

بهینه‌سازی رفتار سایشی پوشش کامپوزیتی نیکل - نقره توسط مدل تاگوچی

مجید زارع، مسعود سلطانی، علی شفیعی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۱۹ - پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۲۰)

چکیده

پوشش‌های کامپوزیتی با زمینه نیکل رسوب‌دهی شده به روش آبکاری الکتریکی دارای مقاومت خوبی در برابر سایش هستند. در این پژوهش با افزودن ذرات تقویت کننده نقره و بهینه‌سازی شرایط پوشش‌دهی به مطالعه خواص سایشی، سختی و زبری پوشش کامپوزیتی نیکل - نقره پرداخته شد. به این منظور از تکنیک طراحی آزمایش تاگوچی جهت بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرایند با چهار پارامتر (میزان ذرات نقره، دانسیته جریان، زمان و نوع افزودنی) و سه سطح استفاده شد. بنابراین با تهیه ۹ نمونه آزمایشگاهی، مورفولوژی و ساختار پوشش‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش پرتو ایکس بررسی شد. مطالعه مقاومت سایشی پوشش‌ها نیز با استفاده از آزمون سایش پین بر دیسک انجام شد و سطوح سایش نمونه‌ها به کمک تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و آنالیز طیف نگار تفکیک انرژی بررسی شدند. مشخص شد حالت بهینه پوشش‌دهی به کمک نمودارهای سیگنال به نویز برای دستیابی به کمترین میزان سایش در غلظت نقره ۵۰ mg/L، دانسیته جریان ۴ A/dm²، زمان آبکاری ۲ ساعت و افزودنی نوع تریتون X100 بدست می‌آید. آنالیز واریانس (ANOVA) داده‌ها نشان داد که به ترتیب دانسیته جریان و غلظت ذرات نقره مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت به سایش پوشش‌ها می‌باشند. در مرحله بعد، فرایند به کمک شبکه عصبی مدل‌سازی شد تا منحنی روبه مورد نظر برای پارامترها و خروجی‌ها رسم شود. نتایج حاکی از آن بود که افزایش غلظت نقره و دانسیته جریان منجر به کاهش نرخ سایش نمونه‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پوشش کامپوزیتی، آبکاری الکتریکی، پوشش نیکل - نقره، تاگوچی، سایش.

Optimization of Wear Behavior of Ni-Ag Composite Coatings by Taguchi Model

Majid Zare, Masoud Soltani, Ali Shafei

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 11 October 2018, accepted 10 June 2019)

Abstract

Electroplated nickel composite coatings have good wear resistance. In this study, by adding Ag particles as reinforcement and optimization of electroplating conditions, wear behavior, hardness and roughness of Ni-Ag have been studied. Taguchi design of experiment (DOE) technique was carried out for optimizing four effective parameters (Ag content, current density, time and additives) and three levels. Therefore, nine specimens were prepared and morphology and structure of the samples were analyzed by SEM and X-ray diffraction. To find out the wear resistance of the samples, pin-on-disk test was performed and worn surfaces were analyzed by SEM and EDS. The optimized parameters of electroplating, based on signal to noise ratio (SNR) curves, were 50 mg/L Ag content, 4A/dm², 2 hours electroplating and Triton X100 as additive in order to achieve the lowest wear. Analysis of variance (ANOVA) calculation showed current density and Ag content are the most effective parameters on wear behavior of coatings, respectively. The process was then modeled in Artificial Neural Network and the counters of parameters together with the outputs were determined. The results showed that wear resistance decreased with increasing both Ag content and current density.

Key words: Composite coating, Electroplating, Ni-Ag coating, Taguchi, Wear.

E-mail of Corresponding author: majid.zare@ma.iut.ac.ir.

مقدمه

نقره به عنوان یک فلز نجیب به دلیل روانکاری بالا در دمای محیط و دمای بالا به عنوان گزینه مناسب جهت به کارگیری در پوشش‌های خود روانکار در قطعاتی نظیر یاتاقان‌های با سرعت زیاد و قطعات متحرک در فضاپیما و تجهیزات در معرض دما بالا و تشعشعات هسته‌ای می‌باشد [۱۴]. علیرضایی و همکاران در تحقیقی پوشش الکترولس نیکل-فسفر با ذرات نقره و آلومینا را با هدف کاهش ضریب اصطکاک تولید نمودند. نتایج نشان داد که کمترین ضریب اصطکاک مربوط به پوشش Ni-P-Ag بوده است. همچنین با افزایش میزان نقره، سختی روند کاهشی پیدا می‌کند که به علت حضور فاز نرم در ساختار پوشش بوده است [۱۵]. تأثیر استفاده از نانو ذرات نقره در پوشش‌های روی تولید شده به روش آبرکاری الکتریکی نیز نشان داده که مقدار نقره با مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی رابطه مستقیم دارد [۱۶].

ستیل تریمتیل آمونیم بروماید یک فعال کننده سطحی آنیونی است که کلوخه شدن ذرات را کنترل می‌کند. افزودن مقدار مناسب این ماده نه تنها از طریق ترشوندگی و بار سطحی منجر به پایداری ذرات معلق در محلول می‌شود، بلکه با افزایش بار الکتریکی + این ذرات، جذب الکترواستاتیکی آن‌ها روی کاتد بهبود می‌یابد [۱۷]. تریتون X100 یک فعال کننده سطحی غیر یونی است که دارای یک زنجیره پلی اتیلن اکسید آبدوست می‌باشد. در طرف دیگر این مولکول یک گروه عاملی هیدروکربن آب‌گریز وجود دارد که از طریق ایجاد پیوند با ذرات معلق، ترشوندگی آن‌ها را افزایش می‌دهد [۱۸]. باتوجه به اینکه تابحال در زمینه پوشش‌های کامپوزیتی نیکل تولید شده به روش آبرکاری الکتریکی با ذرات کامپوزیتی نقره مطالعه‌ای صورت نگرفته است و کاربرد گسترده پوشش‌های بر پایه نیکلی در صنعت به خصوص پیستون‌های هواپیما می‌باشد این موضوع می‌تواند یک چالش جذاب برای بررسی باشد.

آبرکاری الکتریکی به دلیل هزینه پایین، سهولت تولید و آسان بودن کنترل فرایند یکی از مهمترین روش‌های پوشش‌دهی در مهندسی سطح می‌باشد [۱]. در بین پوشش‌های تولید شده به روش آبرکاری الکتریکی، پوشش‌های نیکلی رایج ترین نوع می‌باشند [۲]. دلیل استفاده زیاد از این فلز علاوه بر هزینه نسبتاً پایین، بهبود سختی، مقاومت به سایش و خوردگی سطوح فلزی در حضور نیکل می‌باشد، به گونه‌ای که بیش از نیمی از نیکل تولید شده در دنیا به شکل پوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. به منظور بهبود عملکرد این پوشش‌ها ذرات تقویت کننده به حمام اضافه می‌شوند که می‌توانند منجر به تولید پوشش‌دهی کامپوزیتی با خواص سطحی بهتر شوند [۴].

مطالعات زیادی در زمینه تولید و مشخصه‌یابی پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکل به روش آبرکاری الکتریکی انجام شده است. آرای^۱ و همکاران، خواص پوشش کامپوزیتی نیکل با ذرات تقویت کننده نانولوله کربن چند دیواره را که با استفاده از آبرکاری الکتریکی تولید شده بود، مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی استفاده از CNT منجر به بهبود خواص تریبولژیکی پوشش شد [۵]. تأثیر افزودن ذرات تقویت کننده SiC بر ساختار و خواص تریبولژیکی پوشش Ni-SiC نیز تا بحال بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است و در تمامی پژوهش‌ها بهبود خواص تریبولژیکی مشاهده شده است [۶-۸]. علاوه بر این افزودن ذرات اکسیدی مانند Al_2O_3 [۹، ۱۰]، SiO_2 [۱۱]، گرافیت [۱۲]، سولفیدی MoS_2 [۱۳]، و هم چنین تأثیر پارامترهای پوشش‌دهی جریان و غلظت ذرات کامپوزیتی نیز در پوشش‌های بر پایه نیکلی بررسی شده است که مهمترین هدف، افزایش مقاومت به سایش پوشش‌ها بوده است.

¹ Arai

در این پژوهش با استفاده از روش طراحی آزمایش^۴ (DOE) تاگوچی و مدلسازی به کمک شبکه عصبی مصنوعی به تولید و بررسی خواص سایشی پوشش کامپوزیتی Ni-Ag پرداخته خواهد شد.

مواد و روشها

آند و کاتد

آلیاژ مورد استفاده به عنوان کاتد، فولاد ساده کربنی St. 37 تجاری بود. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود. این فولاد که به عنوان زیر لایه مورد استفاده قرار می‌گیرد، ابتدا به کمک فرآیند برش‌کاری، قطعات دیسکی شکل به قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر تهیه شد. به منظور از بین بردن اثر برش‌کاری یا همان کار سرد، نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تنش‌گیری شدند. برای جلوگیری از تشکیل پوسته اکسیدی، نمونه‌ها داخل محفظه پودر چدن در کوره دما بالا نگهداری شدند. برای بهبود چسبندگی پوشش آبرکاری بایستی آماده سازی اولیه روی آن صورت گیرد. لذا نمونه‌ها توسط دستگاه سندبلاست با ذرات کروی شکل از جنس فولاد تحت پاشش قرار گرفتند. برای جلوگیری از ایجاد پوشش بر هر دو سطح نمونه که باعث خطا در انجام فرآیند آبرکاری می‌شود، یک طرف دیسک‌ها کاملاً به کمک چسب ماسکنت پلیمری پوشانده شد. این چسب به صورت مایع است و پس از خشک شدن، سطح نمونه را نارسا می‌کند. با توجه به احتمال وجود آلودگی، از جمله چربی، نمونه‌ها قبل از آبرکاری در محلول چربی زدا به مدت ۱۰ دقیقه شسته شدند. آند مصرفی مورد استفاده در این تحقیق از جنس نیکل خالص با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد ۷۰mm×۱۰۰mm انتخاب شد.

روش تاگوچی یک روش سیستماتیک برای طراحی و تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها به منظور دست یابی به پارامترهای بهینه می‌باشد. امروزه این روش به یک ابزار بسیار مناسب برای بهبود کیفیت نتایج بدون افزایش هزینه پژوهش‌های عملی به کمک کاهش تعداد آزمایشات می‌باشد [۱۹ و ۲۰]. در مورد استفاده از روش تاگوچی در ارتباط با آبرکاری نیز مطالعاتی صورت گرفته است. از جمله آن‌ها می‌توان به تولید پوشش نیکل-فسفر توسط ژوان^۱ و همکارانش اشاره نمود که با استفاده از روش تاگوچی، پارامترهای بهینه را برای تولید پوشش نانو ساختار بدست آوردند [۲۱]. روزا^۲ و همکاران با استفاده از روش تاگوچی مس را روی تیتانیوم آبرکاری نمودند و نشان دادند که دانسیته جریان بیشترین اثر را روی چسبندگی پوشش تولیدی داشته است [۲۲].

