

## مقاله پژوهشی

# تأثیر غلظت نانوذرات تیتانیا بر ریزساختار، رفتار تریبولوژیکی و خواص مکانیکی پوشش‌های پر مالوی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> تهیه شده به روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی

ابراهیم یوسفی<sup>۱</sup>، احسان بهادری یکتا<sup>۱\*</sup> و احمد ایران‌نژاد<sup>۱</sup>

۱- بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- انجمن پژوهشگران جوان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۰۷/۲۱

## چکیده

در این پژوهش پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> به روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی (PC) تولید شد و تأثیر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> بر مورفولوژی، ترکیب شیمیایی، سختی، زبری، ضخامت و رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های مذکور بررسی شد. بدین منظور مورفولوژی سطحی، مکانیزم سایش و ترکیب شیمیایی پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عنصری طیف‌سنجی توزیع انرژی پرتو ایکس (EDS) مطالعه گردید. جهت بررسی سختی و زبری سطحی از میکروسختی‌سنج ویکرز و دستگاه زبری‌سنج استفاده شد. نتایج نشان داد که در غلظت‌های پایین‌تر، پوشش‌ها دارای مورفولوژی گل کلمی ریز با گره‌های متراکم و منظم هستند. همچنین مشاهده گردید که غلظت نانوذرات تأثیر مثبتی بر کاهش اندازه دانه‌ها داشته و موجب تشکیل یک ساختار نانوکریستال و ریزدانه می‌گردد. با افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub>، ضریب اصطکاک و نرخ سایش کاهش پیدا کرد و در نتیجه مقاومت به سایش افزایش یافت. با افزودن نانوذرات TiO<sub>2</sub> به زمینه پر مالوی نیکل-آهن، شیارهای سایشی و مقدار ذرات سائیده شده بر روی سطح پوشش‌ها کاهش یافت، و مکانیزم حاکم بر سایش دوگانه خراشان-چسبان در پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> مشاهده گردید.

**واژه‌های کلیدی:** پوشش پر مالوی، نانوکامپوزیت، رسوب‌دهی الکتریکی، جریان پالسی، مکانیزم سایش.

## ۱- مقدمه

چشمگیری پیدا کرده‌اند. از مهمترین کاربردهای پوشش‌های فرومغناطیسی می‌توان به ضبط و ثبت‌کننده‌های مغناطیسی اطلاعات، قطعات کامپیوتری مانند هدهای نویسنده و خواننده مغناطیسی، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نظیر

امروزه پوشش‌های مغناطیسی در صنایع الکترونیک، هوافضا، علوم پزشکی و زیست‌فناوری، کاربردهای روزافزون و

\* عهده‌دار مکاتبات: احسان بهادری یکتا

نشانی: بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تلفن: ۰۳۴-۳۲۱۱۴۰۵۳، دورنگار: ۰۳۴-۳۲۱۱۴۰۵۳، پست الکترونیکی: eh.bahadori@gmail.com

با مواد میکروساختار هستند [۱۳-۸،۱۱-۴]. پوشش‌های کامپوزیتی در سال‌های اخیر به دلیل برخورداری از خواص مطلوبی مانند مقاومت به سایش و خوردگی، سختی بالا و پایداری حرارتی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر ریزساختار و خواص پوشش‌های کامپوزیتی نانو ساختار غلظت، اندازه، شکل، توزیع و ماهیت نانو ذرات تقویت کننده می‌باشد. نانو ذرات کاملاً توزیع شده در کامپوزیت‌ها، علاوه بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی، موجب توسعه استفاده از نانو کامپوزیت‌ها در کاربردهای پیشرفته و مواد مهندسی نوین گردیده است [۱۳-۱۱، ۶-۳]. رسوب‌دهی الکتریکی پوشش‌های کامپوزیتی بر پایه فرآیند رسوب‌دهی مشترک می‌باشد. رسوب‌دهی مشترک، فرآیند وارد نمودن ذرات ریز فلزی، ترکیبات غیرفلزی و یا پلیمرها از طریق الکترولیت و یا حمام غیرالکتریکی (شیمیایی) به درون لایه رسوب (پوشش) به منظور بهبود ویژگی‌های ماده نظیر رفتار سایشی، سختی، مقاومت به خوردگی، روانکاری، استحکام کششی و شکست می‌باشد [۱۶-۱۴]. در پوشش‌های کامپوزیتی با زمینه نیکل-آهن، هم‌رسوبی ذرات خنثی باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی این پوشش‌ها می‌گردد و از آنجائیکه پوشش‌های کامپوزیتی حاصله هم‌زمان هم مزایای پوشش زمینه و هم مزیت‌های ذرات سخت را دارند، پوشش‌های نانو کامپوزیتی با زمینه نیکل-آهن خواص فوق‌العاده‌ای را نسبت به پوشش‌های آلیاژی نیکل-آهن از خود نشان می‌دهند [۱۷-۴]. به منظور تولید پوشش‌ها و لایه‌های نازک مغناطیسی، روش‌های مختلفی مانند سل-ژل، رسوب فیزیکی و شیمیایی فاز بخار، کندوپاش و رسوب‌دهی تحت خلاء وجود دارند، که در این میان روش رسوب‌دهی الکتریکی یا همان آبکاری الکتریکی مزایای زیادی نسبت به سایر روش‌های تولید مواد نانو ساختار دارد و یکی از فرآیندهای منحصربفرد و پرکاربرد به منظور تولید پوشش‌های نانو کامپوزیتی با زمینه فلزی محسوب می‌شود. در دهه‌های گذشته، روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان مستقیم (DC) بطور گسترده‌ای به منظور

میکروموتورها و میکروچرخنده‌ها اشاره کرد [۵-۱]. یکی از مهمترین مواد پیشرفته مغناطیسی، آلیاژهای بر پایه سیستم نیکل-آهن هستند که با نام تجاری پرمالوی شناخته می‌شوند. پوشش‌های آلیاژی نیکل-آهن، جزء دسته پوشش‌های مغناطیسی نرم شناخته می‌شوند و بیشترین کاربرد در صنایع پیشرفته الکترونیکی و مواد مهندسی نوین را به خود اختصاص داده‌اند. در دهه اخیر توجه زیادی به مطالعه آلیاژهای پرمالوی مانند آلیاژ ۸۰٪ نیکل-۲۰٪ آهن شده است، که علت آن گسترش استفاده از این مواد در کاربردهای الکترونیکی مانند سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) می‌باشد [۸-۶]. در چنین کاربردهایی علاوه بر خاصیت مغناطیسی، پوشش‌ها و قطعات مذکور باید دارای خواص مکانیکی مورد نیاز خصوصاً مقاومت به سایش، سختی و چسبندگی مناسب پوشش به زیرلایه نیز باشند. اما با وجود اینکه این پوشش‌ها خواص مغناطیسی مطلوبی دارند، بکارگیری این دسته از آلیاژها به دلیل خواص مکانیکی نامطلوب و ضعیف همواره با محدودیت روبرو بوده است [۱۰-۶]. بنابراین بهبود خواص مکانیکی و رفتار سایشی در کنار خاصیت مغناطیسی مطلوب باید در طراحی و ساخت این پوشش‌ها در نظر گرفته شود. تحقیقات نشان داده است که استفاده از عناصر آلیاژی به عنوان عنصر سوم، و یا افزودن ذرات سرمایی به عنوان یک جزء تقویت کننده به زمینه پوشش‌های مغناطیسی نرم نیکل-آهن، موجب بهبود خواص مکانیکی و بهینه‌سازی رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های آلیاژی و کامپوزیتی حاصله می‌گردد [۱۲-۸، ۶، ۴]. امروزه تحقیقات زیادی در حوزه تولید پوشش‌های کامپوزیتی نانو ساختار با هدف دستیابی به خواص مغناطیسی مطلوب مانند مغناطش اشباع بالا و وادارندگی کم، خواص مکانیکی عالی مانند مقاومت به سایش و سختی‌پذیری، و همچنین ترکیب شیمیایی و ریزساختار مورد نظر، در حال انجام است. بطور کلی مواد نانو ساختار به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، دارای ویژگی‌های منحصربفردی مانند خواص مغناطیسی، سختی، رفتار سایشی و مقاومت به خوردگی بهتری در مقایسه

$$f = 1/T_{ON} + T_{OFF} \quad (۲)$$

تحقیقات نشان داده است که نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) تقویت شده با نانوذرات  $TiO_2$ ، به علت استحکام بخشی حاصل از ریزدانگی و استحکام بخشی توزیعی ناشی از حضور نانوذرات تیتانیا ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت به خوردگی خوبی از خود نشان می‌دهند [۳،۶،۱۷]. چنگ (Cheng) در سال ۲۰۱۲ خواص پوشش‌های کامپوزیتی آهن-نیکل-تیتانیا و نحوه تهیه آن‌ها را با فرآیند مستقیم بررسی نمود. نتایج نشان داد هنگامی که غلظت ذرات  $TiO_2$  در حمام ۳ گرم بر لیتر می‌باشد، بالاترین میزان سختی و بهترین مقاومت به خوردگی حاصل می‌گردد [۱۸]. تراب‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۶ پوشش‌های چند لایه نیکل-آهن-آلومینا را با استفاده از روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی تولید کردند و نتایج نقش مثبت فرکانس اعمالی در بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی پوشش‌ها را نشان داد [۴]. همچنین یوسفی و همکاران در سال ۲۰۱۸ گزارش دادند که استفاده از نانوذرات  $TiO_2$  موجب تولید پوشش‌های پرمالوی (Permalloy) آهن-نیکل با خواص مغناطیسی مطلوب و رفتار تریبولوژیکی منحصربفردی می‌گردد [۶]. رسولی و همکاران در سال ۲۰۲۰ تأثیر بین غلظت نانوذرات  $Cr_2O_3$  تعیین شده در الکترولیت و خصوصیات مکانیکی و خوردگی پوشش زمینه آلیاژی نیکل-آهن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین خواص مکانیکی در پوشش‌های رسوب‌دهی شده از حمام حاوی نانوذرات با مقدار ۶ گرم در لیتر  $Cr_2O_3$  حاصل می‌گردد و میانگین ضریب اصطکاک به ۰/۱۵ کاهش یافت [۱۹]. صفوی و همکاران در سال ۲۰۲۰ از نانوذرات  $Y_2O_3$  به عنوان ماده تقویت کننده همراه با گلیسرول به عنوان یک افزودنی الکترولیتی با هدف بهبود مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های نیکل-آهن استفاده کردند.

