فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۳۹۵

تاثیر زمان لایه نشانی بر کیفیت سطح و هدایت الکتریکی پوشش‌های کامپوزیتی کربن– نیکل

ولی دلوجی[۱]، علیرضا سوری[۲]، مهین سعدی آل کثیر[۱]

[۱] دانشگاه ملایر، دانشکده علوم، گروه فیزیک

[۲] دانشگاه ملایر، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مواد–سرامیک

* dalouji@yahoo.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۸ مرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۵

کلید واژه:

لایه‌های کربن– نیکل، زمان و نرخ لایه‌نشانی، ابعاد برخال، هدایت الکتریکی

چکیده:

در این کار ابعاد برخالی (فرکتالی) و هدایت الکتریکی لایه‌های کربن– نیکل در زمان‌های لایه‌نشانی ۵۰ تا ۶۰۰ ثانیه اندازه گیری شدند. به علت وجود مولفه‌های برخالی در توپوگرافی‌های سطح، چگالی طیفی توان (PSD) تمام لایه‌ها در محدوده فرکانس‌های بالا تغییراتی به صورت عکس قانون توانی نشان می‌دهند. ابعاد برخالی و توپوگرافی لایه‌های کربن – نیکل از ۵۰ تا ۱۸۰ ثانیه افزایش یافته‌اند، با این حال در ۶۰۰ ثانیه، این پارامترها کاهش یافته‌اند. مشاهده شد که با افزایش زمان لایه‌نشانی از ۵۰ تا ۱۸۰ ثانیه، هدایت الکتریکی در دمای اتاق (σ_{RT}) لایه‌ها از $۲/۸۷\times۱۰^{-۹}\ \Omega^{-1}cm^{-1}$ به $۲/۳\times۱۰^{-۸}\ \Omega^{-1}cm^{-1}$ افزایش می‌یابد و سپس به مقدار $۶/۶۲\times۱۰^{-۹}\ \Omega^{-1}cm^{-1}$ برای پوشش‌های لایه‌نشانی شده در ۶۰۰ ثانیه کاهش می‌یابد. ابعاد بر خالی و هدایت الکتریکی در دمای اتاق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی در توافق می‌باشند.

۱- مقدمه

به دلیل خواص جالب توجهی که کامپوزیت‌های کربن آمورف – فلز (فلز: نیکل، طلا، نقره، مس، ...) دارند، کاربردهای زیادی برای آن‌ها مطرح شده است که از جمله می‌توان به مواد پوششی در پزشکی، الکترونیک، مکانیک و اپتیک اشاره کرد[۴-۱]. پارامترهای زبری بر اساس نظریه‌های مرسوم به مدت نمونه‌گیری ابزارهای اندازه‌گیری بستگی دارند. پژوهشگران با به کارگیری روش‌های هندسی برخال توانستند بر این مشکل غلبه کنند، زیرا مدل‌های مربوط به برخال، شامل پارامترهای توپوگرافی هستندکه از دقت دستگاه‌های مورد استفاده مستقل می‌باشند[۵]. مفهوم ابعاد برخال، در مقابل روش‌های سنتی، هم در استفاده از طیف وسیعی از هندسه‌ی پیچیده سطح و هم در پیشبرد درک ما از چگونگی هندسه‌ی خواص سیستم‌های فیزیکی بسیار موفقیت آمیز بوده است[۶]. بعد برخال در محدوده‌ی

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]

$2 \leq D_f \leq 3$ می‌باشد که مقدار $D_f = 2$ نشان دهنده‌ی یک سطح صاف و افزایش مقدار D_f نشان دهنده‌ی افزایش زبری سطح می‌باشد[۷]. لایه‌های کامپوزیتی کربن– نیکل برای خواص جالب‌شان مانند کاهش تنش پسماند برای لایه‌های سخت[۸] ، بهبود ثابت دی‌الکتریک یا کاهش ضریب اصطکاک[۹] مورد مطالعه واقع شده‌اند. در گزارش‌های قبلی، وابستگی خواص نوری به زمان‌های لایه‌نشانی، نرخ لایه‌نشانی و دمای بازپخت مورد مطالعه قرار گرفته است[۱۲-۱۰]. در کار حاضر، اثر زمان لایه‌نشانی روی ابعاد برخال و هدایت الکتریکی در دمای اتاق (σ_{RT}) برای لایه‌های کامپوزیتی کربن- نیکل در زمان‌های لایه‌نشانی مختلف بررسی شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