مدل سازی داده‌ها نیز به منظور تحلیل دقیق‌تر و پیش بینی چگونگی تغییرات خواص سایشی پوشش در شرایط متفاوت آبرکاری می‌تواند به اعتبار بخشی نتایج کمک کند. یکی از روش‌های مدلسازی برای تطبیق نتایج با واقعیت، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۳ می‌باشد که جهت پیش بینی پاسخ‌های خروجی بکار می‌رود. اصولاً این روش برای حل مسائلی به کار می‌رود که به راحتی قابل حل نیستند. به عنوان مثال پیدا کردن رابطه ریاضی برای ارتباط بین نرخ سایش پوشش آبرکاری نیکل و پارامترهای تولید، نظیر دانسیته جریان و غلظت نقره، فرآیندی بسیار سخت و زمان بر است و رسیدن به آن نیاز به حل معادلات با مرتبه دوم و یا حتی بیشتر دارد. استفاده از مدل ریاضی نوروں به عنوان کوچکترین واحد پردازش اطلاعات، اساس عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی را تشکیل می‌دهد [۲۳].

¹ Yuan

² Roza

³ Artificial Neural Networks

⁴ Design of experiment

ذرات نقره و آماده سازی آنها

برای ایجاد پوشش کامپوزیتی Ni-Ag از میکرو پودر Ag ساخت شرکت اینفرامات^۱ با اندازه دانه ۰/۵ میکرون و با خلوص ۹۹/۹۵ درصد استفاده شد. از جمله خواص این ذره، کلوخه شدن است. لذا برای آماده سازی این پودر، ابتدا در ۴۰۰cc محلول حمام اضافه شد و پس از حل کردن افزودنی‌های آنیونی CTAB و غیر یونی تریتون X100 بر اساس طراحی آزمایش، به مدت ۱ ساعت در حمام مخصوص التراسونیک قرار گرفت تا ذرات آگلومره شده از هم جدا گردند. مقدار CTAB به مقدار ۱۰۰mg/L و تریتون X100 به مقدار ۰/۰۵ g/L به ازای هر ۱۰mg/L ذره نقره موجود در محلول اضافه شدند [۶].

طراحی آزمایش به روش تاگوچی

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند از روش تاگوچی استفاده شد. روش تاگوچی شامل دو قسمت اصلی طراحی آزمایش و بهینه سازی است. روش طراحی آزمایش تاگوچی خود یک روش خاص از مبحث طراحی آزمایش محسوب می شود و بعد از طراحی آزمایش می توان بهینه‌سازی به این روش را نیز انجام داد. در این جا برخی از تعاریف و اصطلاحاتی که بکار گرفته می‌شوند ارائه می‌شود.

عامل یا فاکتور یک متغیر از فرآیند است که بر خروجی تاثیر می‌گذارد و سطح عامل یک مقدار مشخص از یک عامل است. درجه آزادی هر فاکتور به مفهوم تعداد تغییرات متوالی ممکن بین سطوح آن فاکتور است. منظور از پاسخ، خروجی فرآیند است که طی یک سری آزمایش بررسی تاثیر روی آن صورت می‌پذیرد و یک طراحی آزمایش حاصل چیدمان عوامل و سطوح آنها به گونه ای خاص است و در واقع یک دستورالعمل برای انجام آزمایش است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی زیرلایه مورد نظر (برحسب درصد وزنی)

عنصر	N	S	P	Mn	Si	C	Fe
درصد پایه	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۱/۶۰	۰/۵۵	۰/۱۷	

حمام آبکاری

برای آبکاری نمونه‌های فولادی سندبلاست شده از حمام آبکاری سولفاماتی استفاده شد. ترکیب این حمام در جدول ۲ آمده است. حمام تهیه شده درون بشر ۸۰۰ میلی لیتری ریخته شده و توسط همزن مغناطیسی استوانه‌ای شکل با طول ۲cm و با نام تجاری IKAMAG، فرایند تلاطم اعمال شد. منبع تغذیه از طریق پایه مخصوص به آند و کاتد متصل شده و در حین هم زدن، جریان به آند و کاتد اعمال گردید. برای کاهش تبخیر حمام و تغییر ترکیب شیمیایی، روی سطح بشر با پلاستیک پوشانده شد. دمای حمام برای انجام فرآیند 2 ± 60 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. برای تنظیم pH محلول از کربنات نیکل به صورت متوالی در بازه‌های زمانی ۱ ساعت استفاده شد [M1]. سرعت هم زدن حمام طوری انتخاب شد که ذرات نقره به صورت معلق در حمام باقی بمانند و توزیع مناسبی روی سطح نمونه‌ها به خود بگیرند. این مقدار ۵۰۰rpm در نظر گرفته شد. علاوه بر این، حباب‌های هیدروژن ایجاد شده بر سطح کاتد به راحتی در این سرعت چرخش برطرف می‌شوند. مقدار غلظت سولفامات موجود در حمام مرتب کنترل می‌شد تا از عدم تغییر غلظت مواد تشکیل دهنده حمام اطمینان حاصل شود.

جدول ۲. ترکیب حمام سولفامات جهت آبکاری الکتریکی نیکل

نام ماده	غلظت
سولفامات نیکل	۳۵۰ گرم بر لیتر
کلراید نیکل	۱۵ گرم بر لیتر
اسید بوریک	۳۵ گرم بر لیتر

¹ Inframat

آبکاری و افزودنی به عنوان فاکتورهایی برای طراحی آزمایش در نظر گرفته شدند. سپس به کمک نرم افزار Minitab کلیه روش‌ها برای بدست آوردن شرایط بهینه پیشنهاد داده شد. به همین منظور ۹ سطح (L₉) و یا به عبارت بهتر تعداد ۹ آزمون از ۸۱ آزمایش واقعی انتخاب شد. در جدول ۳ کلیه فاکتورها و سطوح آن‌ها مشاهده میشوند. فاکتورهای بیان شده، به صورت جدول ۴ در نرم افزار Minitab پیشنهاد شد. با قرار دادن پارامترها به جای اعداد در جدول ۴، جدول داده‌های طراحی به صورت جدول ۵ در می‌آید.

کلیت این روش به این صورت است که پس از تعریف مسئله و مشخص نمودن پارامترهای متغیر، بر اساس تعداد پارامترهای انتخابی و سطوح مربوط به هر کدام به طراحی آزمایش پرداخته می‌شود. در واقع پس از انجام این تحلیل برای هر فاکتور بهترین سطح معرفی می‌شود.

از یک طرف زیاد بودن تعداد پارامترها در فرایندهای آبکاری و دامنه تغییر نسبتاً گسترده و از طرف دیگر لزوم تولید پوشش‌های با کیفیت بالا و مقاوم به سایش، نیاز به بهینه‌سازی فرآیند را آشکار می‌کند. به منظور طراحی آزمایش، چهار پارامتر غلظت نقره، دانسیته جریان، زمان

جدول ۳. فاکتورهای انتخاب شده برای طراحی آزمایش تاگوچی

علامت	فاکتورهای نظیر	واحد	(۱)	سطح (۲)	(۳)
A	غلظت نقره	mg/L	۱۰	۳۰	۵۰
B	دانسیته جریان	A/dm ²	۲	۳	۴
C	زمان آبکاری	hrs	۱	۲	۳
D	افزودنی	g	CTAB	CTAB+TritonX100	تری‌تون X100

جدول ۴. طرح بندی آزمایش ۹ سطحی با آرایش متعامد پیشنهاد

شده در نرم افزار Minitab

جدول ۵. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

شماره آزمایش	شماره آزمایش			
	D	C	B	A
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۲	۱
۳	۳	۳	۳	۱
۴	۳	۲	۱	۲
۵	۱	۳	۲	۲
۶	۲	۱	۳	۲
۷	۲	۳	۱	۳
۸	۳	۱	۲	۳
۹	۱	۲	۳	۳

شماره آزمایش	غلظت نقره	دانسیته جریان	زمان آبکاری	افزودنی
۱	۱۰mg/L	۲ A/dm ²	۱ ساعت	۱۰۰mg/L CATB
۲	۱۰ mg/L	۳ A/dm ²	۲ ساعت	۱۰۰mg/L CTAB + ۰/۰۵g/L Triton X100
۳	۱۰ mg/L	۴ A/dm ²	۳ ساعت	۰/۰۵g/L Triton X100
۴	۳۰ mg/L	۲ A/dm ²	۲ ساعت	۰/۱۵g/L Triton X100
۵	۳۰ mg/L	۳ A/dm ²	۳ ساعت	۳۰۰mg/L CTAB
۶	۳۰ mg/L	۴ A/dm ²	۱ ساعت	۳۰۰mg/L CTAB + ۰/۱۵g/L Triton X100
۷	۵۰ mg/L	۲ A/dm ²	۳ ساعت	۵۰۰mg/L CTAB + ۰/۲۵g/L Triton X100
۸	۵۰ mg/L	۳ A/dm ²	۱ ساعت	۰/۲۵g/L Triton X100
۹	۵۰ mg/L	۴ A/dm ²	۲ ساعت	۵۰۰mg/L CATB

مشخصه‌یابی پودر و پوشش‌ها

سطح مقطع و مورفولوژی پوشش‌ها و همچنین پودر نقره مورد استفاده در فرایند آبکاری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips، مدل X130 و FESEM مدل LMU مجهز به سیستم آنالیز EDS بررسی شد. به منظور بررسی فازهای موجود در پوشش و پودر نقره از دستگاه آنالیز پراش پرتو ایکس مدل Philips X'pert MPD استفاده شد. پرتو مورد استفاده $(1/54.05 \text{ \AA})$ Cu Ka بود. از ولتاژ و جریان ۴۰ KV و ۴۰ mA استفاده گردید. هم چنین نرخ روبش دستگاه جهت تعیین فازها 1 deg/min تعیین شد.

کلیه نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM-G99 تحت آزمون سایش پین بر روی دیسک قرار گرفتند. پین مورد استفاده در این آزمون از جنس فولاد AISI ۵۲۱۰۰ با قطر ۵mm بود. این آزمون در حالی انجام شد که پس از انجام آزمون بارپذیری نیروی اعمالی ۵۰۰ گرم (معادل ۵ نیوتن) و سرعت خطی ۰/۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. هم چنین رطوبت ۳۰ تا ۳۵ درصد و دما، همان دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) بود. نمونه‌ها به مسافت ۱۰۰۰ متر آزموده شدند. کاهش جرم نمونه‌ها پس از ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و نهایتاً ۱۰۰۰ متر به کمک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. نرخ سایش با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید و نمودار نرخ سایش بر حسب مسافت نمونه‌ها برای مقایسه دقیق رسم شد.

$$W_r = \frac{\Delta m}{\rho \times l \times F \times 10^6} \quad \text{رابطه (۱) [۶-۸ و ۱۰]}$$

در حالی که W_r نرخ سایش بر حسب $\Delta m, \text{N.m/mm}^3$ کاهش وزن بر حسب گرم، ρ چگالی پوشش بر حسب g/cm^3 (معادل $1, (8/908)$ مسافت طی شده بر حسب متر، F نیروی اعمالی بر حسب نیوتن می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب 10^6 در رابطه بالا برای تبدیل واحد می‌باشد.