تولید پوشش‌های کامپوزیتی و آلیاژی مورد استفاده بوده است. اما در سال‌های اخیر به منظور بهبود خواص مکانیکی و مشخصات ساختاری، روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۶-۱۴، ۶-۳]. در روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان مستقیم (DC)، تنها یک پارامتر یعنی چگالی جریان را می‌توان تغییر داد. اما در فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی (PC)، انعطاف‌پذیری بسیار بیشتری در فرآیند با تغییر متغیرهای اصلی از جمله پیک دانسیته جریان ( $I_p$ )، زمان فعال بودن جریان ( $T_{ON}$ ) و زمان قطع بودن جریان ( $T_{OFF}$ ) وجود دارد، که این امر منجر به دستیابی به ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و مشخصات ریزساختاری منحصربفردی می‌گردد. از مهمترین ویژگی‌های روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی می‌توان به تولید پوشش‌های ریزدانه‌تر، با تخلخل و تنش کمتر، چسبندگی بالاتر، نرخ رسوب‌گذاری بالاتر، امکان تولید پوشش‌هایی با ضخامت یکنواخت، و همچنین با ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی کنترل شده اشاره کرد [۱۵، ۷-۳]. به منظور درک جامع از فرآیند با جریان پالسی، پارامترهای تأثیرگذار بر این فرآیند شامل پیک دانسیته جریان ( $I_p$ )، زمان فعال بودن PC یا همان زمان روشن ( $T_{ON}$ )، زمان قطع بودن جریان پالسی یا همان زمان خاموش ( $T_{OFF}$ )، فرکانس پالس ( $f$ ) و سیکل کاری ( $d$ ) را بایستی مورد مطالعه قرار داد. پیک دانسیته جریان، مقدار جریان عبوری در طول زمان روشنی را نشان می‌دهد. چرخه کاری یا همان سیکل کاری نیز در محدوده ۱۰۰-۱٪ است. در تکنیک PC که جریان قطع و وصل می‌شود، چرخه کاری متناسب با درصدی از زمان است که طی یک سیکل روشن است. همچنین فرکانس پالس، معادل معکوس زمان یک سیکل است. پارامترهای سیکل کاری و فرکانس پالس به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند [۷-۳].

$$d = T_{ON}/T_{ON} + T_{OFF} \times 100 \quad (۱)$$

از شرکت U.S Nano materials research تهیه شد. در مهندسی سطح و تولید فیلم‌های نازک، به منظور دستیابی به پوشش‌های با ریزساختار بهینه و خواص مکانیکی مطلوب، آماده‌سازی سطحی بسیار مهم می‌باشد و بدین منظور سطح زیر لایه‌ها با یستی از هرگونه آلودگی و مواد زائد مانند گرد و خاک، روغن و پوسته‌های اکسیدی پاک گردد. در این پژوهش ابتدا با توجه به ساختار نرم زیرلایه مسی، نمونه‌ها (کاتد) به صورت مکانیکی از سنباده ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ پرداخت شدند و سپس چربی‌زدایی سطح نمونه‌ها در محلول استون متلاطم و در مدت زمان ۵ دقیقه انجام پذیرفت. در نهایت نمونه‌ها با آب مقطر دو بار تقطیر شستشو داده شد و سریعاً وارد الکترولیت گردید. به منظور ثابت نگه داشتن pH در طول فرآیند استفاده از مواد بافری باید مد نظر قرار گیرد، که در این پژوهش اسید بوریک به عنوان بافر کننده استفاده گردید. در واقع اسید بوریک با تثبیت pH و جلوگیری از تشکیل هیدروکسیدها، باعث ماندگاری و افزایش عمر الکترولیت می‌گردد. همچنین به منظور افزایش تراکم، بهبود چسبندگی پوشش به زیرلایه و جلوگیری از اکسید شدن آهن از اسید آسکوربیک به مقدار جزئی استفاده گردید. ضمناً ساخارین و سدیم دودسیل سولفات (SDS) نقش ریزدانه کننده، توزیع یکنواخت ذرات و جلوگیری از آگلومراسیون را بر عهده داشتند. پس از آماده‌سازی کاتد، آند و آماده سازی شرایط حمام، پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> بر روی زیرلایه مسی رسوب‌دهی گردید. لازم به ذکر است به منظور دستیابی به پوشش‌های مطلوب با ریزساختار و ترکیب شیمیایی بهینه، از هر حمام فقط یک بار به منظور رسوب‌دهی استفاده شد. در جدول (۱) پارامترهای انتخاب شده در فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی و در جدول (۲) شرایط الکترولیت (حمام آبکاری) مشاهده می‌شود. لازم بذکر است که در این پژوهش به منظور یافتن ترکیب مناسب الکترولیت، انتخاب غلظت مواد و شرایط بهینه فرآیند رسوب‌دهی، از تحقیقات مشابه با این پژوهش نیز استفاده گردید.

نتایج نشان داد که مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌ها با ترکیب نانوذرات Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بهبود می‌یابد و کسر حجمی Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نقش تعیین کننده‌ای در رفتار خوردگی پوشش‌ها دارد [۱۲]. همانطوریکه مشاهده می‌گردد، در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در زمینه تولید و بررسی ویژگی‌های پوشش‌های نانو کامپوزیتی پایه نیکل-آهن با تقویت کننده‌هایی مانند آلومینا انجام شده است، اما اطلاعات کمی در رابطه با پوشش‌های نانو کامپوزیتی نیکل-آهن-تیتانیا در دسترس است و پژوهش‌های اندکی در زمینه بررسی مورفولوژی، ترکیب شیمیایی، سختی و مقاومت به سایش پوشش‌های مذکور با استفاده از فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی انجام شده است. بنابراین هدف از این پژوهش تولید پوشش‌های نانو کامپوزیتی مغناطیسی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> به روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی (PC) و تاثیر غلظت‌های نانوذرات TiO<sub>2</sub> بر مورفولوژی، ترکیب شیمیایی، زبری، سختی و مقاومت به سایش پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> می‌باشد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- مواد و روش‌ها

در این پژوهش رسوب‌دهی الکتریکی در یک بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری انجام شد و به ترتیب از نیکل خالص تجاری و تسمه مسی خالص به عنوان آند و کاتد استفاده شد. همچنین سطح کاتد برابر با ۱ cm<sup>2</sup>، سطح آند ۲/۵ cm<sup>2</sup> و فاصله آند از کاتد نیز ۳ cm در نظر گرفته شد. ضمناً پوشش‌دهی فقط در یک طرف از سطح کاتد انجام پذیرفت و بدین منظور سطوح جانبی و پشتی کاتد کاملاً عایق گردید. با توجه به تمایل شدید نانوذرات تیتانیا به آگلومراسیون و به منظور توزیع یکنواخت آن‌ها، نانوذرات تیتانیا به الکترولیت اضافه و به مدت ۱۲ ساعت قبل از هر پوشش‌دهی توسط همزن مغناطیسی متلاطم گردید. لازم به ذکر است که نانوذرات تیتانیا استفاده شده با اندازه ذرات ۳۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۹٪

شدند، که در جدول (۳) مشخصات و کدهای مربوطه نشان داده شده است.

جدول ۳: کدگذاری پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> و نسبت وزنی نانوذرات TiO<sub>2</sub> تقویت کننده.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
کد نمونه	FNT0	FNT5	FNT10	FNT15	FNT20
TiO <sub>2</sub>	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰

## ۲-۲- ارزیابی و مشخصه‌یابی پوشش‌ها

مورفولوژی سطحی و ترکیب شیمیایی پوشش‌های آلیاژی و نانو کامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل (WEGA/TESCAN)، ترکیب شیمیایی و میزان عناصر موجود در پوشش‌های حاصله با استفاده از آنالیز عنصری طیف‌سنجی توزیع انرژی پرتو ایکس (EDS) مشخص گردید. همچنین به منظور بررسی مقیاس نانوپوشش‌ها، تجزیه و تحلیل ساختاری نمونه کامپوزیتی از (TEM (Philips CM30) استفاده شد. میکروسختی نیز با استفاده از یک دستگاه میکروسختی سنج ویکرز با بار ثابت اعمالی ۵۰ g به مدت ۱۵ s اندازه‌گیری شد. مقادیر گزارش شده سختی برای هر نمونه میانگین اندازه‌گیری از ۵ نقطه تصادفی در سطح هر پوشش بود. مقدار متوسط زبری سطح پوشش‌ها توسط دستگاه زبری‌سنج (Mitutoyo SurfTest 201) تعیین شد. پروب الماسی دستگاه بر سطح هر یک از نمونه‌ها قرار گرفته و مسافتی حدود ۵ میلی‌متر بر سطح هر نمونه را طی می‌کند. میزان زبری گزارش شده برای هر یک از نمونه‌ها، میانگین چهار بار زبری‌سنجی می‌باشد. ضریب اصطکاک و مقاومت به سایش پوشش‌های پرمالوری و نانو کامپوزیتی با استفاده از دستگاه سایش پین روی دیسک و در دمای اتاق (در غیاب روانکار) انجام شد. برای این منظور ابعاد نمونه‌ها به صورت ۱۰×۱۰×۱ میلی‌متر مکعب انتخاب شدند. پین مورد استفاده از جنس فولاد ۵۲۱۰ با سختی حدود ۶۲ RC بوده و سرعت چرخش دستگاه برای تمام نمونه‌ها

جدول ۱: پارامترهای فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی مورد استفاده در این پژوهش.

pH	۲-۲/۵
سرعت تلاطم (rpm)	۳۰۰
دما (°C)	۴۰
دانسیته جریان (mA/cm <sup>2</sup> )	۳۰
سیکل کاری (%)	۵۰
فرکانس پالس (Hz)	۱۰۰

جدول ۲: شرایط الکترولیت و مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش (شرایط حمام آبکاری).