لایه‌های کامپوزیتی کربن-نیکل که توسط دستگاه کندوپاش مغناطیسی با فرکانس رادیویی (RF-magnetron co-sputtering) تهیه شده اند، مورد بررسی قرار گرفتند. این لایه‌ها بر روی زیر لایه‌های شیشه‌ای با استفاده از هدف ترکیبی به قطر ۱۰ سانتی‌متر که شامل گرافیت خالص و باریکه‌هایی از نیکل خالص که به صورت یک مسیر دایره‌ای به گرافیت چسبیده، آماده شده‌اند. زیرلایه‌ها و هدف مذکور قبل از قرار دادن در محفظه‌ی لایه‌نشانی، در حمام استون به مدت ۲۰ دقیقه تمیز شدند، سپس با استفاده از جریان هوای گرم، خشک گردیدند. زیرلایه‌ها در دمای اتاق در یک محفظه‌ی لایه‌نشانی با فشار پایه 5×10^{-5} میلی بار رشد داده شدند. سپس با استفاده از گاز آرگون، فشار به اندازه‌ی 4×10^{-2} میلی بار رسانده و توسط سوپاپ، دریچه‌ی گاز ثابت نگه داشته شد. لایه‌نشانی در توان RF ثابت ۴۰۰ وات انجام شد. پوشش‌ها در زمان‌های ۵۰، ۹۰، ۱۸۰ و۶۰۰ ثانیه لایه‌نشانی شدند. ضخامت لایه‌ها با استفاده از دستگاه Tencor Alpha –Step500 Profiler اندازه‌گیری شد. نرخ لایه‌نشانی پوشش‌ها در زمان‌های لایه‌نشانی ۵۰، ۹۰، ۱۸۰ و۶۰۰ ثانیه، به ترتیب ۰/۸۴، ۱/۶، ۱/۷۱ و ۱ نانومتر بر ثانیه تخمین زده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (Field Emission Scanning Electronic Microscopy) برای بررسی مورفولوژی مورد استفاده واقع شد. آنالیزهای میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscopic) روی حالت‌های غیر تماسی برای به دست آوردن خواص مورفولوژی سطح مورد استفاده قرار گرفت. جذر میانگین مربعی (Root Mean Square) زبری لایه‌ها با استفاده از داده‌های AFM و بکارگیری نرم افزار 2007WSxM محاسبه گردید. هدایت الکتریکی جریان مستقیم نمونه‌های سرد شده در یک جریان هلیم پیوسته (دستگاه مدل دمای پایین نوری USA450CCS) و در یک محفظه‌ی ترمواستاتیک با محدوده‌ی دمایی ۵۰۰-۱۵ کلوین اندازه‌گیری شد. منبع توان با ولتاژ بالا (ORTEC 456, USA, 0-3kV) و الکترومتر با سیستم Keithley 196 و Metrix VX102A برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان بکار رفت.

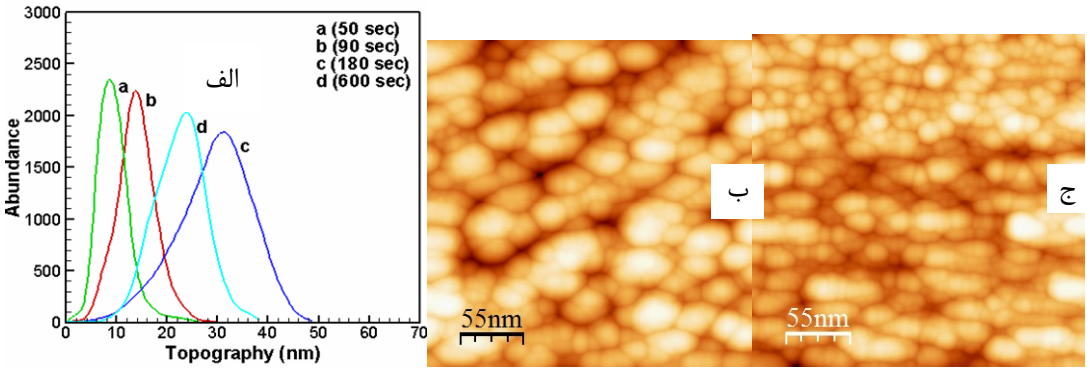
۳- نتایج و بحث

در شکل ۱ فراوانی و تصاویر دو بعدی AFM لایه‌های کربن– نیکل لایه‌نشانی شده در زمان‌های ۵۰ تا ۶۰۰ ثانیه