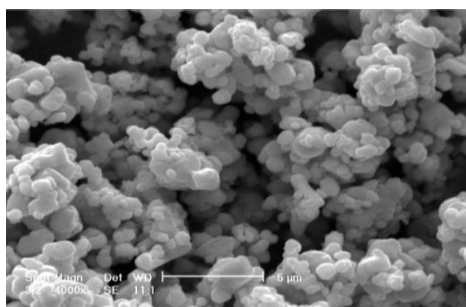
در نهایت هم به منظور مشخصه‌یابی نمونه بهینه (پس از تحلیل تاگوچی) علاوه بر آزمون سایش، زبری سنجی با دستگاه زبری سنج Mitutoyo به طول بررسی ۲/۵ میلی‌متر (برای هر نمونه ۲ بار)، ضخامت سنجی با استفاده از تصاویر سطح مقطع و نرم افزار آنالیز تصویر Clemex Vision PE & Vision Lite 4.0 و ریزسختی سنجی به کمک دستگاه ریزسختی سنج Wilson مدل 402MVD با نیروی اعمالی ۱۰۰ گرم (هر نمونه ۴ بار در مقطع عرضی) انجام شد.

بررسی و تحلیل تاگوچی

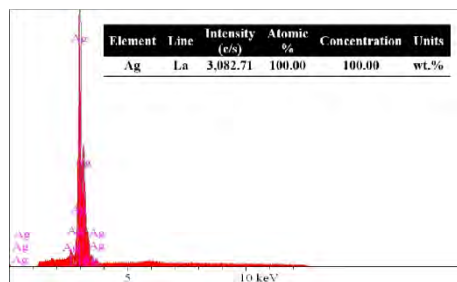
به منظور تحلیل آزمون‌های انجام شده به کمک نرم افزار Minitab ابتدا نسبت سیگنال به نویز برای هر پارامتر به دست آمد و سپس بهترین مقدار از طریق تعیین حداکثر نمودار تعیین شد. با توجه به این که نرخ سایش همواره بایستی کمترین مقدار باشد، لذا برای تعیین نسبت سیگنال به نویز از حالتی استفاده شد که کمترین مقدار، بهترین باشد. در نهایت روی داده‌های به دست آمده آنالیز واریانس (ANOVA) انجام شد و بسته به میزان مشارکت هر پارامتر، نتایج تحلیل متالورژیکی شد.

مدل‌سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی

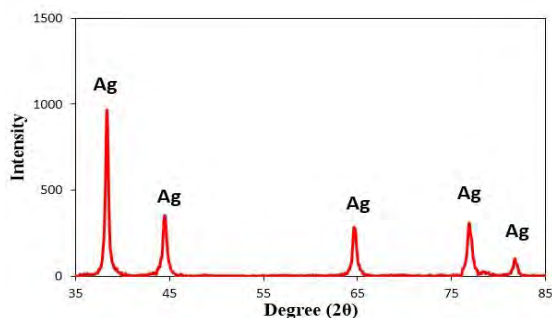
پس از طراحی آزمایش و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند توسط روش تاگوچی، به منظور اعتبار بخشی به نتایج مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شد. رایج‌ترین نوع شبکه عصبی، نوع چند لایه می‌باشد. این نوع از شبکه عصبی برای آموزش به داده‌های خروجی نیاز دارد. شبکه عصبی به طور پیش فرض یک لایه اولیه در نظر می‌گیرد که بیشتر دارای جنبه ریاضی بوده و از بحث این تحقیق خارج است. در این تحقیق برای اجرای شبکه، دو لایه (به غیر از لایه پیش فرض) توسط کاربر در نظر گرفته شد. تعداد دو نورون در لایه خروجی با تابع انتقال خطی در نظر گرفته شد و برای لایه میانی اول تابع محرک تانژانت هایپربولیک سیگموئید انتخاب گردید. تعداد نورون برای لایه اول کاربر ۸ عدد در نظر گرفته شد. لذا



شکل ۱. پودر نقره با اندازه دانه متوسط ۰/۵ میکرون



شکل ۲. درصد میزان خلوص نقره به کمک آزمون EDS



شکل ۳. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس ذرات نقره

پراش پرتو ایکس

نتایج آزمون پراش اشعه ایکس انجام شده روی سه نمونه شماره ۱ و ۴ و ۹ در شکل ۴ قابل مشاهده است. همان گونه که از نتایج این آزمون مشخص است، فقط پیک‌های مربوط به حضور فازهای نقره و نیکل دیده می‌شوند که نشان می‌دهد هیچ اثری از فاز بین فلزی وجود ندارد. به عبارت بهتر می‌توان گفت در دمای آبکاری محلول (۶۰ درجه سانتی‌گراد) هیچ فازی مستعد به تشکیل شدن نیست که با توجه به دیاگرام فازی نیکل-نقره (شکل ۵) قابل قبول می‌باشد [۱۷]. شایان ذکر است تغییرات مقدار نقره و نوع افزودنی در حمام آبکاری تا حدودی منجر به تغییر در شدت پیک‌های نقره در الگوی مربوطه می‌گردد.

این لایه که براساس رابطه تانژانت هایپربولیک سیگموئید بود دارای ۸ نرون و لایه میانی دوم با تابع خطی دارای دو نرون بود.

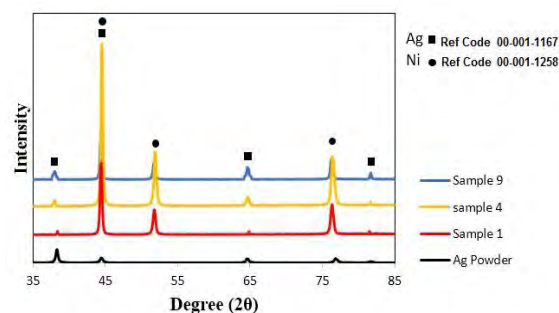
در این تحقیق، شبکه عصبی به کمک الگوریتم K-Fold آموزش داده می‌شود. در این روش داده‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. در طی K مرحله پردازش برای تعداد K داده، K - 1 داده برای آموزش و یک داده برای تست انتخاب می‌شود. پس از آن، خروجی شبکه با خروجی تجربی مقایسه می‌شود و میانگین مربعات خطا به عنوان ملاک دقت محاسبات ذخیره می‌شود. غلظت نقره و دانسیته جریان به عنوان ورودی و نرخ سایش به عنوان خروجی در این الگوریتم آموزش داده شد. پس از پایان آموزش به کمک ملاک ضریب تشخیص R^2 ، تطابق داده‌های تجربی و داده‌های بدست آمده از شبکه عصبی مقایسه شدند و در نهایت رویه‌های مربوط به ارتباط بین پارامترها رسم گردید.

نتایج و بحث

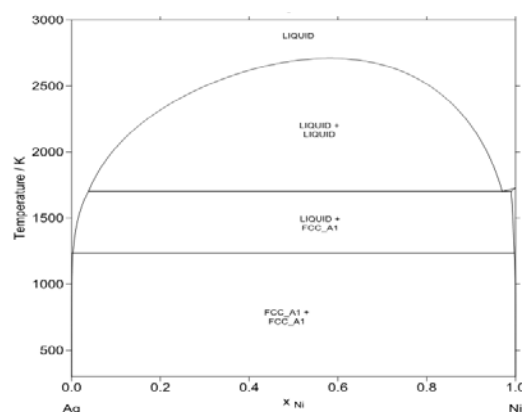
بررسی ذرات نقره

تصاویر SEM مربوط به ذرات پودر نقره توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد (شکل ۱). با استفاده از نرم افزار Clemex، اندازه متوسط ذرات نقره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اندازه متوسط این ذرات حدود ۰/۵ میکرون است. علاوه بر این شکل این ذرات کاملاً گرد بوده و تقریباً هیچ غیریکنواختی مانند گوشه‌های نوک تیز روی سطح آن‌ها مشاهده نمی‌شود. نتایج آزمون آنالیز طیف سنجی پراش انرژی و آزمون پراش پرتو ایکس برای این ذرات به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ آمده است که نشان دهنده درصد خلوص بسیار بالای این پودرها می‌باشند.

دارد [۲۵]. مورفولوژی پوشش خالص نیکل به صورت هرمی^۱ شکل گزارش شده است [۲۶]. این مکانیزم رشد اصولاً در دانسیته جریان های پایین رخ می‌دهد [۲۵]. با افزودن ذرات نقره به پوشش نیکل، مورفولوژی به صورت گنبدی شکل در آمده است. به عبارت بهتر می‌توان گفت که پستی و بلندی‌های سطح حالت یکنواخت‌تری^۲ به خود گرفته است. با مقایسه پارامترهای در نظر گرفته شده و اثر آن بر سطح می‌توان گفت که افزایش دانسیته جریان باعث تغییر محسوس در مورفولوژی نمونه‌ها می‌شود. پاتاک^۳ و همکارانش نشان دادند که مورفولوژی سطحی با افزایش دانسیته جریان تغییر می‌کند. در دانسیته جریان عمیق از هم جدا شده‌اند. افزایش دانسیته جریان تا 0.5 A/dm^2 مورفولوژی را به شکل هرم ناقص^۴ در می‌آورد [۲۶]. چن^۵ و همکارانش مورفولوژی پوشش نیکل را در دانسیته جریان 5 A/dm^2 به صورت هرمی می‌دانند [۲۷]. همان طوری که در شکل ۶ می‌توان مشاهده نمود، پوشش‌های نیکل به طور کامل از حالت هرمی خارج شده‌اند و به شکل کروی درآمده‌اند. این درحالی است که دانسیته جریان کمتر از 5 A/dm^2 می‌باشد. بنابراین افزودن ذره کامپوزیتی منجر به تغییر مورفولوژی در سطح شده است. از طرف دیگر با یکسان در نظر گرفتن سایر شرایط از جمله دانسیته جریان، افزایش میزان ذرات کامپوزیتی باعث افزایش نرخ جذب نقره روی زیرلایه می‌شود. لذا مقدار ذرات در واحد سطح کامپوزیت افزایش می‌یابد و ساختار ریزتر می‌گردد. در شکل ۶ تا حدی کاهش نامحسوس ریزساختار را می‌توان در کره‌های نیکل مشاهده نمود. افزایش غلظت نقره در نمونه‌های شماره ۷، ۸ و ۹ (اشکال ۶-ز، ۶-ح، ۶-ت) نسبت به نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ (اشکال ۶-الف، ۶-ب، ۶-ج) منجر به ایجاد کره‌های کوچکتری شده است.