Ni-Fe-TiO <sub>2</sub> (g/L)	Ni-Fe (g/L)	ترکیب حمام
۱۴۰	۱۴۰	سولفات نیکل (NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O)
۱۵	۱۵	سولفات آهن (FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)
۳۵	۳۵	اسید بوریک (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )
۲/۵	۲/۵	اسید آسکوربیک (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub> )
۰/۵	-	ساختارین (C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>3</sub> S)
۰/۳	-	سدیم دودسیل سولفات (SDS) (C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> NaO <sub>4</sub> S)
۲-۵-۷-۱۰	-	نانوذرات تیتانیا (TiO <sub>2</sub> )

در این پژوهش به منظور تأمین جریان الکتریکی مورد نیاز برای رسوب‌دهی، از یک تولید کننده جریان مستقیم ساخت شرکت به پژوه اصفهان، به مدل E90 استفاده گردید. همچنین به منظور منقطع نمودن جریان مستقیم (پالسی کردن) از یک مبدل پالسی استفاده گردید. به منظور رسیدن به ضخامت یکسان در تمامی پوشش‌های تهیه شده، بار الکتریکی برای آبکاری هر نمونه در محدوده ۵۰ کولن ثابت نگه داشته شد و این امر موجب دستیابی به پوشش‌هایی با ضخامت تقریباً یکسان گردید. ضمناً ضخامت پوشش‌های حاصله با استفاده از قانون القای فارادی محاسبه شد. همچنین به منظور مقایسه راحت‌تر و شناخت بهتر نمونه‌ها، پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> کدگذاری

آگلومراسیون همراه بوده است. ذرات در مقیاس نانومتری نسبت سطح به حجم و انرژی سطحی بالایی دارند، بنابراین پدیده آگلومراسیون و حضور نانوذرات آگلومره شده بیانگر این موضوع است که تمایل نانوذرات به آگلومره شدن در غلظت‌های بالا افزایش می‌یابد [۶،۲۱]. بنابراین در این پژوهش نیز مشاهده می‌شود که علی‌رغم استفاده از SDS، برخی از نانوذرات  $TiO_2$  در الکترولیت آگلومره شده و سپس در زمینه نیکل-آهن رسوب کرده‌اند.

با این حال نمونه پرمالوی FNT0 و نمونه‌های نانوکامپوزیتی FNT5 و FNT10 (شکل ۱ الف، ب و ج) دارای ساختار نانومتری ریزدانه، همگن و متراکم هستند، که این مورفولوژی با تحقیقات مشابه همخوانی دارد [۶،۷،۲۰]. تصویر TEM و الگوی پراش الکترونی ناحیه انتخابی (SAED) نمونه FNT20 در شکل (۲) نشان داده شده است. سطح پوشش با توجه به غلظت مختلف آهن در رسوب، روشن و دارای نواحی کم رنگ است.

همچنین در الگوی SAED مشاهده می‌شود که یک ساختار نانوکریستالی تشکیل شده و سایز این نمونه نانومتری است. تشکیل ساختار یکنواخت و متراکم در نمونه FNT20 را می‌توان به ویژگی‌های فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی و حضور نانوذرات  $TiO_2$  نسبت داد.

تحقیقات نشان داده است که در فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی میزان جوانه‌زنی و رشد دانه دو فاکتور مهم برای تعیین اندازه دانه هستند و رقابت بین این پارامترها، اندازه دانه نهایی پوشش‌ها را تعیین می‌کند. در فرآیند رسوب‌دهی پالسی، سرعت جوانه‌زنی بر سرعت رشد غلبه کرده و این امر موجب تولید پوشش‌هایی با ساختار ریزدانه و نانوکریستالی می‌گردد [۶،۷،۲۲]. از طرف دیگر در طول فرآیند آبکاری پوشش نانوکامپوزیتی، نانوذرات بر سطح زیرلایه جذب شده و به عنوان مراکز جوانه‌زنی عمل می‌کنند و نرخ جوانه‌زنی بر نرخ رشد دانه غلبه می‌کند.

برابر rpm ۶۰ انتخاب شد. در ابتدای آزمایشات، نیروسنج کالیبره شد و در حین آزمایش سرعت متوسط خطی حرکت نمونه و نیروی عمودی که به پین وارد می‌شود محاسبه و نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت پیموده شده ثبت شد. همچنین تمامی نمونه‌ها قبل از انجام تست سایش، به منظور جلوگیری از ایجاد خطا در توزین دقیق آن‌ها به خوبی تمیز و خشک شدند. پس از این مرحله، هر یک از نمونه‌ها چهار بار با ترازوی دیجیتال با دقت چهار رقم اعشار توزین شد، تا وزن اولیه آن‌ها بطور دقیق اندازه‌گیری شود. بار اعمالی در این آزمایش ۳۰۰ گرم (۳ نیوتن) و مسافت‌های طی شده ۲۰۰ متر انتخاب شدند. ضمناً پس از طی مسافت مشخص، به منظور توزین مجدد نمونه از فک باز شده و بعد از عملیات تمیزکاری کاهش وزن در مسافت مشخص گزارش شد. همچنین سطوح ساییده شده و مکانیزم حاکم بر سایش نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه گردید.

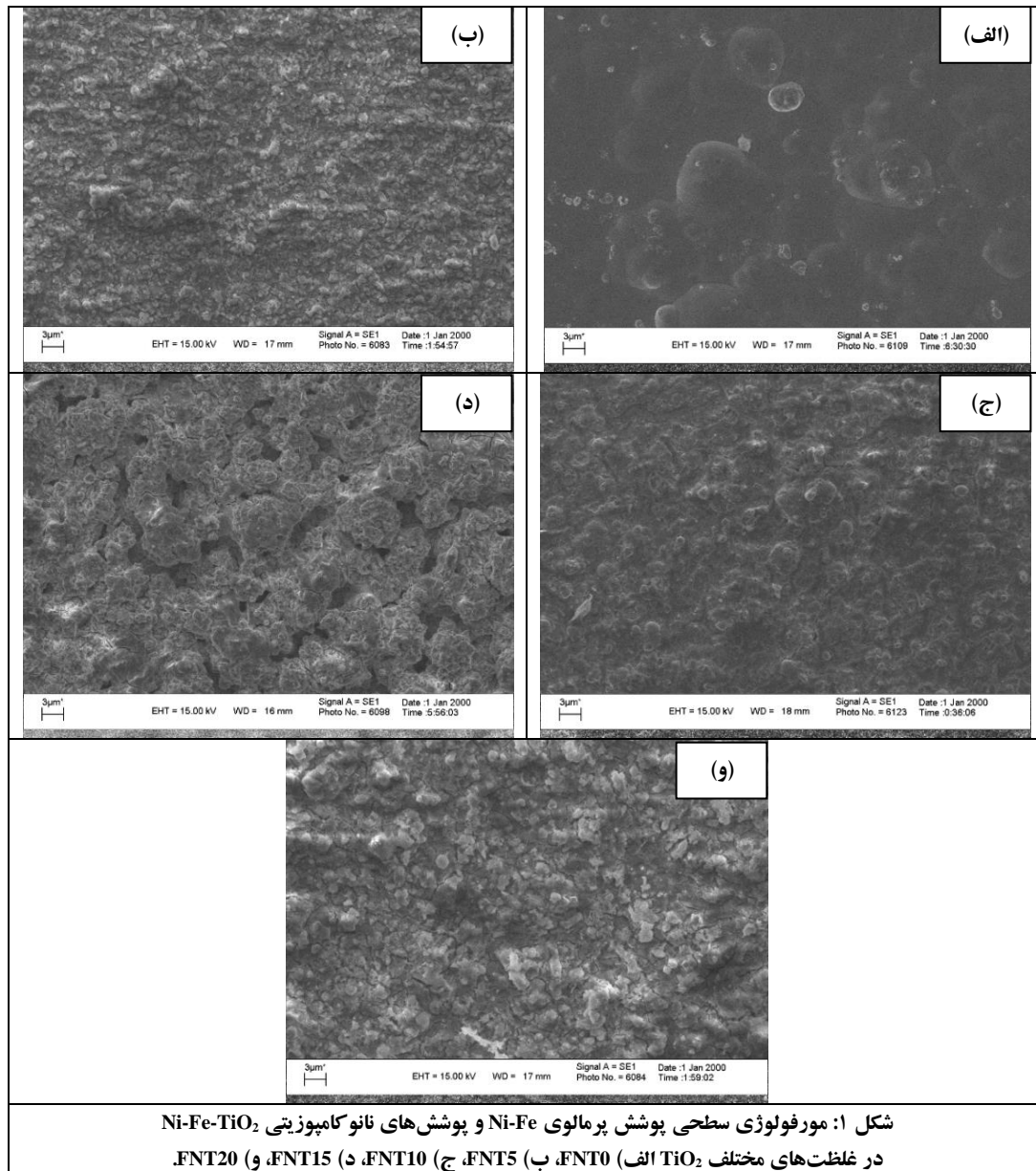
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مورفولوژی سطحی پوشش‌های آلیاژی

##### Ni-Fe و نانوکامپوزیتی $Ni-Fe-TiO_2$

در شکل (۱)، تصاویر SEM مورفولوژی سطحی پوشش پرمالوی Ni-Fe و پوشش‌های نانوکامپوزیتی  $Ni-Fe-TiO_2$  در غلظت‌های مختلف  $TiO_2$  مشاهده می‌شود. پوشش پرمالوی Ni-Fe دارای ساختار ترکیبی سوزنی و گل کلمی است، اما پوشش‌های نانوکامپوزیتی  $Ni-Fe-TiO_2$  دارای مورفولوژی گل کلمی هستند [۶،۷،۲۰].