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]

نشان داده شده است. برای بررسی مورفولوژی دو منطقه در شکل۱ مشخص شده است. اولی در محدوده‌ی ۵۰ تا ۱۸۰ ثانیه که متوسط اندازه نانوذرات و زبری سطح لایه‌ها افزایش یافته است و دومی در محدوده‌ی ۱۸۰ تا ۶۰۰ ثانیه که متوسط اندازه نانوذرات و زبری سطح لایه‌ها کاهش یافته است. افزایش مقادیر جذر میانگین مربعی زبری (RMS) و اندازه‌ی نانوذرات در منطقه‌ی اول به علت افزایش نرخ لایه‌نشانی است، در حالی که، کاهش جذر میانگین مربعی زبری و اندازه‌ی نانوذرات در منطقه‌ی دوم به علت کاهش نرخ لایه‌نشانی می‌باشد[۱۰]. افزایش نرخ رشد لایه‌ها باعث می‌شود که ذرات فرودآمده زمان کافی در اختیار نداشته باشند تا به مناطق با سطح انرژی پایین‌تر بروند در نتیجه ذرات روی هم قرار می‌گیرند و سطح ناهموار می‌شود اما با کاهش نرخ رشد لایه‌ها ذرات فرود آمده زمان لازم در اختیار دارند و در نقاط با انرژی پایین قرار می‌گیرند و بنابراین سطح هموارتر می‌شود.



شکل ۱- الف) تغییرات فراوانی نانوذرات پوشش‌های لایه‌نشانی شده کربن– نیکل در زمان‌های ۵۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۶۰۰ ثانیه بر حسب توپوگرافی سطح و تصاویر AFM پوشش‌های لایه‌نشانی شده کربن– نیکل در ب) ۱۸۰ ثانیه و ج) ۶۰۰ ثانیه.

آنالیزهای چگالی طیفی توان (Power Spectral Density) نشان می‌دهند که چگونه زبری در مقیاس طول تغییر می‌کند. تبدیل سریع فوریه می‌تواند برای به دست آوردن توزیع فرکانسی مقطع عرضی در تمام محدوده‌ی فرکانسی مورد استفاده واقع شود. تصاویر AFM می‌توانند به پیکسل‌هایی به صورت یک منطقه‌ی مربعی کوچک که در آن بردارهای $h(x_i)$ و $h(yi)$ در موقعیت (x_i,y_i) ارتفاع هستند، تقسیم شوند. سپس متوسط چگالی طیفی توان به صورت زیر داده می‌شود[۱۳]:

$$p(n)=\frac{2L}{N}\left[<\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}}\left(FFT(h(x_i))^2\right)>_y+\sum\left(FFT(h(y_i))^2>_x\right)\right]$$

که در آن FFT، تبدیل سریع فوریه بردارهای $h(x_i)$ و (hy_i) هستند. مطابق با نظریه دینامیکی مقیاس گذاری برای سیستم‌های کم اندازه، ارتباط بین $P(k)$ و فرکانس k به صورت زیر می‌باشد[۱۴]:

$$P(k)\propto k^{-\beta}$$

که در آن β به عنوان شیب لگاریتمی توابع PSD برای فضاهای با فرکانس بالا محاسبه می‌شود. بعد برخال D_f به شیب β در مقیاس لگاریتمی به صورت $D_f=4-\beta/2$ مربوط می‌شود.

همان طور که در شکل۲-الف نشان داده شده است، با افزایش زمان‌های لایه‌نشانی از ۵۰ تا ۱۸۰ ثانیه، توابع PSD لایه‌های