شکل ۴. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه شماره ۱، ۴ و ۹

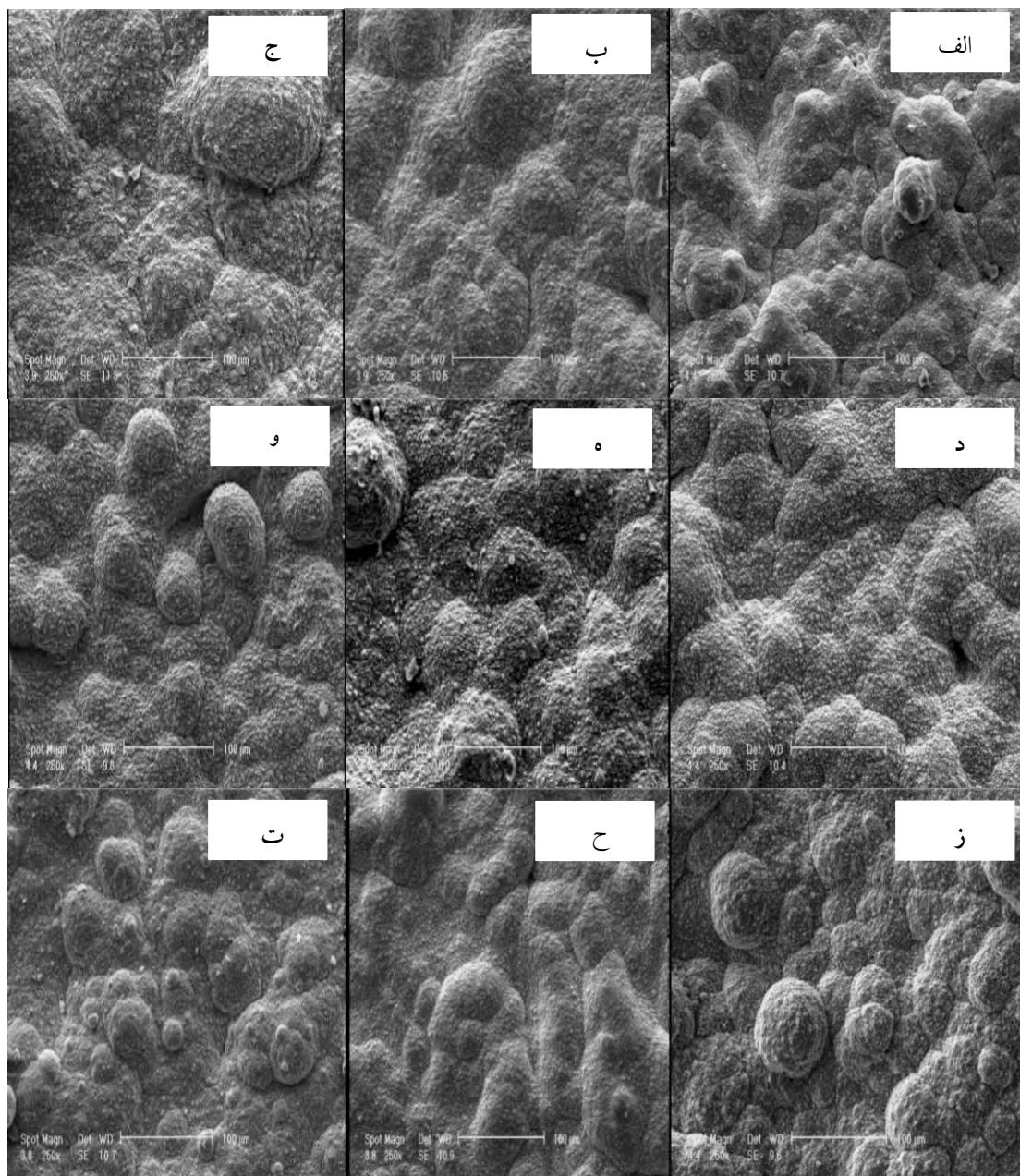


شکل ۵. دیاگرام فازی دو تایی نیکل - نقره [۱۷]

مورفولوژی پوشش‌ها

شکل ۶ مورفولوژی سطح پوشش‌ها را نشان می‌دهد. مورفولوژی سطوح بیشتر تحت تأثیر دانسیته جریان و غلظت ذرات موجود در حمام تغییر کرده است، اما در کل ساختار آن به صورت گنبدی شکل است. برخلاف پوشش کامپوزیتی نیکل با ذرات تقویت کننده WC که دارای ساختاری متخلخل و کروی است [۱۲]، پوشش به دست آمده از مورفولوژی متراکم‌تری برخوردار است. هم چنین در مقایسه با پوشش کامپوزیتی خود روانکار نیکل-گرافن نیز تراکم بیشتری دارد [۲۴]. پستی و بلندی‌هایی که در شکل مشاهده می‌شود می‌تواند ناشی از آماده سازی سطح به روش سندبلاست باشد، زیرا با انجام سندبلاست و افزایش زبری زیرلایه فولادی، قسمت‌هایی که دارای قله هستند، دانسیته جریان بیشتری خواهند داشت. این افزایش دانسیته جریان منجر به افزایش میزان نشست یون‌ها بر روی قله‌ها شده و نهایتاً مورفولوژی نهایی را تغییر می‌دهد زیرا مورفولوژی ایجاد شده کاملاً به نرخ نشست یون‌ها بستگی

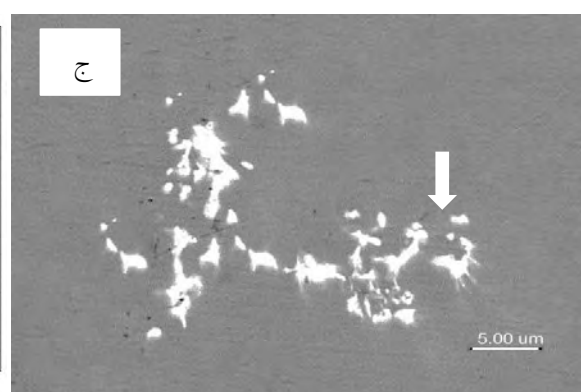
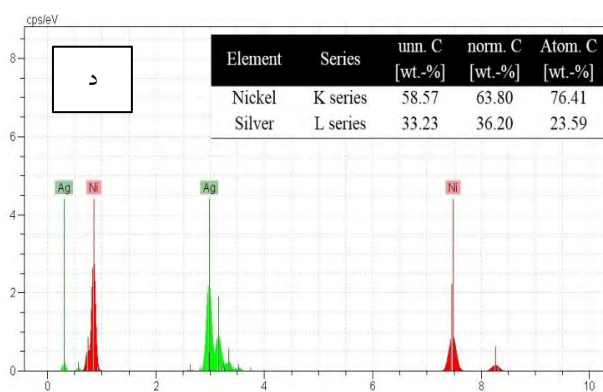
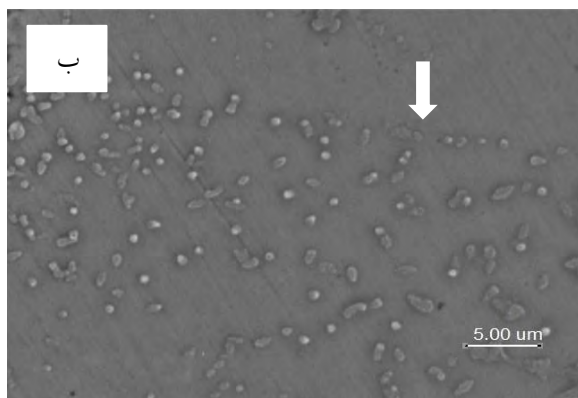
¹ Pyramid
² Smooth
³ Pathak
⁴ Truncated Pyramidal Type
⁵ Chen



شکل ۶. تصاویر SEM از مورفولوژی سطح پوشش کامپوزیتی نیکل-نقره در نمونه های الف) شماره ۱، ب) شماره ۲، ج) شماره ۳، د) شماره ۴، ه) شماره ۵، و) شماره ۶، ز) شماره ۷، ح) شماره ۸ و ت) شماره ۹

تریتون X100 یک فعال کننده سطحی غیر یونی است که دارای یک زنجیره پلی اتیلن اکسید آبدوست می باشد. در طرف دیگر این مولکول یک گروه عاملی هیدروکربن آب گریز وجود دارد. پیوند قسمت آبگریز با ذرات نقره می تواند آن ها را در محلول به صورت معلق نگه دارد [۱۸]. در نمونه شماره ۹ (شکل ۷-ج) کلوخه‌ای شدن ذرات نقره مشاهده گردید که پراکندگی مناسبی ندارند. CTAB در این پوشش توانسته دافعه مناسب را برای جلوگیری از کلوخه‌ای شدن ذرات ایجاد نماید. در برخی تصاویر تعدادی نقاط سیاه رنگ وجود دارد که می تواند ناشی از وجود تخلخل در پوشش باشد. در مراجع مختلف، دلیل حضور این تخلخل‌ها را دانسیته جریان بالا دانسته‌اند [۲۹]. در شکل ۸ نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه‌های ۱، ۴ و ۹ که با فلش مشخص شده است (ذرات سفید رنگ) آورده شده است. البته در این موارد، پیک نیکل ناشی از پوشش زمینه نیز وجود دارد، اما غلظت در برخی نمونه‌ها بیشتر و در برخی کمتر مشاهده شد.

بررسی سطح مقطع پوشش به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی حضور ذرات نقره در قسمت‌های مختلف پوشش و چگونگی توزیع این ذرات را در پوشش را نشان می دهد (شکل ۷). تصویر مربوط به نمونه ۱ (شکل ۷-الف) توزیع نامناسب ذرات نقره در پوشش را نشان می دهد. به عبارت بهتر، مقدار نقره بسیار کمی در پوشش جای گرفته است. بنابراین شرایط برای تولید پوشش نامناسب است. در این نمونه، CTAB به عنوان ماده‌ای آنیونی برای توزیع یکنواخت ذرات در محلول استفاده شده است. CTAB با افزایش پتانسیل زتا، دافعه بین ذرات را افزایش می دهد [۲۸]. در نمونه شماره ۴ (شکل ۷-ب) توزیع مناسبی از ذرات نقره در پوشش مشاهده شد که نشان می دهد شرایط مناسبی برای رسیدن ذرات نقره به سطح و درگیر شدن در پوشش وجود دارد. دلیل آن می تواند به نوع افزودنی مربوط شود. به عبارت بهتر افزودنی تریتون X100 منجر به توزیع یکنواخت نقره در محلول می شود و پس از جذب توسط کاتد در ساختار پوشش نیز یکنواخت خواهد بود.