همچنین تصاویر نشان می‌دهد که مورفولوژی سطحی پوشش‌های نانوکامپوزیتی  $Ni-Fe-TiO_2$  به شدت تحت تاثیر غلظت نانوذرات تیتانیا می‌باشد، به طوری که با افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$ ، ساختار گل کلمی خشن و درشت‌تر شده، و حضور نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه آلیاژ پرمالوی Ni-Fe نیز با



شکل ۱: مورفولوژی سطحی پوشش پرمالوی Ni-Fe و پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> در غلظت‌های مختلف TiO<sub>2</sub> (الف) FNT0، (ب) FNT5، (ج) FNT10، (د) FNT15، و (و) FNT20.

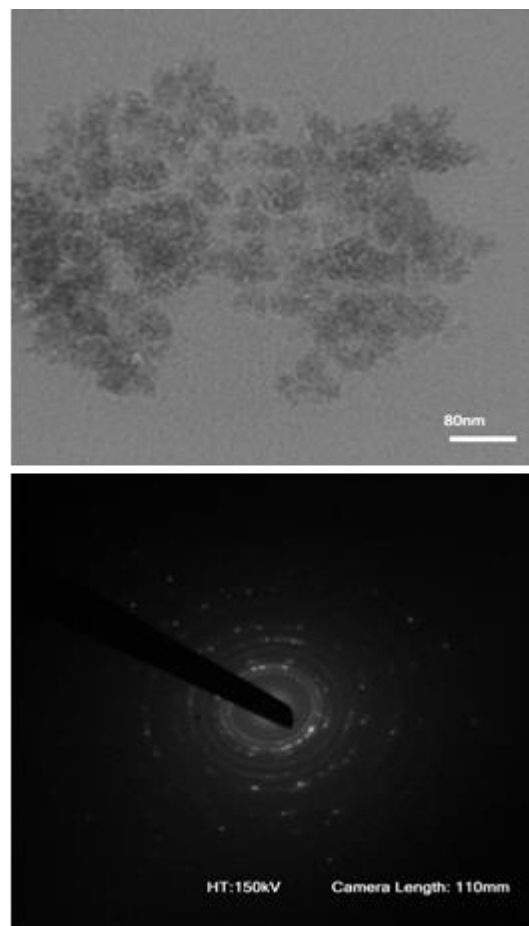
امکان دستیابی به پوشش‌های آلیاژی و کامپوزیتی نانوساختار و متراکم وجود دارد [۳-۲۲،۶]. بطور کلی با هم‌رسوبی نانوذرات سرامیکی سخت TiO<sub>2</sub> در زمینه نیکل-آهن می‌توان یک پوشش کامپوزیتی ریزدانه با انسجام خوب تولید کرد. در واقع حضور ذرات ریز موجب افزایش سطح کاتد و افزایش مکان‌های جوانه‌زنی شده و در نتیجه دانه‌های ریزتری را تولید می‌کند.

سپس رسوب نیکل-آهن سطح نانوذرات را پوشانده و مراکز جوانه‌زنی زیاد به کاهش اندازه دانه‌ها کمک می‌کند. همچنین این نانوذرات رسوب کرده در بین مرزدانه‌ها قرار می‌گیرند که این امر از رشد دانه‌ها و هسته‌های تشکیل شده اولیه ممانعت می‌کند. این رفتار موجب دستیابی به پوشش‌های نانوساختار با اندازه دانه‌های ریزتری (نانومتری) می‌گردد. بنابراین با به کارگیری این دو پارامتر در مقادیر بهینه،

غلظت نانوذرات  $TiO_2$  از ۵ به ۱۵ گرم بر لیتر در حمام آبکاری، امکان برخورد ذرات سرامیکی به سطح کاتد بیشتر شده و این ذرات در درون پوشش در حال رشد محبوس می‌شوند. در نتیجه این امر موجب شده تا میزان حضور نانوذرات تقویت کننده در زمینه پرمالوی نیکل-آهن به طرز قابل توجهی از ۲/۷۷٪ به ۵/۷۳٪ افزایش پیدا کند [۶،۲۱-۳]. این مکانیزم مربوط به فرآیند هم‌رسوبی مشترک در پوشش‌های کامپوزیتی مطابق با دو نظریه اصلی ارائه شده توسط گاکلیلمی و کوروزاکی می‌باشد. بر اساس این نظریه‌ها افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در الکترولیت، اجازه نفوذ بهتر این نانوذرات را به همراه یون‌های جذب سطحی شده بر روی سطح در جهت کاتد را می‌دهد. این یون‌های جذب سطحی شده بر روی سطح نانوذرات متعاقباً در کاتد تخلیه، و سبب به دام افتادن نانوذرات تقویت کننده در پوشش در حال رشد می‌گردند [۶،۲۳].

با این حال در شکل (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  از ۱۵ به ۲۰ گرم بر لیتر در حمام آبکاری، درصد وزنی تیتانیای رسوب کرده از ۵/۷۳٪ به ۵/۸۶٪ تغییر پیدا کرد. این امر نشان می‌دهد که هم‌رسوبی نانوذرات در داخل پوشش تقریباً ثابت بوده و افزایش چندانی نداشته است. این پدیده به دلیل تمایل نانوذرات به آگلومراسیون در غلظت‌های بالا می‌باشد. زیرا آگلومره شدن نانوذرات در غلظت‌های بالا باعث ته‌نشین شدن آن‌ها در کف ظرف (بشر) حمام آبکاری می‌شود. از آنجائیکه نانوذرات آگلومره شده دارای تحرک کمی در الکترولیت هستند و تمایل بیشتری نیز به ته‌نشین شدن در کف بشر الکترولیت آبکاری دارند، بنابراین برخورد و به دام افتادن نانوذرات آگلومره شده در سطح پوشش در حال رشد کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود تا مقدار زیادی از این نانوذرات وارد پوشش نشوند و در نتیجه هم‌رسوبی نانوذرات سرامیکی کاهش می‌یابد [۶،۲۴]. از طرف دیگر نتایج EDX نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات تیتانیا در حمام آبکاری، تاثیر چندانی بر درصد وزنی عناصر آلیاژی رسوب

همچنین حضور نانوذرات  $TiO_2$  نه تنها از رشد دانه جلوگیری می‌کند، بلکه با اثر ترکیبی اصلاح دانه‌ها و مکانیزم استحکام پراکندگی موجب کاهش تغییر شکل پلاستیک زمینه آهن-نیکل می‌گردد.



شکل ۲: تصویر TEM و الگوی SAED نمونه FNT20

### ۳-۲- ترکیب شیمیایی پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$

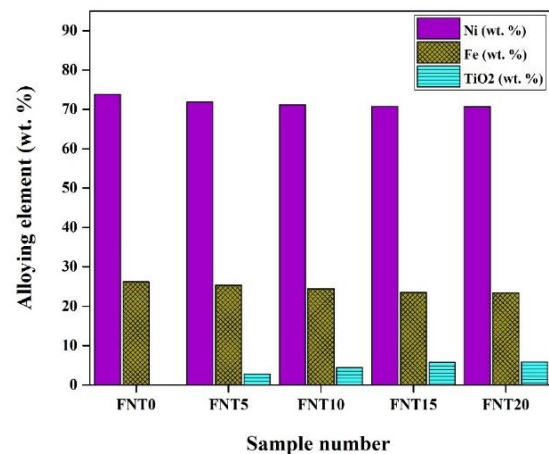
تاثیر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  بر مقدار نانوذرات رسوب کرده در زمینه پرمالوی Ni-Fe و ترکیب شیمیایی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  در شکل (۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر در ترکیب شیمیایی پوشش و درصد وزنی نانوذرات تقویت کننده در پوشش‌های نانوکامپوزیتی، با میزان نانوذرات  $TiO_2$  در الکترولیت رابطه خطی و مستقیم دارد. نتایج EDX نشان داد که با افزایش



به اثر استحکام بخشی حاصل از ریزدانه‌گی و استحکام بخشی توزیعی ناشی از حضور نانوذرات تیتانیا بر می‌گردد و این رفتار در تحقیقات مشابه تائید شده است [۵،۶،۱۱،۲۵].