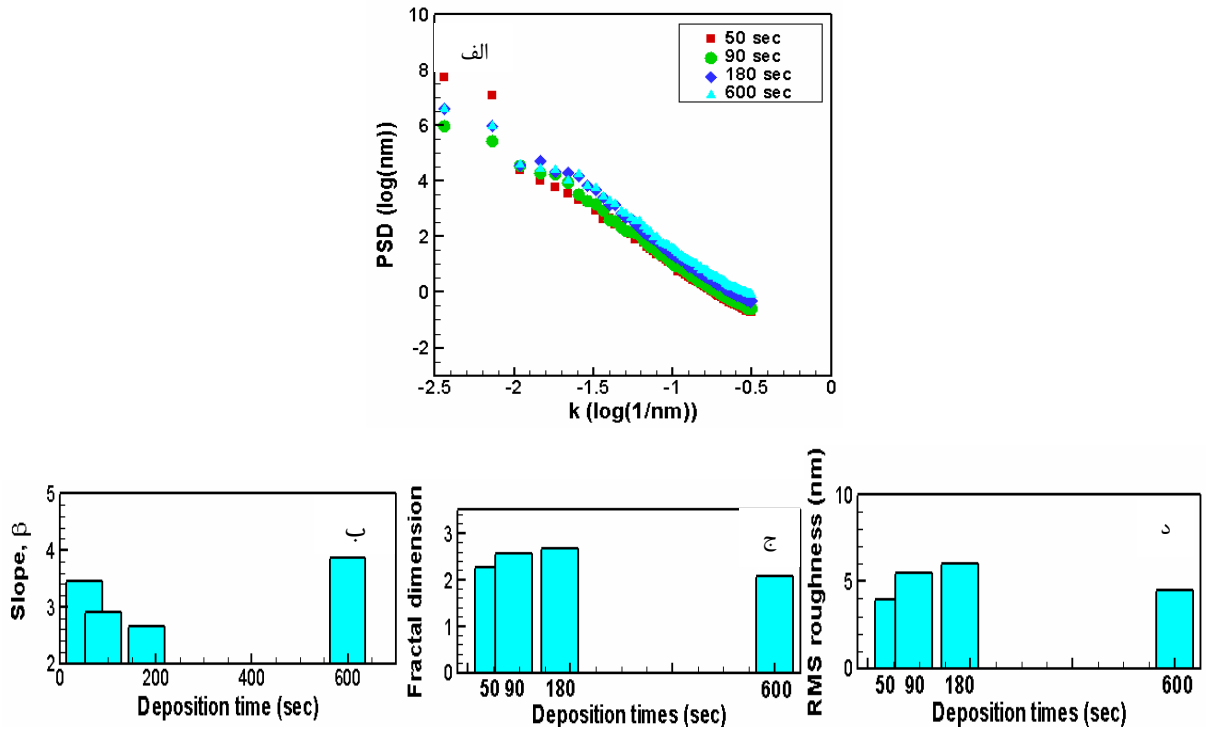
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]

کربن– نیکل تغییرات کمتری را بر حسب فرکانس فضایی نشان می‌دهند. این رفتار می‌تواند به علت رشد اندازه‌ی جانبی نانوذرات باشد[۱۵]. با این حال با افزایش زمان لایه‌نشانی از ۱۸۰ تا ۶۰۰ ثانیه، شیب توابع PSD افزایش می‌یابد که این می‌تواند به علت کاهش اندازه‌ی جانبی نانوذرات باشد[۱۵]. تمام لایه‌ها عکس تغییرات قانون توان را نشان می‌دهند، به خصوص در منطقه‌ی فرکانس فضایی بالا که اشاره به وجود اجزای برخال در توپوگرافی‌های سطح دارد. افزایش ابعاد برخال با افزایش اندازه جانبی نانوذرات در شکل۲–ب و ۲–ج شباهت زیادی به نتایج به‌دست آمده روی فیلم نازک ITO توسط داود رئوفی [۱۵] دارد.

مقادیر شیب β، بعد برخال و زبری سطح لایه‌ها در زمان‌های لایه‌نشانی مختلف در جدول ۱ و همچنین در شکل ۲–ب، ج و ۲–د به ترتیب نشان داده شده است. واضح است که مقادیر ابعاد برخال به جذر میانگین مربعی زبری لایه‌های سطح بستگی دارد. با افزایش زمان لایه‌نشانی به ۱۸۰ ثانیه، مقدار ابعاد برخال و RMS زبری لایه‌ها افزایش می‌یابد و بالای ۱۸۰ ثانیه ابعاد برخال و RMS زبری کاهش می‌یابد.