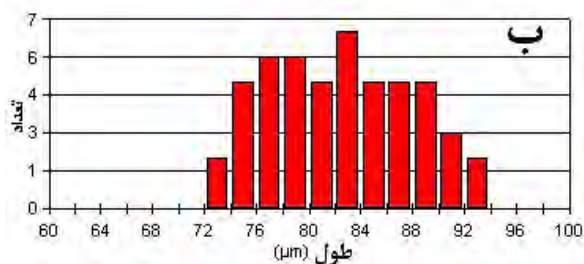
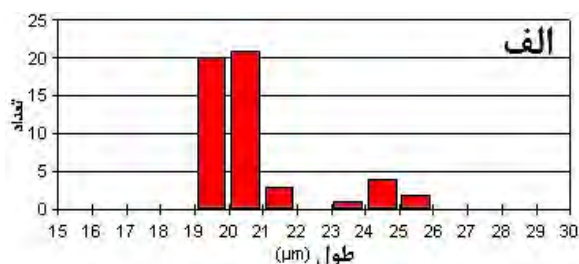
شکل ۷. تصاویر SEM از توزیع ذرات نقره و آنالیز EDS در سطح مقطع پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-نقره مربوط به نمونه های الف) شماره ۱،

ب) شماره ۴، ج) شماره ۹، د) نمودار آنالیز EDS مربوط به ذرات نقره موجود در پوشش نیکل-نقره

نتایج ازمون سایش

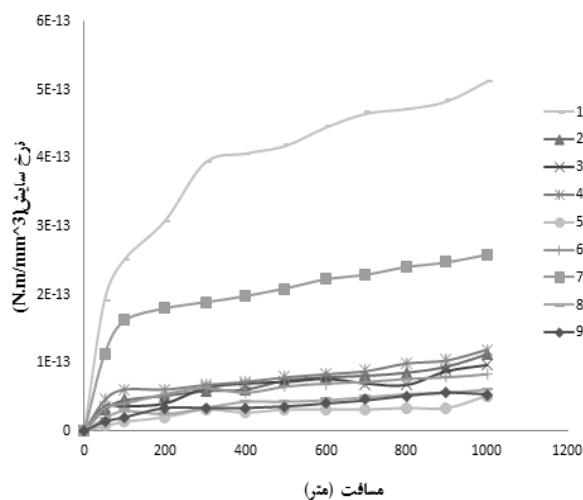
در شکل ۸ نمودارهای نرخ سایش برحسب مسافت برای هر ۹ نمونه با نیروی ۵N آورده شده است. نمونه شماره ۵ و ۱ به ترتیب کمترین و بیشترین میزان نرخ سایش را از خود نشان داده‌اند. در جدول ۶ حجم کاسته شده به همراه انحراف معیار گزارش شده است که نشان می‌دهد نمونه شماره ۱ و ۵ به ترتیب با کاهش حجم ۰/۰۰۱۸۷۵ میلی‌متر مکعب و ۰/۰۰۰۲۵۸ میلی‌متر مکعب ضعیف‌ترین و بهترین عملکرد سایشی را داشته‌اند. با اندازه‌گیری سختی این دو نمونه مشخص شد که نمونه شماره یک دارای سختی ۳۷۱/۵ ویکرز و نمونه شماره ۵، ۳۱۹/۵ ویکرز سختی دارد. همچنین با ضخامت سنجی این دو نمونه (شکل ۹) با استفاده از نرم افزار Clemex مشخص شد که ضخامت نمونه شماره ۵ (۸۱ میکرون) بیشتر از ضخامت نمونه شماره ۱ (۲۰ میکرون) می‌باشد که این موضوع می‌تواند موجب افزایش مسافت سایش پوشش تا رسیدن به زیر لایه شود. برای بررسی دقیقتر این موضوع تصاویر SEM سطوح سایش و ذرات کنده شده پس از سایش این دو نمونه در شکل ۱۰ آورده شده است.

توجه به این شکل، می‌توان یک مکانیزم عمده در رفتار سایشی نمونه شماره ۱ مشاهده کرد. در سطوح سایش نمونه ۱۰- الف شیارهایی موازی با مسیر حرکت پین در سطح ایجاد شده است که در شکل ۱۰- ح با بزرگنمایی پایین‌تر قابل مشاهده می‌باشد. لذا مکانیزم اول را می‌توان مکانیزم سایش خراشان نام برد که در شکل‌های ۱۰- الف و ۱۰- ب با پیکان مشخص شده است.



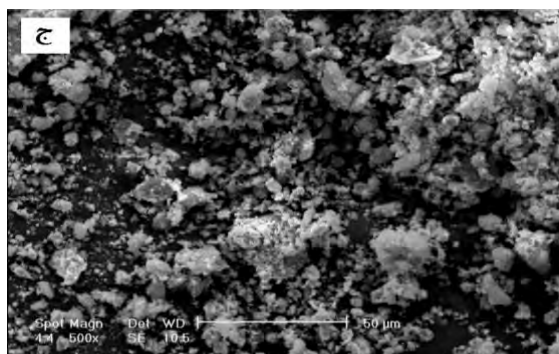
شکل ۹. نمودار توزیع ضخامت پوشش در سطح مقطع نمونه‌های الف (شماره ۱ و ب) شماره ۵

در تصویر ۱۰- ب ذرات نقره در محل سایش یافته قابل مشاهده هستند. شکل و اندازه ذرات نقره نسبت به قبل (بر اساس توزیع ذراتی که در شکل ۷- الف مشاهده شد) کمی بزرگتر به نظر می‌رسد. این پدیده در اثر پهن شدن ذرات نقره ایجاد می‌شود. چون سختی ذرات نقره کم است لذا به راحتی تغییر شکل می‌یابند. در حین سایش، نقره روی سطح پهن می‌شود و خاصیت خود روانکاری را افزایش می‌دهد. این موضوع توسط علیرضایی و همکاران به اثبات رسیده است [۱۵]. با وجود ضخامت کم پوشش این نمونه، مقاومت خوبی را از خود نشان داده است و از سطح جدا نشده. زیرا در آنالیز مربوط به سطح سایش، اثری از آهن مشاهده نشد. ذرات سایشی (شکل ۱۰- ج) کاملاً گرد و یکنواخت هستند ولی اندازه یکسانی ندارند.



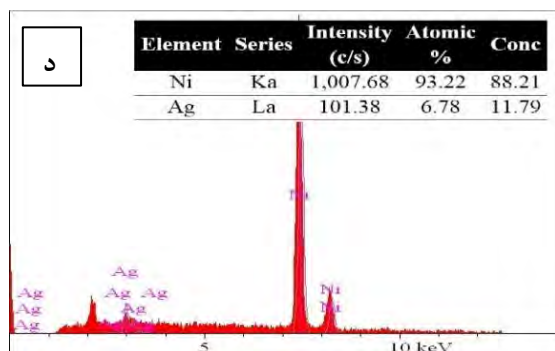
شکل ۸. مقایسه نرخ سایش نمونه در طی مسافت ۱۰۰۰ متری

شکل ۱۰، تصاویر میکروسکوپی الکترونی SE و BS سطوح سایش یافته نمونه شماره ۱ را نشان می‌دهد. با

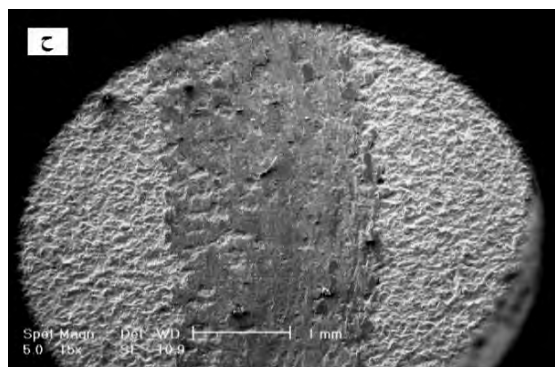


گردی این ذرات ناشی از اثر آن‌ها به عنوان جسم سوم می‌تواند باشد، زیرا در حین سایش بین پین و سطح پوشش به دام افتاده و پس از مدتی سطح آن‌ها یکنواخت می‌گردد. همچنین در اثر اکسیداسیون و کارسختی، مقاومت به سایش آن‌ها به خصوص از سطح پوشش افزایش می‌یابد [۳۰].

جدول ۶ نتایج حاصل از سایش نمونه‌ها

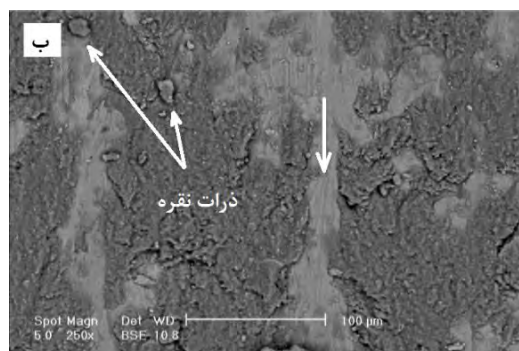
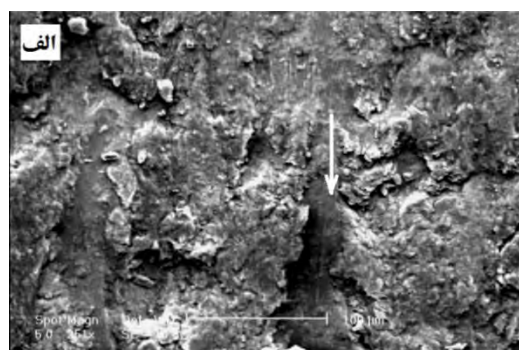


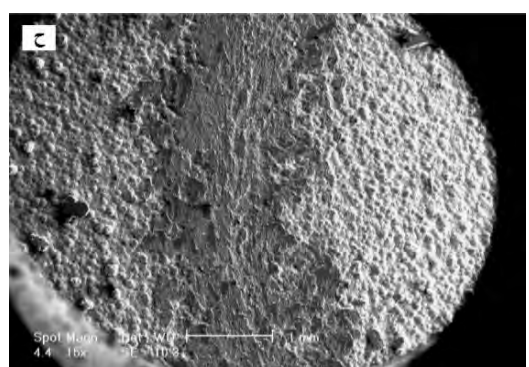
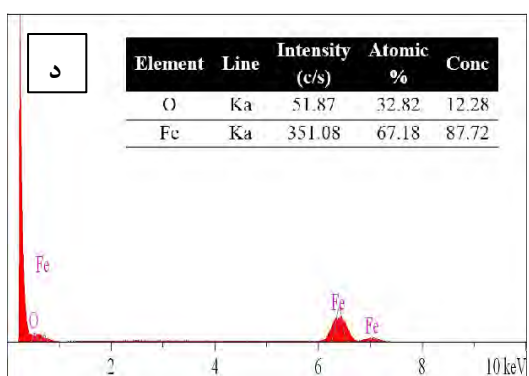
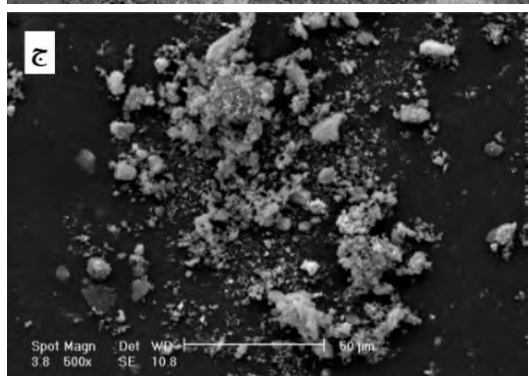
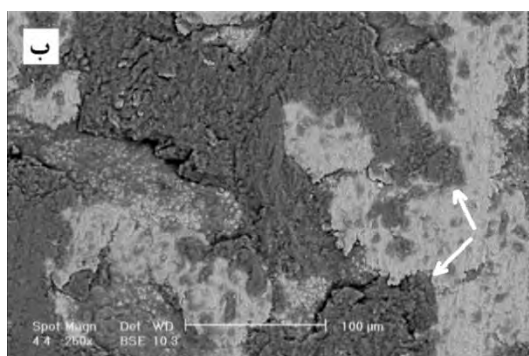
شماره نمونه	حجم کاسته شده ناشی از سایش با نیروی ۵N (mm ³)
۱	۰/۰۰۱۸۷۵
۲	۰/۰۰۰۵۶۱
۳	۰/۰۰۰۴۸۳
۴	۰/۰۰۰۵۹۸
۵	۰/۰۰۰۲۵۸
۶	۰/۰۰۰۴۱۵
۷	۰/۰۰۱۲۹۱
۸	۰/۰۰۰۳۰۳
۹	۰/۰۰۰۲۶۹



شکل ۱۰. الف) مورفولوژی سطح سایش، ب) تصویر الکترون های برگشتی ج) مورفولوژی ذرات سایش یافته، د) آنالیز سطح سایش و ح) مورفولوژی سطح سایش در بزرگنمایی پایین در نمونه شماره ۱