در واقع سختی یک ماده مقاومت آن به تغییر شکل مخصوصا تغییر شکل دائمی، دندانه‌گذاری و یا خراشیدگی می‌باشد. بنابراین نانوذرات سرامیکی در پوشش‌های نانو کامپوزیتی به عنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها و لغزش مرزدانه‌ای عمل می‌کنند و سبب افزایش سختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی می‌گردند. افزایش در سختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی به علت اثر ترکیبی ریزدانه‌گی با توجه به مکانیزم هال-پیچ، و همچنین توزیع یکنواخت نانوذرات با توجه به مکانیزم اوروان می‌باشد [۴-۲۶]. نظریه هال-پیچ رابطه بین اندازه دانه‌ها و میکروسختی پوشش‌ها را بیان می‌کند. بر این اساس، توزیع یکنواخت ذرات موجب کاهش اندازه دانه‌ها در پوشش‌های رسوب‌دهی شده می‌شود. این موضوع بر مبنای این مفهوم است که مرزدانه‌ها در مقابل حرکت نابجایی‌ها ممانعت به عمل می‌آورند و بنابراین بر اساس رابطه کلاسیک هال-پیچ، اصلاح و کاهش اندازه دانه‌ها منجر به افزایش مقادیر سختی رسوبات آلیاژی و کامپوزیتی می‌گردد [۴-۲۸]. از طرف دیگر بر اساس مکانیزم سخت شدن اوروان، افزایش مقدار نانوذرات سرامیکی در زمینه فلزی رسوبات با توجه به اثر تقویت پراکندگی، موجب جلوگیری از رشد دانه‌ها و کاهش اندازه آن‌ها می‌گردد. در نتیجه این رفتار، سبب افزایش میکروسختی و بهبود در مقاومت به سایش پوشش‌های رسوب‌دهی شده کامپوزیتی می‌شود [۴-۲۸]. همچنین یکی دیگر از عوامل موثر بر بهبود سختی پوشش‌های Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> استفاده از روش آبکاری پالسی و انتخاب دقیق پارامترهای این فرآیند می‌باشد [۴-۱۵]. بطور کلی سختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی عمدتاً از دو جنبه قابل بررسی است: (۱) سختی زمینه فلزی که با توجه به ریزساختار پوشش‌ها و اصلاح آن تعیین می‌گردد. (۲) مقدار وزنی نانوذرات تقویت کننده که در زمینه پوشش‌های کامپوزیتی هم‌رسوبی داشته‌اند. در واقع

کرده نمی‌گذارد، به طوریکه با افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> از ۵ به ۲۰ گرم بر لیتر، محتوای نیکل و آهن در پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> بطور جزئی کاهش یافته است. ضمناً لازم به ذکر است که در این پژوهش، حداکثر مقدار نانوذرات TiO<sub>2</sub> هم‌رسوبی شده در زمینه نیکل-آهن نسبت به تحقیقات مشابه کمی بیشتر است [۶،۱۳،۱۸،۲۲].



شکل ۳: تاثیر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> بر مقدار نانوذرات رسوب کرده در زمینه پرمالوی Ni-Fe و ترکیب شیمیایی پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub>.

### ۳-۳- میکروسختی پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub>

تغییرات میکروسختی پوشش‌های پرمالوی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> نسبت به غلظت‌های مختلف نانوذرات TiO<sub>2</sub> در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج میکروسختی سنجی و بیکرز نشان می‌دهد که افزایش میزان نانوذرات تیتانیا در الکترولیت و بالتبع آن افزایش مقدار نانوذرات TiO<sub>2</sub> رسوب کرده در زمینه Ni-Fe موجب بهبود سختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی می‌شود، به طوریکه بالاترین میزان میکروسختی به مقدار ۵۱۲ HV مربوط به نمونه FNT20 با ۵/۸۶٪ درصد نانو تیتانیا می‌باشد. افزایش میکروسختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی در مقایسه با پوشش پرمالوی Ni-Fe به ماهیت سخت نانوذرات TiO<sub>2</sub>، و همچنین

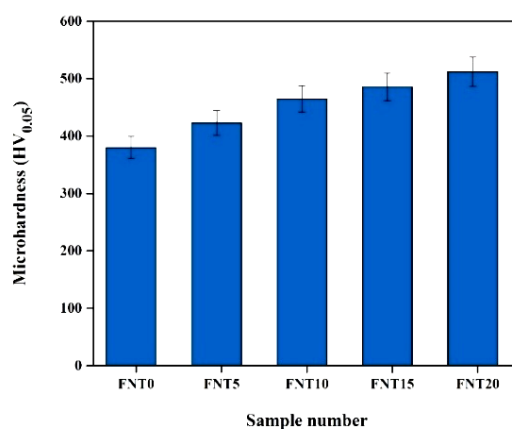
نانوذرات در امتداد مرزخانه‌های زمینه Ni-Fe پخش شده و رشد دانه‌ها را محدود می‌کنند. این امر موجب دستیابی به پوشش‌های نانو کامپوزیتی با سطحی ریزدانه و صاف می‌گردد [۵،۲۲،۲۹]. ضمناً مقادیر زبری سطحی برای نمونه‌ها نسبتاً کم می‌باشد، که این ویژگی مطلوب به دلیل استفاده از روش آبکاری پالسی می‌باشد. علت این امر به وجود پارامتر فرکانس پالس و زمان خاموشی برمی‌گردد که در روش آبکاری با جریان مستقیم وجود ندارد. در واقع در زمان خاموشی، کاهش غلظت در فصل مشترک فلز-محلول جبران می‌شود و از طرف دیگر در زمان خاموشی تخلیه لایه دوگانه صورت می‌گیرد. بنابراین وقتی که در زمان روشنی جریان اعمال می‌گردد، لایه دوگانه شارژ می‌شود و این امر سبب توزیع یکنواخت یون‌ها می‌شود. در نتیجه یون‌ها به صورت یکنواخت بر روی سطح رسوب می‌کنند و زبری سطح کاهش می‌یابد [۳،۱۱،۳۰].

جدول ۴: تاثیر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  بر زبری سطحی و ضخامت پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$ .

کد نمونه	غلظت نانوذرات $TiO_2$ در حمام آبکاری (g/lit)	نانوذرات رسوب کرده (wt. %)	زبری سطح (mm)	ضخامت (mm)
FNT0	-	-	۰/۳۴	۴۶
FNT5	۵	۲/۷۷	۰/۲۹	۴۳
FNT10	۱۰	۴/۴۰	۰/۲۶	۴۲
FNT15	۱۵	۵/۷۳	۰/۲۴	۳۹
FNT20	۲۰	۵/۸۶	۰/۲۳	۳۷

در این پژوهش زمان‌های روشن و خاموش جریان به مقدار مساوی ۵ میکروثانیه در نظر گرفته شد، که در نتیجه از فرکانس پالس ۱۰۰ Hz به منظور رسوب‌دهی نمونه‌ها استفاده شد. بنابراین به منظور توزیع یکنواخت یون‌ها و ذرات تقویت کننده و در نتیجه کاهش زبری سطح می‌توان از روش رسوب‌دهی الکتریکی با جریان پالسی استفاده نمود. لازم

تاثیر نانوذرات تقویت کننده در پوشش‌های نانو کامپوزیتی عمدتاً به درصد وزنی، اندازه و نحوه توزیع این نانوذرات در زمینه فلزی بستگی دارد. بطور کلی خواص و ویژگی‌های مکانیکی مواد نانوبلوری عمدتاً به ریزساختار ماده بستگی دارد. در مواد نانوساختار ذرات فاز ثانویه به عنوان مانع فیزیکی در برابر حرکت نابجایی‌ها و لغزش مرزخانه‌ها عمل می‌کنند و منجر به بهبود قابل توجه در ویژگی‌های مکانیکی پوشش‌های نانو کامپوزیتی می‌گردند [۴-۶،۲۶،۲۸].



شکل ۴: روند تغییرات میکروسختی پوشش‌های پرمالوی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  نسبت به غلظت‌های مختلف نانوذرات  $TiO_2$ .

### ۳-۴- زبری سطحی و ضخامت پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$

تاثیر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  بر زبری سطحی و ضخامت پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  در جدول (۴) نشان داده شده است. با افزودن نانوذرات  $TiO_2$  به مقدار ۵ گرم بر لیتر در حمام آبکاری، زبری پوشش پرمالوی Ni-Fe از ۰/۳۴ میکرومتر در نمونه FNT0، به ۰/۲۹ میکرومتر در نمونه نانو کامپوزیتی FNT5 کاهش یافت. همچنین افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در نمونه‌های Ni-Fe- $TiO_2$ ، بطور خطی موجب کاهش زبری سطح نمونه‌های نانو کامپوزیتی گردید، به طوری که با افزایش مقدار تلفیق نانوذرات  $TiO_2$  از ۰/۲۷۷٪ به ۵/۸۶٪ در پوشش‌های نانو کامپوزیتی، زبری سطحی از ۰/۲۹ میکرومتر به ۰/۲۳ میکرومتر کاهش پیدا نمود.

### ۳-۵- رفتار سایشی پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub>

#### ۳-۵-۱- بررسی ضریب اصطکاک پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub>

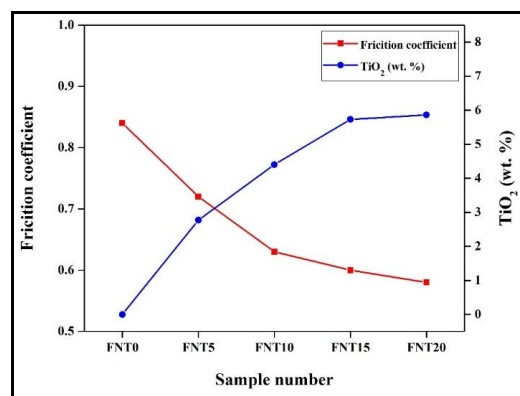
همانطور که قبلاً ذکر شد، پوشش‌های پرمالوی علی‌رغم خواص مغناطیسی منحصر بفرد، مقاومت به سایش و رفتار سایشی نامناسبی از خود نشان می‌دهند [۶-۱۰]. بنابراین به منظور بهبود خواص سایشی پوشش‌های مذکور، بررسی ضریب اصطکاک، نرخ سایش و مکانیزم حاکم بر سایش امری ضروری است. ضریب اصطکاک به عنوان معیاری از مقاومت به سایش نمونه‌ها ارزیابی می‌شود و در فرآیندهای مهندسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع یکی از عوامل موثر بر مقاومت به سایش، ضریب اصطکاک می‌باشد و هر چقدر ضریب اصطکاک کمتر باشد، مقاومت سایشی بیشتر می‌شود. عواملی مانند زبری سطح کمتر، سختی بالاتر و توزیع یکنواخت‌تر ذرات تقویت کننده تاثیر مستقیم بر ضریب اصطکاک دارند و موجب بهبود رفتار سایشی مواد کامپوزیتی می‌گردند [۳۳، ۳۲، ۶]. در شکل (۵) تاثیر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> بر تغییرات ضریب اصطکاک پوشش‌های آلیاژی و نانوکامپوزیتی (در مسافت طی شده ۲۰۰ متر و بار ۳ نیوتن) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه پرمالوی FNT0 دارای بیشترین ضریب اصطکاک به مقدار ۰/۸۴ می‌باشد، که علت این امر را می‌توان تفاوت ترکیب شیمیایی این نمونه نسبت به پوشش‌های نانوکامپوزیتی دانست. نمونه پرمالوی FNT0 متشکل از مواد مغناطیسی نرم نیکل و آهن می‌باشد و از آنجائیکه ضریب اصطکاک تابعی از نرمی می‌باشد، این مواد نرم‌تر (نیکل و آهن) ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به مواد سخت از خود نشان می‌دهند [۳۳، ۳۴، ۳۵]. از طرف دیگر نمونه پرمالوی FNT0 بالاترین زبری و کمترین مقدار میکروسختی را در بین همه نمونه‌ها دارا می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که سطوح زبرتر و با