جدول ۱- مقادیر شیب β، بعد برخال D_f و RMS زبری لایه‌های کربن- نیکل در زمان‌های لایه‌نشانی مختلف

زمان لایه‌نشانی (ثانیه)	شیب β	بعد برخال D_f	RMS زبری (نانومتر)
۵۰	۳/۴۶	۲/۲۷	۳/۹۶
۹۰	۲/۹	۲/۵۵	۵/۵۲
۱۸۰	۲/۶۶	۲/۶۷	۶/۰۲
۶۰۰	۳/۸۶	۲/۰۷	۴/۵۳

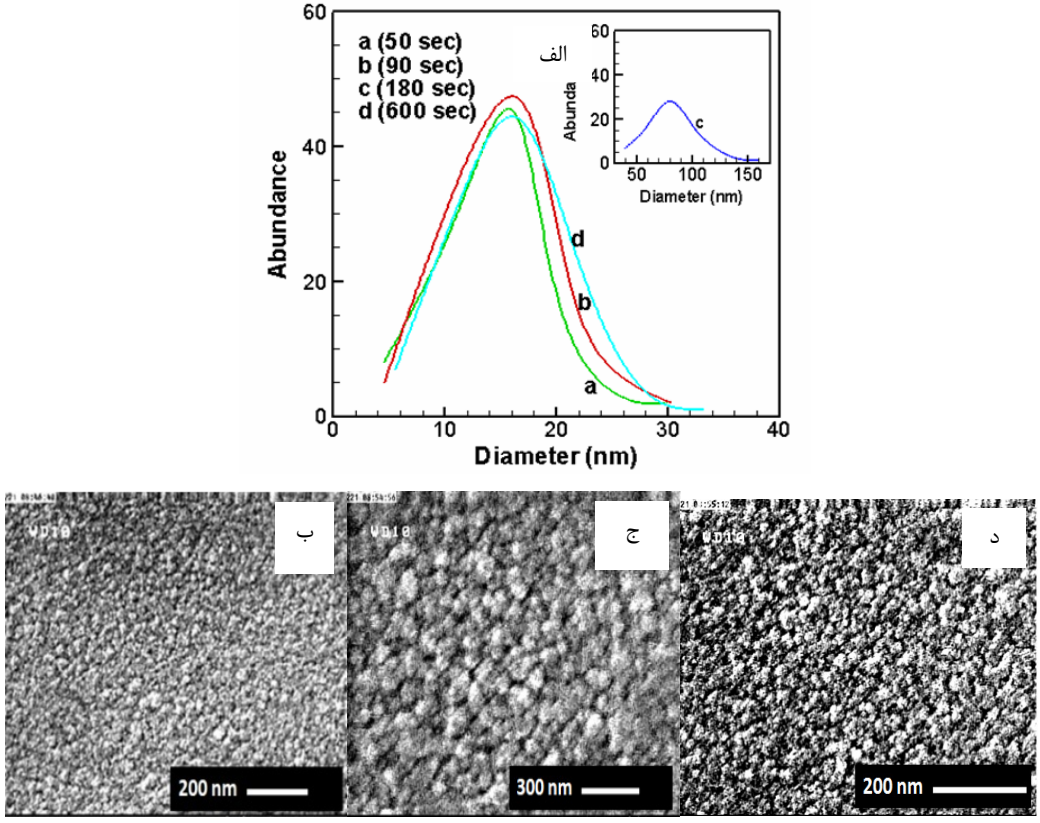


شکل ۲- الف) چگالی طیفی توان (PSD) برحسب فرکانس k، ب) شیب β، ج) ابعاد برخال و د) RMS زبری لایه‌های کربن- نیکل در زمان‌های لایه‌نشانی مختلف

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]

در شکل ۳ رشد اندازه‌ی نانوذرات در تصاویر FESEM نشان داده شده است. شکل ۳-الف) فراوانی نانوذرات به دست آمده از تصاویر FESEM لایه‌های کربن- نیکل لایه نشانی شده در زمان‌های ۵۰ تا ۶۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. تغییر در مورفولوژی لایه‌ها می‌تواند با افزایش مقدار نیکل لایه‌ها به علت تغییر در نرخ لایه‌نشانی مشاهده شود. همان‌طورکه در تصاویر FESEM نشان داده شده است، اندازه‌ی ذرات برای پوشش‌های لایه‌نشانی شده در زمان‌های ۵۰ تا ۱۸۰ ثانیه افزایش یافته و در ۱۸۰ ثانیه بیشترین مقدار را دارد. با این حال اندازه‌ی ذرات به طور قابل توجهی برای پوشش‌های لایه‌نشانی شده با زمان ۶۰۰ ثانیه کاهش یافته است.