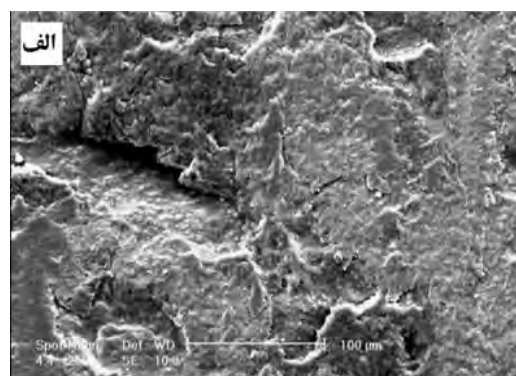
شکل ۱۱، سطوح سایش یافته نمونه شماره ۵ را با الکترونهای SE و BS در بزرگنمایی های مختلف نشان می‌دهد. در سطح سایش، تغییر شکل پلاستیکی نیز رخ داده است که نتیجه این تغییر شکل پلاستیکی، ایجاد اتصالات موضعی در نواحی تماس است. به عبارت بهتر، جدایش فلز آهن از پین ۵۲۱۰۰ و چسبیدن به سطح سایش رخ داده است که با استناد به تصویر BS، و اختلاف رنگ در زمینه





شکل ۱۱. الف) مورفولوژی سطح سایش، ب) تصویر الکترون های برگشتی، ج) مورفولوژی ذرات سایش یافته، د) آنالیز EDS مربوط به نقاط دارای اکسید آهن و ح) مورفولوژی سطح سایش در بزرگنمایی پایین در نمونه شماره ۵

می‌توان توجیه نمود. اختلاف رنگ بین نیکل و آهن توسط هوا^۱ و همکاران به اثبات رسیده است. چنان که هو و همکارانش لایه اکسید آهن را به مناطق خاکستری پر رنگ در تصاویر الکترون‌های برگشتی علامت گذاری شده نسبت داده‌اند [۳۱]. گزارشات نشان داده است که این مناطق، در اثر تماس با هوا به اکسید آهن تبدیل می‌شوند و میزان کاهش وزن در حین آزمون سایش را تا حدودی کاهش می‌دهند [۳۲]. علاوه بر این مشابه با نمونه ۱، با توجه به اثر روانکاری نقره و شیارهای ایجاد شده بر روی سطح قطعه (شکل ۱۱ ح)، مکانیزم سایش خراشان نیز قابل مشاهده است. نتیجه کلی آن که در این نمونه هر دو مکانیزم سایش چسبان و خراشان مشاهده شد. تغییر شکل پلاستیکی در اطراف شیارها کم است و میزان حجم ذرات سایش از شیارهای ایجاد شده به مراتب بیشتر است [۷ و ۳۰]. در ذرات سایشی این نمونه (شکل ۱۱ ج)، کلیه ذرات گرد و یکنواخت بودند و اثری از ذرات ورقه ای مشاهده نشد و مقدار آن نیز در مقایسه با ذرات سایشی نمونه شماره ۱ (شکل ۱۰ ج) کمتر بود. در تصویر ۱۰ ب- پدیده پهن شدگی ذرات نقره نیز مشابه با نمونه شماره ۵ در برخی نقاط قابل مشاهده است. اما در کل نمونه مقدار آن بسیار کم بود.



¹ Huo

بهینه‌سازی به روش تاگوچی

در روش تاگوچی جهت بهینه کردن از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. ترم سیگنال نشان دهنده اثر مطلوب برای مشخصه خروجی و ترم نویز، اثر نامطلوب برای مشخصه خروجی است. این نسبت از رابطه ۲ بدست می‌آید [۲۰ و ۲۲].

$$\text{رابطه ۲} [۲۰ و ۲۲] \left(\frac{S}{N}\right)_i = -10 \text{Log}_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Y_i^2}\right) \right]$$

Y_i مقدار پاسخ اندازه گیری شده در i امین آزمایش و n تعداد تکرارهای هر آزمایش است. این رابطه برای مشخصه کیفی هر چه کوچکتر بهتر استفاده می‌شود.

به کمک نرم افزار Minitab نمودار سیگنال به نویز بر حسب فاکتورها یعنی غلظت نقره، دانسیته جریان، زمان آبکاری و نوع افزودنی محاسبه شد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بیشینه عدد در نمودار سیگنال به نویز به عنوان مقدار بهینه شناخته می‌شود. غلظت نقره 50 mg/L ، دانسیته جریان 4 A/dm^2 ، زمان آبکاری ۲ ساعت و افزودنی نوع تریتون به عنوان پارامترهای بهینه به دست آمدند.

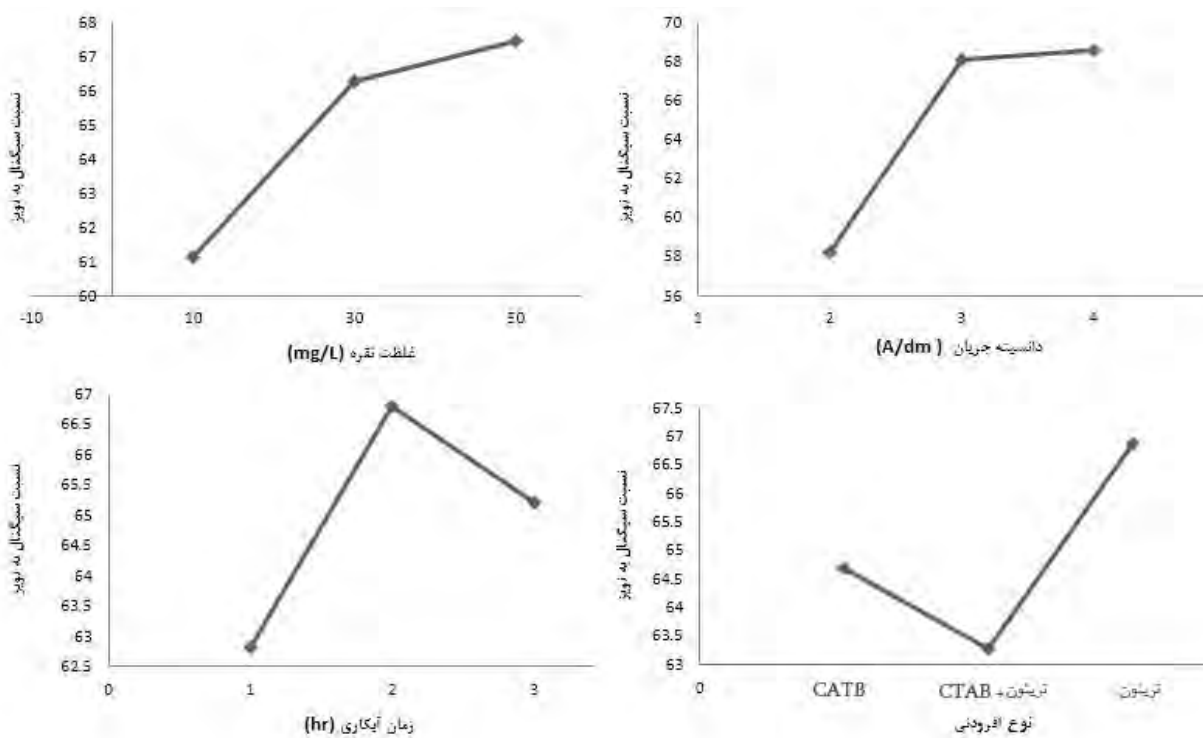
نمونه بهینه با همین شرایط تهیه شد. بررسی‌های انجام شده نشان داد، نرخ سایش نمونه بهینه 14 N.m/mm^3 می‌باشد. نمودارهای نرخ سایش و ضریب اصطکاک بر حسب مسافت این نمونه به در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که نرخ سایش تقریباً به نمونه‌هایی که کمترین نرخ سایش را داشته‌اند نزدیک است. تفاوت چندانی بین نمونه بهینه و نمونه شماره ۵ که بهترین نرخ سایش را داشت وجود ندارد و این به معنی نزدیک شدن به هدف یعنی کمترین نرخ سایش می‌باشد. علاوه بر این، روند تغییرات ضریب اصطکاک تقریباً در محدوده $0/4$ تا $0/6$ تغییر می‌کند. این ضریب اصطکاک توسط علیرضایی و همکارانش در پوشش خود روانکار Ni-P-Ag نیز گزارش شده است [۱۵]. همچنین نمونه بهینه دارای سختی ۳۱۲ ویکرز،

ضخامت متوسط ۸۲ میکرون و زبری متوسط $24/63 (R_a)$ میکرون می‌باشد.

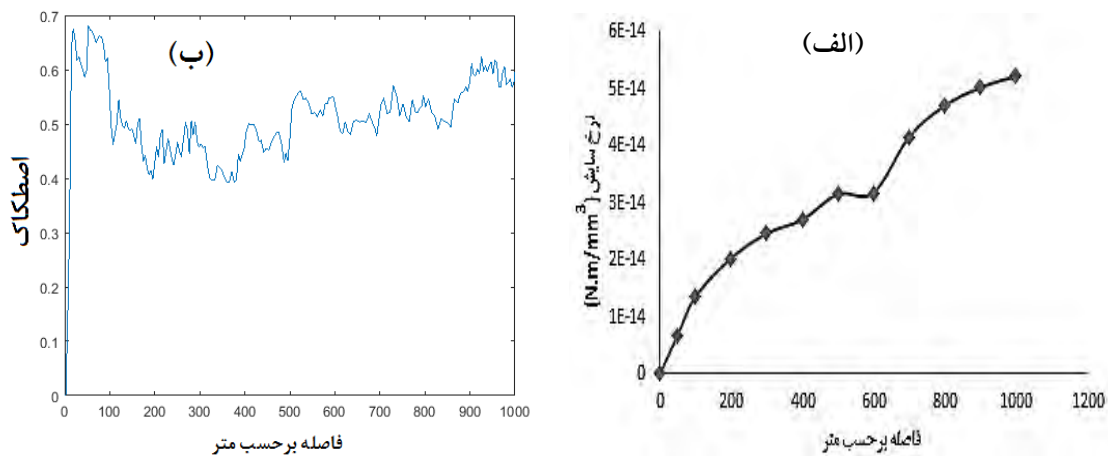
آنالیز واریانس به منظور تعیین مهمترین پارامتر تأثیر گذار بر نرخ سایش از لحاظ آماری انجام شد. مقادیر نسبت واریانس و درصد مشارکت^۱ برای هر پارامتر نشان دهنده تأثیر پارامتر ورودی بر پاسخ‌ها می‌باشند. برای آن که نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) قابل تعمیم باشد، باید سه شرط اصلی نرمال بودن، پراکندگی و مستقل بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد [۳۳]. تعیین این سه مقدار به کمک نرم افزار Minitab انجام شد. شکل ۱۴- الف درصد نرمال بودن داده‌ها را نشان می‌دهد. نرمال بودن داده‌ها به این معناست که توزیع اعداد پیوسته بوده و حول میانگین خود متقارن هستند. بر اساس نمودار شکل ۱۵-الف هر چه انطباق نقاط با خط مورب بیشتر باشد، نرمال بودن داده‌ها نیز بیشتر است. در شکل ۱۴-ب مشاهده می‌شود که نقاط داده‌ها در کل نمودار به صورت پراکنده توزیع شده‌اند و شرط پراکندگی در مورد داده‌ها صادق است. با توجه به شکل ۱۴-ج داده‌های به دست آمده کاملاً مستقل هستند. علت آن عدم تبعیت مسیر داده‌ها از رابطه خاصی می‌باشد. به عبارت بهتر نمی‌توان داده‌ها را فرموله کرد.