بذکر است که مقادیر زبری مشاهده شده در این پژوهش نسبت به تحقیقات مشابه کمی بیشتر می‌باشد [۲۹، ۲۲، ۵]. علی‌رغم اینکه نتایج SEM و EDX نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات تیتانیا در حمام آبکاری، موجب افزایش درصد وزنی ذرات رسوب کرده و همچنین پستی و بلندی‌های سطحی می‌گردد، اما نتایج اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌های آلیاژی و نانوکامپوزیتی به طرز جالبی نشان می‌دهد که نمونه پرمالوی FNT0 ضخیم‌تر از همه نمونه‌های دیگر است. همچنین پوشش‌های نانوکامپوزیتی با درصد تیتانیای کمتر، به طرز قابل ملاحظه‌ای دارای بالاترین ضخامت هستند، به طوریکه با افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> ضخامت پوشش‌های نانوکامپوزیتی کاهش یافته است. در مطالعات قبلی گزارش شده است که با افزایش دانسیته جریان، نرخ رسوب‌دهی بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد و این امر سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی و رشد می‌گردد و در نتیجه ضخامت رسوبات آلیاژی افزایش می‌یابد [۳۱]. اما در این پژوهش، تمامی پوشش‌های آلیاژی و نانوکامپوزیتی در شرایط رسوب‌دهی الکتریکی مشابه و ثابت از نظر دانسیته جریان، سیکل کاری و فرکانس پالس تهیه شدند. بنابراین علت افت خطی در ضخامت پوشش‌ها با افزایش غلظت نانوذرات تقویت کننده، ماهیت نانوذرات سرامیکی و مکانیزم اثردهی آن‌ها می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد، نانوذرات تقویت کننده به عنوان مراکز جوانه‌زنی عمل می‌کنند و مراکز جوانه‌زنی زیاد به کاهش اندازه دانه‌ها کمک می‌کند. از طرف دیگر نانوذرات رسوب کرده در بین مرز دانه‌ها قرار می‌گیرند و از رشد دانه‌ها و هسته‌های تشکیل شده اولیه جلوگیری می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد نانوذرات تقویت کننده تیتانیا که در پوشش‌های نانوکامپوزیتی به عنوان موانع فیزیکی برای رشد دانه عمل می‌کنند، با کند کردن نرخ رشد رسوبات، موجب تولید پوشش‌های نانوکامپوزیتی نازک‌تری می‌شوند [۲۲، ۵، ۳].

سختی پایین تر، ضریب اصطکاک بیشتری دارند [۵،۶،۳۳]. همچنین آثار تخریب ناشی از سایش در سطوح نرم تر بیشتر بوده و بنابراین براده های بیشتری حاصل می شود. این براده ها به عنوان نقاط تماس بین سطح نمونه و پین ساینده عمل کرده و سبب افزایش در ضریب اصطکاک خواهند شد [۵،۳۴،۳۵].

سختی پایین تر، ضریب اصطکاک بیشتری دارند [۵،۶،۳۳]. همچنین آثار تخریب ناشی از سایش در سطوح نرم تر بیشتر بوده و بنابراین براده های بیشتری حاصل می شود. این براده ها به عنوان نقاط تماس بین سطح نمونه و پین ساینده عمل کرده و سبب افزایش در ضریب اصطکاک خواهند شد [۵،۳۴،۳۵].

سختی پایین تر، ضریب اصطکاک بیشتری دارند [۵،۶،۳۳]. همچنین آثار تخریب ناشی از سایش در سطوح نرم تر بیشتر بوده و بنابراین براده های بیشتری حاصل می شود. این براده ها به عنوان نقاط تماس بین سطح نمونه و پین ساینده عمل کرده و سبب افزایش در ضریب اصطکاک خواهند شد [۵،۳۴،۳۵].



شکل ۵: تاثیر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> بر ضریب اصطکاک پوشش های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی.

### ۳-۵-۲- نرخ سایش و کاهش وزن پوشش های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub>

قبل از انجام آزمون مقاومت به سایش تمامی نمونه های آلیاژی Ni-Fe و نانو کامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> وزن شدند و پس از آزمون با توزین مجدد آن ها مقدار کاهش وزن نمونه ها مشخص گردید. سپس نسبت به مسافت طی شده ۲۰۰ متر و بار اعمالی ۳ نیوتن، نرخ سایش نمونه های آلیاژی و نانو کامپوزیتی محاسبه گردید. در جدول (۵) تاثیر درصد وزنی نانوذرات TiO<sub>2</sub> رسوب کرده بر کاهش وزن نمونه ها و نرخ سایش آن ها مشاهده می شود. نتایج نشان داد که رفتار سایشی تمامی پوشش ها در توافق با این مطلب کلی است که

همچنین بررسی ضریب اصطکاک نمونه های نانو کامپوزیتی نشان می دهد که در اثر الحاق نانوذرات تیتانیا، ضریب اصطکاک افت پیدا می کند. افزودن نانوذرات TiO<sub>2</sub> به مقدار ۵ گرم بر لیتر در حمام آبکاری، موجب کاهش ضریب اصطکاک به مقدار ۰/۷ در نمونه نانو کامپوزیتی FNT5 شده است. همچنین افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در نمونه های Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> تاثیر مستقیم بر کاهش ضریب اصطکاک تمامی نمونه های نانو کامپوزیتی دارد. مشاهده می گردد که با افزایش مقدار و درصد تلفیق نانوذرات TiO<sub>2</sub> در زمینه پوشش های نانو کامپوزیتی، ضریب اصطکاک در نمونه FNT5 از ۰/۷، به ۰/۵۸ در نمونه FNT20 کاهش پیدا کرده است [۴-۶،۳۶]. نانوذرات تیتانیا با کاهش تماس مستقیم بین پین ساینده و سطح پوشش، موجب کاهش ضریب اصطکاک می شوند. از طرف دیگر در طی فرآیند سایش، نانوذرات تیتانیا از سطح پوشش های نانو کامپوزیتی کنده شده و به عنوان روان ساز جامد بین دو سطح عمل می کنند [۱۳،۳۵]. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک نمونه های نانو کامپوزیتی

تحقیقات مشابه کمتر بوده و بنابراین رفتار تریبولوژیکی بهتری مشاهده شده است [۴،۶،۷،۱۲].

### ۳-۵-۳- مکانیزم سایش پوشش‌های آلیاژی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub>

تصاویر SEM از مسیر سایش پوشش‌های پرمالوی FNT0 و نانوکامپوزیتی FNT10 و FNT20 در شکل (۵) نشان داده شده است. تصاویر نشان می‌دهد که در نمونه FNT0 مقدار زیادی از سطح دچار سائیدگی شده است و ذرات سایشی زیادی از پوشش کنده شده و بر روی سطح به صورت جزیره‌ای تجمع کرده‌اند. این رفتار نشان دهنده مکانیزم سایش چسبان در پوشش‌های پرمالوی Ni-Fe می‌باشد، که به واسطه چسبندگی بین پین ساینده و سطح نرم پرمالوی نیکل - آهن ایجاد می‌شود [۶،۲۲،۴۰]. در واقع در هنگام سایش و تحت بارگذاری ناشی از این فرآیند، پوشش‌های زمینه نیکلی دچار تغییر شکل دائمی شدید می‌شوند و این امر سبب ایجاد شیارهای ساییده شده پیوسته، عریض و متعدد موازی با جهت لغزش می‌گردد. تغییر شکل دائمی و شیارهای عریض در سطح ساییده شده، مشخصه‌هایی از مقاومت به سایش ضعیف پوشش‌های زمینه نیکلی می‌باشد [۴۰،۴۱]. اما با اضافه کردن نانوذرات تیتانیا به مقدار ۱۰ گرم بر لیتر در حمام آبکاری، حجم سائیدگی و ذرات سایشی کنده شده از سطح در پوشش نانوکامپوزیتی FNT10 به مراتب کمتر شده و مقاومت به سایش افزایش یافته است. ذرات تیتانیای موجود در پوشش نانوکامپوزیتی، با ایجاد فاصله از تماس سخت و خشن سطح زمینه نیکل - آهن و پین در طی فرآیند سایش جلوگیری کرده و نرخ سایش را کاهش می‌دهند. بدین ترتیب افزایش نانوذرات تیتانیا سبب کاهش عرض شیارهای عمیق و مقدار ذرات کنده شده از سطح نمونه نانوکامپوزیتی FNT10 شده است، که این امر نشان دهنده کاهش چسبندگی میان پین و سطح پوشش، و در نتیجه کاهش مکانیزم سایش چسبان می‌باشد. تحقیقات قبلی نشان داده

پوشش‌های سخت‌تر، نسبت به سایش مقاوم‌تر هستند، به طوریکه پوشش پرمالوی نیکل - آهن اتلاف وزن شدیدی را در مقایسه با تمامی پوشش‌های نانوکامپوزیتی نیکل - آهن - تیتانیا از خود نشان می‌دهد [۴،۶،۳۸،۳۹]. با توجه به جدول (۵) کاهش وزن پوشش پرمالوی FNT0 بعد از آزمون سایش برابر ۰/۹۲ میلی‌گرم می‌باشد، ولی با اضافه کردن ۵ گرم بر لیتر نانوتیتانیا به حمام آبکاری، کاهش وزن پوشش FNT5 به ۰/۸۳ میلی‌گرم می‌رسد که علت این امر کاهش ضریب اصطکاک مطابق شکل (۴) و همچنین اصلاح مکانیزم رشد دانه در اثر تلفیق نانوذرات تیتانیا می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> به صورت خطی موجب کاهش نرخ سایش شده است و کمترین نرخ سایش به مقدار  $1/08 \text{ (mg/N.m} \times 10^{-3})$  مربوط به نمونه FNT20 می‌باشد.