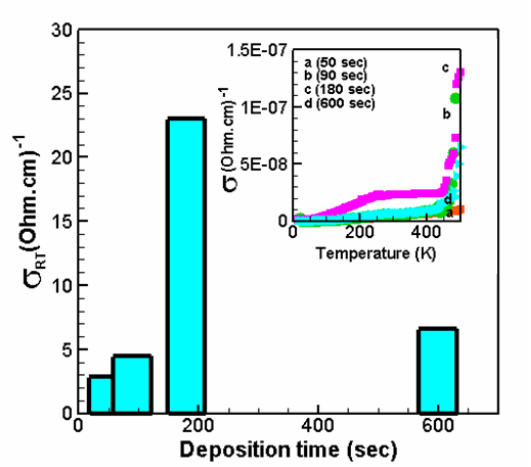
شکل ۳- الف) تغییرات فراوانی نانوذرات لایه‌های کربن- نیکل لایه‌نشانی شده در زمان‌های ۵۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۶۰۰ ثانیه بر حسب قطر نانو ذرات و تصاویر FESEM پوشش‌های لایه‌نشانی شده در ب) ۵۰ ثانیه، ج) ۱۸۰ و د) ۶۰۰ ثانیه.

در شکل ۴ تغییرات هدایت الکتریکی در دمای اتاق (σ_{RT}) برحسب زمان لایه‌نشانی نشان داده شده است. با افزایش زمان لایه‌نشانی از ۵۰ تا ۱۸۰ثانیه، هدایت الکتریکی در دمای اتاق از $2/87\times10^{-9}\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$ به $3/2\times10^{-8}\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$ افزایش می‌یابد و سپس برای پوشش‌های لایه‌نشانی شده در ۶۰۰ ثانیه به مقدار $6/62\times10^{-9}\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$ کاهش می‌یابد. افزایش هدایت الکتریکی از ۵۰ تا ۱۸۰ثانیه ممکن است به علت افزایش ناخالصی نیکل و انحراف از استوکیومتری که باعث حضور نقص‌های ذاتی مانند تخلخل ناشی از اکسیژن و نیکل است، نسبت داده شود. همچنین

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]

کاهش هدایت الکتریکی از ۱۸۰ تا ۶۰۰ ثانیه به کاهش میزان ناخالصی نسبت داده شود. این کاهش میزان ناخالصی به خاطر کاهش نرخ رشد لایه‌های نازک می‌باشد. تصویر ضمیمه شکل ۴، هدایت الکتریکی لایه‌ها با دما، برای لایه‌های کربن– نیکل لایه‌نشانی شده در زمان‌های ۵۰ تا ۶۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. در تمام محدوده‌ی دمایی ۱۵ تا ۵۰۰ کلوین، با افزایش دما، هدایت الکتریکی لایه‌ها افزایش می‌یابد که این نشان دهنده‌ی رفتار نیمه هادی‌ها است. بدیهی است که هدایت الکتریکی لایه‌ها با افزایش زمان لایه‌نشانی از ۵۰ تا ۱۸۰ ثانیه، به علت افزایش اندازه‌ی ذرات و از این رو کاهش پراکندگی مرزدانه‌ها، افزایش می‌یابد. علاوه بر اندازه ذرات میزان نانو ذرات نیکل نیز در افزایش هدایت الکتریکی لایه‌ها موثر است. از زمان ۱۸۰ تا ۶۰۰ ثانیه، به علت کاهش اندازه‌ی ذرات و از این رو افزایش پراکندگی مرزدانه، هدایت الکتریکی لایه‌ها کاهش می‌یابد چون افزایش ابعاد برخالی ارتباط مستقیم با افزایش نانو ذرات در لایه‌ها دارد بنابراین با افزایش ابعاد برخالی هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. افزایش پراکندگی مرز دانه‌ها و کاهش هدایت الکتریکی با کار انجام شده توسط A. Yidiz و همکارانش[۱۶] روی اکسید تیتانیم شباهت دارد.

تغییرات هدایت الکتریکی برحسب زمان لایه‌نشانی در دمای ۱۵ تا ۵۰۰ کلوین، در توافق خوبی با تغییرات هدایت الکتریکی در دمای اتاق (σ_{RT}) برحسب زمان لایه‌نشانی می‌باشد.