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای لگاریتم پاسخ‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. بایستی به این نکته توجه داشت، درصد مشارکت که برای مقایسه بهتر نتایج این مورد به صورت نمودار دایره‌ای نشان داده شده است (شکل ۱۵) از تقسیم مجموع مربعات هر عامل به مجموع مربعات کل به دست می‌آید. عدد معیار F از تقسیم میانگین مجموع مربعات به مجموع مربعات خطا حاصل می‌شود. سپس از روی جداول آماری مقدار P از عدد F تعیین می‌شود. اصولاً در فعالیت‌های مهندسی برای اطمینان از مشارکت یک پارامتر یا فاکتور در نتایج آزمون، باید به مقدار P توجه نمود که کمتر از $0/05$ باشد.

¹ Percentage of contribution



شکل ۱۲. نسبت سیگنال به نویز برای سایش



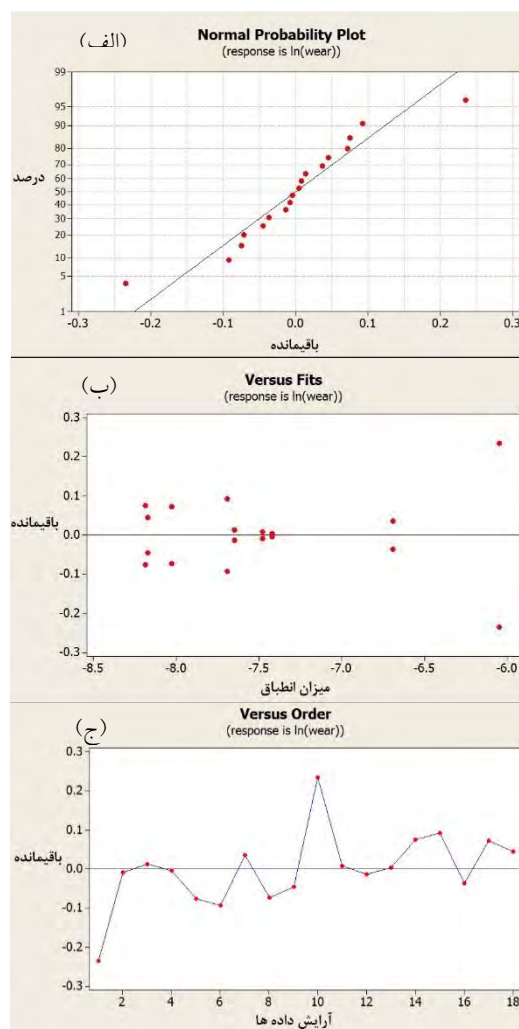
شکل ۱۳. نمودارهای الف) نرخ سایش و ب) ضریب اصطكاك بر حسب مسافت سایش مربوط به نمونه بهینه

غلظت نقره به علت ایجاد خواص خود روانکاری در نمونه‌ها تأثیر چشمگیر - البته نه به اندازه دانسیته جریان- دارد. ذرات نقره در محل سایش یافته پهن می‌شوند و بنابراین روانکاری سطح را بهبود می‌بخشند [۱۲]. زمان آبرکاری نیز از آن جهت اهمیت دارد که تعیین کننده ضخامت پوشش است. همانطوری که از نتایج آنالیز واریانس استنباط می‌شود، ضخامت پوشش و به عبارت بهتر، زمان آبرکاری در نرخ سایش تأثیر چشمگیری ندارند و بر اساس شکل ۱۵، تنها ۷ درصد بر نرخ سایش تأثیر خواهند گذاشت. از لحاظ متالورژیکی نیز تأثیر مستقیمی گزارش نشده است.

مدل سازی داده‌های سایش

با توجه به نمودار درصد مشارکت شکل ۱۵، از دو پارامتری که بیشترین اثر را در سایش نمونه‌ها داشتند استفاده شد. پارامترهای دانسیته جریان با ۶۴ درصد مشارکت و غلظت نقره با ۲۱ درصد مشارکت به عنوان پارامترهای برگزیده انتخاب شدند. همچنین با توجه نمونه بهینه زمان ۲ ساعت و افزودنی نوع تریتون به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. در جدول ۸ مقادیر مربوط به حجم سایش یافته بدست آمده برای حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده گزارش شده است. برای بررسی کارایی مدل از محاسبه ضریب تشخیص^۱ (R^2) استفاده شد. نزدیک بودن مقدار R^2 به عدد ۱ کارایی مناسب شبکه را نشان می‌دهد [۲۳]. این عدد برای داده‌های سایش ۰/۹۶۳ به دست آمد که نشان می‌دهد نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی منطبق هستند.

با توجه به عدد F برای هر نمونه در جدول، چنان استنباط می‌شود که کلیه پارامترها بر نتایج آزمون سایش موثر هستند، اما بیشترین میزان مشارکت پارامترها مربوط به پارامتر دانسیته جریان است. در ادامه غلظت نقره در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرد. دانسیته جریان به دلیل ایجاد جریان در قله‌ها، منجر به افزایش زبری در نمونه‌ها می‌شود و از این رو خواص سایشی را کاهش می‌دهد. هم چنین دانسیته جریان با تغییر در سختی از طریق تغییر میزان تخلخل و تنش داخلی می‌تواند بر نوع مکانیزم سایش و در نتیجه میزان سایش اثر بگذارد [۲۹].

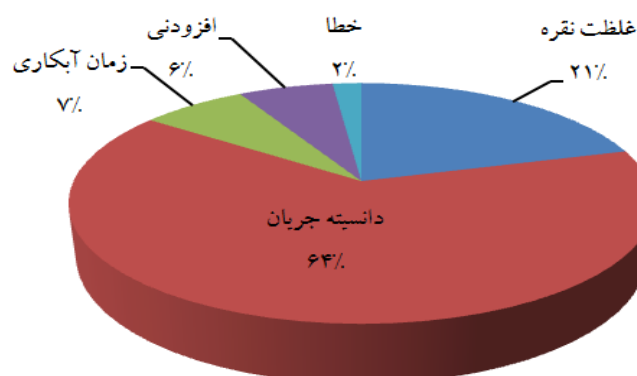


شکل ۱۴. نمودارهای الف) احتمال نرمال بودن، ب) میزان پراکندگی و ج) میزان مستقل بودن داده‌ها

¹ A symbol for the coefficient of determination

جدول ۷- نتایج پاسخ‌های مختلف آنالیز واریانس برای نرخ سایش

مقدار P (P-Value)	نسبت F (F-Ratio)	میانگین مجموع مربعات Adj. mean sum (of squares)	مجموع مربعات Sum of (squares)	درجه آزادی Degree of (freedom)	پارامترها (Parameters)
۰/۰۰۰۴	۴۹/۰۱	۰/۵۸۲۹	۱/۷۰۵۸	۲	درصد نقره در محلول (mg/L)
۰/۰۰۰۸	۱۵۲/۲۴	۲/۶۴۹۴	۵/۲۹۸۹	۲	دانسیته جریان (A/dm ²)
۰/۰۰۱	۱۶/۵۰	۰/۲۸۷۱	۰/۵۷۴۱	۲	زمان آبکاری (hr)
۰/۰۰۱	۱۴/۸۴	۰/۲۵۸۲	۰/۵۱۶۵	۲	افزودنی (mg/L)
		۰/۰۱۷۴	۰/۱۵۶۶	۹	خطا
			۸/۲۵۱۹	۱۷	کل



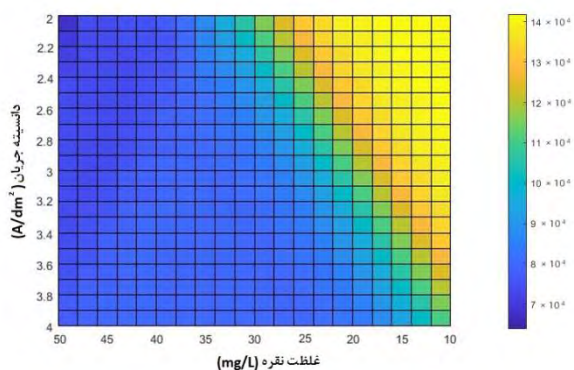
شکل ۱۵. درصد مشارکت هر پارامتر در میزان سایش

کاهش دانسیته جریان تا $3A/dm^2$ باعث بهبود عملکرد سایشی پوشش می‌گردد و بالا بردن دانسیته جریان تأثیری بر نرخ سایش ندارد. در دانسیته جریان های پایین (مثلاً $2A/dm^2$) افزایش غلظت نقره منجر به کاهش نرخ سایش می‌گردد. همانگونه که انتظار می‌رفت، افزایش مقدار نقره باعث تشکیل لایه تریبو فیلم بیشتر روی سطح سایش و در نتیجه عملکرد بهتر نمونه خواهد شد. این در حالی است که افزایش مقدار نقره در دانسیته جریان های بالاتر از $3A/dm^2$ تأثیری بر نرخ سایش ندارد. به عبارت بهتر خواص پوشش در دانسیته جریان های بالاتر ناشی از خواص زمینه پوشش خواهد بود و تأثیر ذرات کامپوزیتی نقره به حداقل می‌رسد.

همچنین همان گونه که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، داده‌های مدل با میزان خطای مناسبی از مقدار واقعی

منحنی‌های کانتور دو بعدی و رویه سه بعدی حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی مربوط به داده‌های کاهش حجم ناشی از سایش در شکل ۱۶ ارائه شده است. داده‌های جدول ۶ به کمک رابطه شماره ۱ به نرخ سایش تبدیل شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، رنگ زرد بیشترین نرخ سایش را نشان می‌دهد و رنگ آبی مربوط به کمترین نرخ سایش است.

با توجه به گراف رویه به دست آمده چنین استناد می‌شود که افزایش غلظت نقره و دانسیته جریان منجر به کاهش نرخ سایش می‌گردد. این مورد به دلیل خاصیت خود روانکاری نقره و تشکیل لایه تریبو فیلم روی سطح به عنوان ذره کامپوزیتی می‌باشد [۱۲ و ۱۵]. از طرف دیگر دانسیته جریان به عنوان عامل ایجاد میدان الکتریکی بر نشست ذرات نقره درون پوشش اثر می‌گذارد. به طوری که



شکل ۱۶. منحنی های الف) رویه و ب) کانتور مربوط به داده های حاصل از مدل سایش

نتیجه‌گیری

۱- تغییرات دانسیته جریان و غلظت نقره بر نوع و کیفیت مورفولوژی پوشش کامپوزیتی نیکل-نقره اثرگذار است و افزایش دانسیته جریان و افزودن نقره، شکل مورفولوژی را از حالت هرمی به حالت کروی در می‌آورد.