در واقع نانوذرات تیتانیا رسوب کرده در زمینه نیکل - آهن با ادغام اثرات ریزدانه‌نگی و استحکام بخشی توزیعی، سبب افزایش سختی و کاهش نرخ سایش در پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> می‌گردد. افزایش میزان نانوذرات TiO<sub>2</sub> و توزیع یکنواخت آن‌ها در زمینه نیکل - آهن، عملکرد سایشی بهینه را به میزان بیشتری تقویت کرده و در نتیجه میکروسختی و مقاومت به سایش پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe-TiO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد [۳-۱۹]. مقاومت به سایش پوشش‌های نانوکامپوزیتی عمدتاً به ذرات فاز ثانویه تقویت کننده در زمینه بستگی دارد که با توجه به اصلاح ریزساختار، ایجاد ریزدانه‌نگی و اثرات استحکام بخشی توزیعی به عنوان سد فیزیکی در برابر رشد دانه‌های زمینه عمل می‌کنند و سبب محدود شدن تغییر شکل دائمی زمینه تحت بارگذاری‌ها مختلف می‌گردد. در نتیجه این اثرات بهینه، عامل اصلی کاهش نرخ سایش، بهبود میکروسختی و در نتیجه مقاومت سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیتی می‌باشند [۳۸،۳۹]. ضمناً لازم بذکر است که مقادیر ضریب اصطکاک و نرخ سایش نمونه‌های کامپوزیتی در این پژوهش نسبت به

آهن، نرخ تغییر شکل پلاستیک کاهش یافت. در صورت هم‌رسوبی آهن و نیکل با ذرات سرامیکی سخت، نرخ سایشی کاهش می‌یابد و این امر موجب بهبود مقاومت در برابر سایش می‌شود. این اثر با مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک و نرخ سایش پوشش‌های نیکل-آهن و نیکل-آهن-تیتانیا قابل مشاهده است. این خصوصیات ایجاد شده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ذرات  $TiO_2$  در زمینه آهن-نیکل، مکانیزم سایشی کمی از نوع چسبان به مکانیزم خراشان تغییر می‌کند. در نهایت سطوح سائیده شده نشان داد که پوشش‌های کامپوزیتی هر دو مکانیزم چسبان و خراشان را از خود نشان می‌دهند، که این رفتار در تحقیقات مشابه نیز گزارش شده است [۶،۷،۲۲].

در نمونه‌های FNT10 و FNT20 که بالاترین مقدار تیتانیا را دارند، در اثر فرآیند سایش نانوذرات تیتانیا از سطح خارج شده و نقش فاز سوم را ایفا می‌کنند. با توجه به سختی بالایی که این ذرات دارند، نانوذرات تیتانیا موجب ایجاد خطوط سایشی کم عمق و غالب شدن مکانیزم سایش خراشان می‌گردند. تحقیقات نشان داده است که رفتار سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیتی شدیداً به ریزساختار آن وابسته است. مطالعه رفتار و عملکرد تریبولوژیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی نشان می‌دهد که نه تنها مقدار وزنی نانوذرات رسوب داده شده در زمینه پوشش، بلکه تعداد آن‌ها در واحد سطح پوشش و اندازه این ذرات نیز بر روی عملکرد تریبولوژیکی پوشش تاثیر دارد [۴،۶،۲۲،۳۹]. همانطوریکه شکل (۵) نشان می‌دهد، به ازای اینکه میزان نانوذرات در پوشش‌های نانوکامپوزیتی  $Ni-Fe-TiO_2$  افزایش می‌یابد، شیارهای عمیق بر روی سطوح سایش به تدریج ناپیوسته می‌گردد که مشخصه‌ای از مقاومت بیشتر نسبت به تغییر شکل دائمی در پوشش‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد. همچنین تصاویر SEM از سطوح سائیده شده و مسیر سایش پوشش‌های نانوکامپوزیتی با میزان بالاتری از نانوذرات (نمونه‌های FNT10 و FNT20)، به وضوح نشان می‌دهد که ذرات و مواد سایشی واقع بر سطوح سایش، و همچنین پهنای

است که نانوذرات سرامیکی و یا کاربیدی تقویت کننده، در طی فرآیند لغزش نقش اصلی را در کاهش تماس مستقیم میان زمینه پوشش‌های نرم فلزی و پین سائیده را ایفا می‌کنند و از این طریق سایش از نوع چسبندگی بین این دو جسم متقابل را کاهش می‌دهند [۶،۷،۳۷،۳۸].

جدول ۵: تاثیر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  بر کاهش وزن و نرخ سایش پوشش‌های آلیاژی  $Ni-Fe$  و نانوکامپوزیتی  $Ni-Fe-TiO_2$ .

کد نمونه	نانوذرات رسوب کرده (wt.%)	کاهش وزن (mg)	نرخ سایش ( $mg/N.m \times 10^{-3}$ )
FNT0	-	۰/۹۲	۱/۵۳
FNT5	۲/۷۷	۰/۸۳	۱/۳۸
FNT10	۴/۴۰	۰/۷۶	۱/۲۶
FNT15	۵/۷۳	۰/۶۸	۱/۱۳
FNT20	۵/۸۶	۰/۶۵	۱/۰۸

همچنین با افزایش غلظت نانوذرات تیتانیا به ۲۰ گرم بر لیتر در حمام آبرکاری، عمق شیارهای موجود در سطح نمود کمتری یافته‌اند. این امر نشان دهنده این است که با افزودن نانوذرات به زمینه نیکل-آهن و افزایش سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، مکانیزم سایش از حالت چسبان در نمونه پرمالوی FNT0 بطور کامل خارج شده و تبدیل به مکانیزم سایش دوگانه خراشان-چسبان شده است. وجود خراش‌ها و شیارهای موازی با جهت حرکت بر روی سطح، و همچنین کندگی‌های متعدد در پوشش نشان از مکانیزم دوگانه خراشان-چسبان دارد [۶-۴۱]. در واقع بررسی تصاویر SEM از رفتار سایشی پوشش نیکل-آهن نشان دهنده تغییر شکل پلاستیک بر روی سطح می‌باشد. این رفتار به دلیل سختی پایین پوشش‌های آلیاژی است که نمی‌تواند بار زیاد در فرآیند سایش را تحمل کنند. در حالیکه در پوشش‌های کامپوزیتی به دلیل حضور نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه نیکل-

جریان پالسی تولید شدند و تاثیر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  بر مورفولوژی سطحی، ترکیب شیمیایی، میکروسختی، ضخامت، زبری سطحی، مقاومت سایشی و مکانیزم حاکم بر سایش پوشش‌های مذکور بررسی شد:

(۱) پوشش‌های پرمالوی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  دارای ساختار نانوکریستالی ریزدانه، همگن و متراکم و مورفولوژی سطحی سوزنی و گل کلمی هستند، اما با افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$ ، ساختار گل کلمی خشن و درشت‌تر گردید و به دلیل نسبت سطح به حجم و انرژی سطحی بالا، نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه پرمالوی Ni-Fe با آگلومراسیون مواجه شدند.

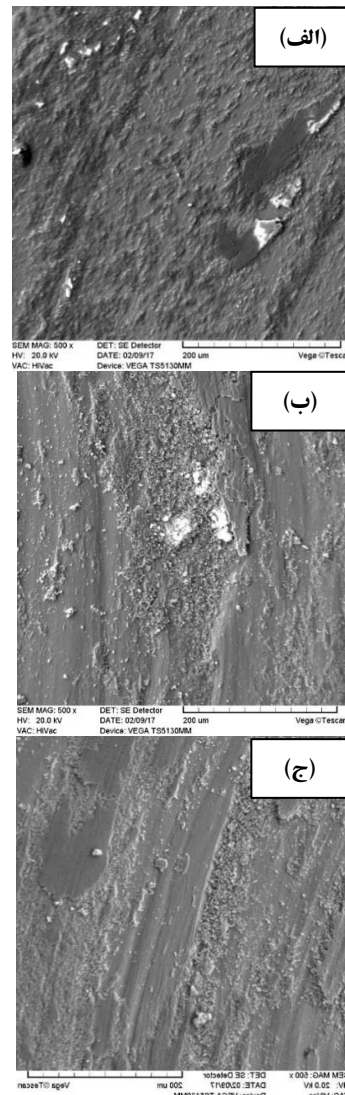
(۲) با افزایش مقدار نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه نیکل-آهن، ذرات سرامیکی به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی فعال و و نرخ جوانه‌زنی بر نرخ رشد دانه غلبه می‌کند. بنابراین این رفتار موجب دستیابی به پوشش‌های نانو ساختار با اندازه دانه‌های پایین‌تری می‌گردد.