شکل ۴- تغییرات هدایت الکتریکی در دمای اتاق بر حسب زمان لایه‌نشانی. شکل ضمیمه: تغییرات هدایت الکتریکی لایه‌ها نسبت به دما برای پوشش‌های لایه‌نشانی شده در زمان‌های ۵۰ تا ۶۰۰ ثانیه

۴- نتیجه‌گیری

در این کار نشان داده شد که زمان لایه‌نشانی لایه‌ها، نقش مهمی در ابعاد برخال و هدایت الکتریکی لایه‌های کربن- نیکل دارد. مشاهده گردید که می‌توان ارتباطی بین نتایج به دست آمده از خواص الکتریکی و ابعاد برخالی لایه‌ها با استفاده از تصاویر FESEM به دست آورد. همچنین نشان داده شد که ابعاد برخال و RMS زبری در ۱۸۰ ثانیه، به ترتیب مقادیر ماکزیمم ۲/۶۷ و ۶/۰۲ نانومتر را دارند که در توافق با خواص الکتریکی می‌باشند.

مراجع

[1] J. L. Endrino, R. Escobar Galindo, H.S. Zhang, M. Allen, R.Gago, A.Espinosa, A.Anders, *Structure and properties of silver-containing a-C(H) films deposited by plasma immersion ion implantation*, Surface and Coatings Technology 202 (2008) 3675-3682.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]

[2] Y. Y. Chang, D. Y. Wang, W. Wu, *Catalysis effect of metal doping on wear properties of diamond-like carbon films deposited by a cathodic-arc activated deposition process*,Thin Solid Films 420-421 (2002) 241–247.
[3] T. Ghodselahi, M. A. Vesaghi, A. Shafiekhani, M. Ahmadi, M. Panahandeh, M. HeidariSaani, *Metal-Nonmetal Transition in the Copper-Carbon Nanocomposite Films*, physica B 405 (2010) 3949-3951.
[4] C. J. Zong, J. Luo, B. Fang, B. N. Wanjal., P.N. Njoki. *Nanostructured catalysts in fuel cells,* Nanotechnology 21, (2010) 062001.
[5] P. Pfeifer, Y. J. Wu, M. W. Cole, J. Krim, *Multilayer adsorption on a fractally rough surface*, Phys. Rev. Lett. 62 (1998) 1997.
[6] T. H. Fang, S. R. Jian, D. S. Chun, *Nanotribology and fractal analysis of ZnO thin films using scanning probe microscopy*, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 878-883.
[7] B. Mandelbrot, *The fractal Geometry of Nature*, New York : Freeman, 1982.
[8] S. Kukielka, W. Gulbinski, Y. Pauleau, S. N. Dub, J. J. Grob, *Composition, mechanical properties and friction behavior of nickel/hydrogenated amorphous carbon composite films*, Surf. Coat. Technol. 200 (2006) 6258-6262.
[9] N. Sbai-Benchikh, A. Zeinert, H Caillierez, C. Donnet, *Optical properties of nickel-incorporated amorphous carbon film deposited by femtosecond pulsed laser ablation*, Diamond Relat.Mater.18, (2009) 1085–1090.
[10] S. M. Elahi, V. Dalouji, S.Valedbagi., *The Effect of Deposition Rate on Morphology and Structural Properties of Carbon-Nickel Composite Films*, Advance in Materials Science and Engineering, 2013, Article ID 506549, 3 pages.
[11] S. M. Elahi, V. Dalouji, D. Mehrparvar, S.Valedbagi.,*Influence of Deposition Rate on Optical Properties of RF-Magnetron Sputtered Carbon–Nickel Composite Films Deposited at Different Deposition Times*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 587 (2013)105-112.
[12] V. Dalouji, S. M. Elahi., *Effect of annealing temperature on the optical loss and the optical constants of RF-magnetron sputtered carbon — nickel composite films,* Journal of Korean physical Society, 64 (2014) 857-862.
[13] J. M. Bennett, L. Mattson, *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, second ed., Optical Society of America, Washington, DC, 1999.
[14] T. Babadagli, K. Develi, *Fractal characteristics of rocks fractured under tension*, Theor. Appl. Frac. Mech. 39 (2003) 73–88.
[15] D. Raoufi, *Fractal analyses of ITO thin films: A study based on power spectral density*, Physica B 405 (2010) 451–455.
[16] A. Yidiz, N. Serin, M. Kasab, T Serin, D. Mardare, *The thickness effect on the electrical conduction mechanism in titanium oxide thin films*, Journal of Alloys and Compounds, 493 (2010) 227-232

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.3.7.1]