1-2, pp. 307-314, 2005.
25. Karthik, V., Visweswaran, P., Vijayraghavan, A., Kasiviswanathan, K. V., and Raj, B., "Tensile-Shear Correlations Obtained from Shear Punch Test Technique using a Modified Experimental Approach", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 393, No. 3, pp. 425-432, 2009.
26. Vander Voort, G. F., *Fractography*, ASM Handbook Vol. 12, United States of America: ASM International, 1987.
27. Akhbarizadeh, A., Golozar, M. A., and Shafeie, A., "Effects of Austenizing Time on Wear Behavior of D6 Tool Steel after Deep Cryogenic Treatment", *Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 29-32, 2009.
28. Akhbarizadeh, A., Javadpour, S., and Amini, K., "Investigating the Effect of Electric Current Flow on the Wear Behavior of 1.2080 Tool Steel During the Deep Cryogenic Heat Treatment", *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 103-109, 2013.
29. ASM Vol. 18 - *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM International, The USA, 1992.
30. Chang, L., Zhang, Z., Breidt, C., and Friedrich, K., "Tribological Properties of Epoxy Nanocomposites I. Enhancement of the Wear Resistance by Nano-TiO<sub>2</sub> Particles", *Wear*, Vol. 258, pp. 141-148, 2005.