(۳) با افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$  از ۵ به ۲۰ گرم بر لیتر در حمام آبکاری، امکان برخورد آن‌ها به سطح کاتد بیشتر شده و بر اساس مکانیزم هم‌رسوبی مشترک، این ذرات در درون پوشش در حال رشد محبوس می‌شوند، به طوری که میزان حضور نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه پرمالوی Ni-Fe از ۲/۷٪ به ۵/۸۶٪ افزایش پیدا کرد.

(۴) با افزایش مقدار نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه Ni-Fe، این ذرات به عنوان فاز ثانویه از حرکت نابجایی‌ها و لغزش مرز دانه‌ها ممانعت به عمل آورده، و با ایجاد اثر ترکیبی استحکام بخشی حاصل از ریزدانگی و توزیعی ناشی از حضور نانوذرات  $TiO_2$  در زمینه، منجر به بهبود قابل توجه میکروسختی پوشش‌های نانوکامپوزیتی گردید و بالاترین میزان میکروسختی به مقدار ۵۱۲ HV در نمونه FNT20 با ۵/۸۶٪ نانوتیتانیا مشاهده شد.

(۵) نانوذرات  $TiO_2$  با محدود کردن رشد دانه‌ها موجب دستیابی به سطحی ریزدانه و صاف شده و موجب کاهش زبری سطح و ضخامت می‌گردد. همچنین در زمان خاموشی

مسیرهای سایش به تدریج با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده نانوتیتانیا کاهش می‌یابد، که این امر بیانگر تغییر رفتار تریبولژیکی و بهبود مقاومت به سایش پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  نسبت به پوشش‌های پرمالوی Ni-Fe می‌باشد [۴،۲۲،۴۰].



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپ SEM از مکانیزم حاکم بر سایش پوشش پرمالوی Ni-Fe و پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  در غلظت‌های مختلف، (الف)  $TiO_2$ ، (ب) FNT0 و (ج) FNT10.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پوشش‌های پرمالوی Ni-Fe و نانوکامپوزیتی Ni-Fe- $TiO_2$  با استفاده از فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی با

- [6] E. Yousefi, S. Sharafi, A. Irannejad, *Alloys and Compounds*, **753**, 2018, 308.
- [7] E. Yousefi, S. Sharafi, A. Irannejad, *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, **29**, 2019, 2591.
- [8] H. Atae-Esfahani, M.R. Vaezi, L. Nikzad, B. Yazdani, S.K. Sadrnezhad, *Alloys and Compounds*, **484**, 2009, 540.
- [9] H. Adelhani, M. Reza Arshadi, *Alloys and Compounds*, **476**, 2009, 234.
- [10] V. Torabinejad, M. Aliofkhaezrai, A. Sabour Rouhaghdam, M. Allahyarzadeh, *Tribology International*, **106**, 2017, 34.
- [11] A. Lanzutti, M. Lekka, C. de Leitenburg, L. Fedrizzi, *Tribology International*, **132**, 2019, 50.
- [12] M. Safavi, F. Babaei, A. Ansarian, *Ceramics International*, **45**, 2019, 10951.
- [13] P. Baghery, M. Frazam, A.B. Mousavi, M. Hoseyni, *Surface and Coatings Technology*, **204**, 2010, 3804.
- [14] Z. Chen, X. Yang, Y. Fu, *Alloys and Compounds*, **826**, 2020, 154167.
- [15] M.H. Allahyarzadeh, M. Aliofkhaezrai, A. Sabour Rouhaghdam, H. Alimadadi, V. Torabinejad, *Surface and Coatings Technology*, **386**, 2020, 125472.
- [16] B. Kalska-Szostko, U. Klekotka, W. Olszewski, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **484**, 2019, 67.
- [17] S.T. Aruna, M. Muniprakash, V.K. William, *Applied Electrochemistry*, **43**, 2013, 805.
- [18] C. Ya-Ping, *Electroplating & Pollution Control*, **5**, 2012, 10.
- [19] A. Rasooli, M.S. Safavi, F. Babaei, A. Ansarian, *Alloys and Compound*, **822**, 2020, 153725.
- [20] R. Abdel-Karim, Y. Reda, M. Muhammed, S. El-Raghy, M. Shoeib, H. Ahmed, *Nanomaterials*, **201**, 2011, 274.
- [21] P.A. Gay, J.M. Limat, P.A. Steinmann, J. Pagetti, *Surface and Coatings Technology*, **202**, 2007, 1167.
- [22] G. Parida, D. Chaira, M. Chopkar, A. Basu, *Surface and Coatings Technology*, **205**, 2011, 4871.
- [23] R.K. Saha, T.I. Khan, *Surface and Coatings Technology*, **205**, 2010, 890.
- [24] K.H. Mazaheri, S.R. Allahkaram, *Applied Surface Science*, **258**, 2012, 4574.
- [25] A. Katamipour, M. Farzam, I. Danaee, *Surface and Coatings Technology*, **254**, 2014, 358.
- [26] W. Wang, H. Guo, *Scripta Materialia*, **53**, 2005, 613.
- [27] S. Mohajeri, A. Dolati, S. Rezagholibeiki, *Materials Chemistry and Physics*, **129**, 2011, 746.
- [28] G. Yilmaz, G. Hapcl, G. Orhan, *Materials Engineering and Performance*, **24**, 2015, 709.
- [29] A. Abdel Aal, H.B. Hassan, M.A. Abdel Rahim, *Electroanalytical Chemistry*, **17**, 2008, 619.
- [30] M.S. Suh, C.J. Park, H.S. Kwon, *Surface and Coatings Technology*, **200**, 2006, 3527.
- [31] C.A. Huang, J.H. Chang, C.Y. Chen, K.Y. Liao, J. Mayer, *Thin Solid Films*, **544**, 2013, 69.
- [32] K.H. Hou, Y.C. Chen, *Applied Surface Science*, **257**, 2011, 6340.
- [33] Z.J. Huang, D.S. Xiong, *Surface and Coatings Technology*, **202**, 2008, 3208.
- [34] S. Mahdavi, S.R. Allahkaram, *Alloys and Compounds*, **635**, 2015, 150.
- [35] L.M. Chang, M.Z. An, H.F. Guo, S.Y. Shi, *Applied Surface Science*, **253**, 2006, 2132.
- [36] L. Chen, L. Wang, Z. Zeng, J. Zhang, *Materials Science and Engineering: A*, **434**, 2006, 319.
- [37] M. Surender, B. Basu, *Tribology International*, **37**, 2004, 743.
- [38] S. Alirezaei, S.M. Monirvaghefi, M. Salehi, A. Saatchi, *Wear*, **262**, 2007, 978.
- [39] Y.T. Wu, L. Lei, B. Shen, W.B. Hu, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 2006, 441.
- [40] M. Kartala, M. Uysal, H. Gul, A. Alp, H. Akbulut, *Applied Surface Science*, **354**, 2015, 328.
- [41] W. Liping, G. Yan, X. Tao, X. Qunji, *Materials Chemistry and Physics*, **99**, 2006, 96.
- جریان، کاهش غلظت در فصل مشترک فلز-محلول جبران شده و تخلیه لایه دوگانه نیز صورت گرفته و لایه دوگانه شارژ می‌شود. این امر سبب توزیع یکنواخت یون‌ها و کاهش زبری سطح می‌شود، به طوری که با افزایش مقدار تلفیق نانوذرات  $\text{TiO}_2$  از ۲/۷۷٪ به ۵/۸۶٪، زبری سطحی از ۰/۲۹ میکرومتر به ۰/۲۳ میکرومتر کاهش یافت.
- ۶) در طی فرآیند سایش نانوذرات  $\text{TiO}_2$  از سطح کنده شده و به عنوان روان ساز جامد باعث کاهش تماس مستقیم بین پین ساینده و سطح می‌شوند و در نتیجه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین نانوذرات تیتانیا با ادغام اثرات ریزدانه‌نگی و استحکام بخشی توزیعی، سبب افزایش سختی و کاهش نرخ سایش می‌گردد. این امر موجب بهبود مقاومت به سایش پوشش‌های نانو کامپوزیتی  $\text{Ni-Fe-TiO}_2$  نسبت به پوشش پرمالوی  $\text{Ni-Fe}$  شده و کمترین نرخ سایش به مقدار  $(1/08 \text{ mg/N.m} \times 10^{-3})$  در نمونه FNT20 گزارش شد.
- ۷) با توجه به چسبندگی پین ساینده به سطح پوشش و تغییر شکل دائمی نمونه تحت بارگذاری، مکانیزم سایش پوشش پرمالوی  $\text{Ni-Fe}$  از نوع چسبان است. اما در پوشش‌های نانو کامپوزیتی، نانوذرات  $\text{TiO}_2$  در اثر سایش از سطح خارج شده و با ایفای نقش فاز سوم، تماس مستقیم میان زمینه و پین ساینده را کاهش می‌دهند. این رفتار موجب کاهش چسبندگی، شیارهای عمیق و حجم مواد سایشی کنده شده از سطح و در نتیجه مکانیزم نوع چسبان در پوشش پرمالوی  $\text{Ni-Fe}$ ، به مکانیزم دوگانه خراشان-چسبان در پوشش‌های نانو کامپوزیتی تبدیل می‌گردد.

## مراجع

- [1] G.P. Pavithra, A. Hegde, *Applied Surface Science*, **258**, 2012, 6884.
- [2] M. Ghorbani, A. Irajizad, A. Dolati, R. Ghasempour, *Alloys and Compounds*, **386**, 2005, 43.
- [3] V. Torabinejad, M. Aliofkhaezrai, S. Assareh, M.H. Allahyarzadeh, A. Sabour Rouhaghdam, *Alloys and Compounds*, **69**, 2017, 841.
- [4] V. Torabinejad, A. Sabour Rouhaghdam, M. Aliofkhaezrai, M.H. Allahyarzadeh, *Alloys and Compounds*, **657**, 2016, 526.
- [5] A. K. Chaudhari, V.B. Singh, *Alloys and Compounds*, **751**, 2018, 194.