۲- طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای دستیابی به کمترین نرخ سایش پوشش کامپوزیتی نیکل-نقره نشان داد که شرایط دستیابی به پوشش بهینه با استفاده از حمام آبکاری حاوی نقره ۵۰ mg/L و افزودنی نوع تریتون و آبکاری الکتریکی با دانسیته جریان 4 A/dm^2 به مدت ۲ ساعت بدست می‌آید.

۳- نمونه بهینه شده دارای سختی ۳۱۲ ویکرز، زبری $24/6$ میکرون، نرخ سایش $5/2039 \times 10^{-14} \text{ N.m/mm}^3$ و ضخامت ۸۲ میکرون است.

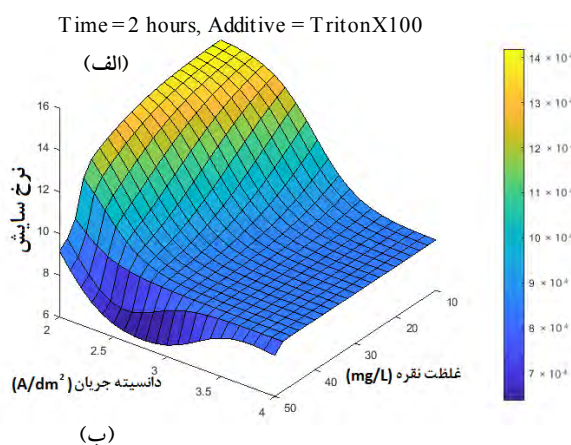
۴- مکانیزم سایش غالب نمونه شماره ۱ نوع خراشان و مکانیزم غالب نمونه ۵ چسبان می‌باشد، این موضوع با استناد به تصاویر سایش، ضخامت پوشش و مقدار کاهش وزن قابل توجیه است.

۵- به کمک آنالیز واریانس مشخص شد که بیشترین درصد مشارکت در بین پارامترهای آبکاری بر سایش پوشش کامپوزیتی نیکل-نقره به ترتیب مربوط به دانسیته جریان (۶۴ درصد) و میزان نقره (۲۱ درصد) می‌باشد.

اختلاف دارند. این خطا در برخی داده‌ها به صفر نیز رسیده است. می‌توان گفت که مقدار خطا در داده‌های ابتدایی به دلیل انحرافی است که در اثر پارامترهای بررسی نشده رخ می‌دهد. به عبارت بهتر با بررسی پارامترهای افزودنی و زمان آبکاری که میزان مشارکت آن‌ها کمتر است (شکل ۱۵) می‌توان انحراف را کمتر نمود. اما باز هم خطا را به صفر نمی‌توان رسانید و این به علت وجود خطا در ارزیابی واریانس اولیه است.

جدول ۸. مقایسه حجم سایش یافته از مدل و حجم سایش یافته واقعی

شماره آزمایش	حجم سایش یافته واقعی (mm^3)	حجم سایش یافته از مدل (mm^3)	درصد خطا
۱	۰/۰۰۱۸۷۵	۰/۰۰۲۲۳۲	۱۹/۰۹
۲	۰/۰۰۰۵۶۱	۰/۰۰۰۶۴۳	۱۴/۶
۳	۰/۰۰۰۴۸۳	۰/۰۰۰۴۷۶	۱/۴۳
۴	۰/۰۰۰۵۹۵	۰/۰۰۰۵۹۵	۰/۰۰
۵	۰/۰۰۰۲۵۸	۰/۰۰۰۲۵۸	۰/۰۰
۶	۰/۰۰۰۴۱۵	۰/۰۰۰۴۱۵	۰/۰۰
۷	۰/۰۰۱۲۹۱	۰/۰۰۱۲۹۱	۰/۰۰
۸	۰/۰۰۰۳۰۳	۰/۰۰۰۳۰۳	۰/۰۰
۹	۰/۰۰۰۲۶۹	۰/۰۰۰۲۶۹	۰/۰۰



nano and micro SiC particle, *Electrochimica Acta*, 50 (2005) 4544-4550.

9. H. Gul, F. Kılıç, S. Aslan, A. Alp and H. Akbulut, *Characteristics of electro-co-deposited Ni-Al₂O₃ nano-particle reinforced metal matrix composite (MMC) coatings*, *Wear*, 267 (2009) 976-990.

10. M. Alizadeh, M. Mirak, E. Salahinejad, M. Ghaffari, R. Amini and A. Roosta, *Structural characterization of electro-codeposited Ni-Al₂O₃-SiC nanocomposite coatings*, *Alloy Compd*, 611 (2014) 161-166.

11. A. Rouhollahi, O. Fazlollahzadeh, A. Dolati and F. Ghahramanifard, *Effects of different surfactants on the silica content and characterization of Ni-SiO₂ nanocomposites*, *J Nanostruct*, 12 (2018) 1-14.

12. B. G. An, L. Li and H. X. Li, *Electrodeposition in the Ni-plating bath containing multi-walled carbon nanotubes*, *Mater Chem Phys*, 110 (2008) 481-485.

13. E. S. Guler, E. Konca, and I. Karakaya, *Effect of electrodeposition parameters on the current density of hydrogen evolution reaction in Ni and Ni-MoS₂ composite coatings*, *Int. J. Electrochem. Sci*, 8 (2013) 5496-5505.

14. S. Alirezaei, S. M. Monirvaghefi, M. Urgen, A. Saatchi and K. Kazmanli, *Novel investigation on nanostructure Ni-P-Ag composite coatings*, *Appl Surf Sci*, 261 (2012) 155-158.

15. S. Alirezaei, S. M. Monirvaghefi, A. Saatchi, M. Urgen and K. Kazmanli, *Novel investigation on tribological properties of Ni-P-Ag-Al₂O₃ hybrid nanocomposite coatings*, *Tribol Int*, 62 (2013) 110-116.

16. M. P. Kumar and C. Srivastava, *Morphological and electrochemical characterization of electrodeposited Zn-Ag nanoparticle composite coating*, *Mater Charact*, 85 (2013) 82-91.

17. M. Schlesinger, M. Paunovic, *Modern Electroplating*, Fifth edition, 2010.

18. G. Banfalvi, *Permeability of Biological Membranes*, First edition, 2016.

19. D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Sixth edition, 2012.

۶- منحنی‌های رویه بدست آمده به کمک شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که نرخ سایش در دانسیته جریان ۳A/dm² کمترین مقدار را دارد و این شرایط در غلظت های نقره بالاتر از ۳۰ mg/L اتفاق می‌افتد.

مراجع

1. Z. Song, Z. Xie, L. Ding and Y. Zhang, *Corrosion resistance of super-hydrophobic Coating on AZ31B Mg Alloy*, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 13 (2018) 6190-6200.

2. Y. E. Sknar, O. O. Savchuk and I. V. Sknar, *Characteristics of electrodeposition of Ni and Ni-P alloys from methanesulfonate electrolyte*, *Applied Surface Science*, 423 (2017) 340-348.

3. G. F. Huang, W. Q. Huang, L. L. Wang and B. Zou, *Effects of complexing agents on the corrosion resistance of electroless Ni-Fe-P alloys*, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2 (2007) 321-328.

4. R. Offoiach, M. Lekka, A. Lanzutti, C. de Leitenburg and L. Fedrizzi, *Production and microstructural characterization of Ni matrix composite electrodeposits containing either micro-or nano-particles of Al*, *Surface and Coatings Technology*, 309 (2017) 242-248.

5. S. Arai, A. Fujimori, M. Murai and M. Endo, *Excellent solid lubrication of electrodeposited nickel-multiwalled carbon nanotube composite films*, *Materials letters*, 62 (2008) 3545-3548.

6. H. Gul, F. Kılıç, M. Uysal, S. Aslan, A. Alp and H. Akbulut, *Effect of particle concentration on the structure and tribological properties of submicron particle SiC reinforced Ni metal matrix composite (MMC) coatings produced by electrodeposition*, *Applied Surface Science*, 258 (2012) 4260-4267.

7. M. R. Vaezi, S. K. Sadrnezhaad and L. Nikzad, *Electrodeposition of Ni - SiC nanocomposite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics*, *Colloids and surfaces A*, 315 (2008) 176-182.

8. P. Gyftou, M. Stroumbouli, E. A. Pavlatou, P. Asimidis and N. Spyrellis, *Tribological study of Ni matrix composite coatings containing*

۳۰. ش. علیرضایی و ف. طباطبایی، ارزیابی و مقایسه رفتار تریبوخوردگی پوشش‌های الکترولس Ni-B و Ni-P، علوم و مهندسی سطح، ۳۲ (۱۳۹۶) ۸۷-۸۱.
31. K. H. Hou, M. C. Jeng and M. D. Ger, *A study on the wear resistance characteristics of pulse electroforming Ni-P alloy coatings as plated*, Wear, 262 (2007) 833-844.
32. K. H. Hou, M. D. Ger, L. M. Wang and S. T. Ke, *The wear behaviour of electrocodeposited Ni-SiC composites*, Wear, 253 (2002) 994-1003.
33. J. Sharma, B. S. Sidhu and R. Gupta, *Determination of the optimum conditions for salt bath ferritic Nitrocarburizing process of AISI 1018 Steel using ANOVA method*, JoTCSTA, 5 (2018) 1-7.
20. P. Sahoo, *Wear behaviour of electroless Ni-P coatings and optimization of process parameters using Taguchi method*, Mater Dsgn, 30 (2009) 1341-1349.
21. X. Yuan, D. Sun, H. Yu, H. Meng, Z. Fan and X. Wang, *Preparation of amorphous-nanocrystalline composite structured Ni-P electrodeposits*, Surf Coat Tech, 202 (2007) 294-300.
22. J. L. Rosa, A. Robin, M. B. Silva, C. A. Baldan and M. P. Peres, *Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach*, J Mater Process Tech, 209 (2009) 1181-1188.
23. A. M. Khorasani, M. Faraji and A. Kootsookos, *CVD and PVD coating process modelling by using artificial neural networks*, Artif Intel Res, 1 (2012) 41-46.
24. Z. Ren, N. Meng, K. Shehzad, Y. Xu, S. Qu, B. Yu and J. K. Luo, *Mechanical properties of nickel-graphene composites synthesized by electrochemical deposition*, Nanotechnology, 26 (2015) 65-69.
25. Y. D. Gamburg, G. Zangari, *Theory and Practice of Metal Electrodeposition*, Springer Sci, 2011.
26. S. Pathak, M. Guinard, M. G. Vernooij, B. Cousin and L. Philippe, *Influence of lower current densities on the residual stress and structure of thick nickel electrodeposits*, Surf Coat Tech, 205 (2011) 3651-3657.
27. W. Chen and W. Gao, *Sol-enhanced electroplating of nanostructured Ni-TiO₂ composite coatings—The effects of sol concentration on the mechanical and corrosion properties*, Electrochim Acta, 55 (2010) 6865-6871.
28. S. Vallar, D. Houivet, J. El Fallah, D. Kervadec and J. M. Haussonne, *Oxide slurries stability and powders dispersion: optimization with zeta potential and rheological measurements*, Eur Ceram Soc, 19 (1999) 1017-1021.
29. N. S. Qu, D. Zhu, k. C. Chan and W. N. Lei, W. N. (2003), *Pulse electrodeposition of nanocrystalline nickel using ultra narrow pulse width and high peak current density*, Surf Coat Tech, 168 (2003) 123-128.