بررســی تأثیر دما و مدت زمان الکتروپلیتینگ در لایه نشانی پلی پیرول در ساخت ماده هوشمند کامپوزیت پلیمرِ یونی - فلزی

مهران رزاقی قلعه[1]، بهمن میرزاخانی[2]، مهدی رئوفی[3]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک

۲- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک

۳- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک

Experimental Study of the Effect of Electroplating Temperature and Time in Manufacturing of Smart Material of Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC)

M.Razaghi, B.Mirzakhani, M.Raufi

Arak University, E-mail: mehran.razaghi.90@gmail.com

چکیده

کامپوزیت‌های پلیمر یونی - فلزی (IPMC) از جمله مواد هوشــمندی هســتند که اخیراً در صنعت مکاترونیک کاربردهای گســترده‌ای یافته‌اند. این کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های لایه‌ای فلزی پلیمری بوده که ســاخت آنها از تکنولوژی پیچیده‌ای برخوردار اســت. این کامپوزیت‌ها نســل جدیدی از مواد هوشــمند هســتند که در محرک‌ها استفاده می‌شوند. هدف از تحقیق حاضر ســاخت یک کامپوزیت پلیمر یونی- فلزی با استفاده از لایه نشانی و بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر خواص و ساختار آن است. بدین منظور پس از تهیه ورق پلیمر پلی وینیل دن فلورید متخلخل پوششی از طلا با اندازه ذرات نانومتری و ضخامتی میکرونی بر روی ورق نازک آن به روش کندوپاش ایجاد گردید. در ادامه به کمک روش الکتروپلیتینگ با اســتفاده محلول پروپیلن کربنات، پیرول و نمک تری فلوئورومتان سولفونیمید لیتیوم، در شرایط کاملاً کنترل شده پلی پیرول برروی طلا نشانده شد. جهت بررسی کیفیت پوشش از بررســی‌های میکروســکوپ الکترونی و آنالیز طیف ســنجی مادون قرمز اســتفاده گردید. پارامترهای موثر بر لایه نشانی پلی پیرول نظیر دمای کاری و مدت زمان لایه نشانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در غلظت محلول الکترولیت پیرول و نمک ۰/۱ مولار و دمای ۲۵- درجه سانتی‌گراد با افزایش مدت زمان لایه نشانی، ضخامت پوشش پلی پیرول بیشتر شده و کیفیت سطحی آن بهتر گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پلیمرهای الکترواکتیو،کامپوزیت‌های پلیمری- یونی فلزی، لایه نشانی، پلی پیرول.

Abstract

In recent years, Ionic Polymer Metal Composites (IPMC) have been extensively used in various industries. They are new generation of smart materials for fabrication of actuators. IPMC is a layered polymer-metal composite with high technology processing. The objective of this project is production and processing of Polypyrrole - gold - Polyvinylidene fluoride (PVDF) composite. The porous PVDF membranes were first sputtered with gold as a conductive layer. The solution of propylene carbonate, pyrrole and lithium triflouromethane sulfonamide salt employed as electrolyte for electroplating of poly pyrrole on gold layer in controlled condition. The composite layers and the influences of temperature, current and time of electroplating electrolyte concentration and the thickness of gold layer on characteristics of IPMC were investigated with SEM and FTIR analysis. The results indicated that with increase of the thickness of gold layer and electroplating duration the thickness of polypyrrole layer increases in 0.1 molar concentration of pyrrole and lithium triflouromethane sulfonamide salt temperature of -25 °C.

Keywords: Electro active polymers, Ionic polymermetal composite (IPMC), Polyvinylidene fluoride (PVDF), gold coating, Polypyrrole.

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

مقدمه

با پیشـرفت سـریع علم مواد در علوم و صنایـع مختلف، مواد هوشـمند مختلفی به سـرعت توسـعه یافته‌اند که در بسـیاری از تجهیزات مورد اسـتفاده قرار می‌گیرند. مواد هوشمند اصطلاحاً به موادی گفته می‌شـود که می‌توانند با درک محیط و شـرایط اطراف خود نسبت به آن واکنش مناسب نشان دهند. پلیمرها نیز از این قضیه مستثنا نمی‌باشند و در برابر محرک‌های مختلف نظیر دما، میدان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسـی، عکس‌العمل‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند[۱]. پلیمرهای اکتیو، پلیمرهای هوشمندی هستند که در پاسخ به محرک‌های خارجی مانند میدان الکتریکی، pH، میدان مغناطیسی، نور تغییر شکل و اندازه می‌دهند[۲].

پلیمرهای الکترواکتیـو((Electro active Polymer(EAP)، موادی می‌باشـند که با جریان الکتریکی تحریک می‌شـوند[۲و۳]. این مواد بـا توجه به مکانیسـم تحریک به دو نـوع پلیمرهـای الکترواکتیو الکترونی و پلیمرهای الکترواکتیو یونی طبقه‌بندی می‌شـوند. بطور خلاصه می‌توان گفت کـه پلیمرهای الکترواکتیو الکترونی توسـط میـدان الکتریکی و یا نیروهای کولن تحریک می‌شـوند و پلیمرهای الکترواکتیو یونی توسط تحرک و یا انتشار یون و مواد مزدوج خود شکل تغییر پیدا می‌کنند[٤].

پلیمرهـای الکترواکتیـو در مقایسـه با آلیاژهـای حافظه دار، سـرعت پاسخ بالاتر، چگالی کمتر و حالت ارتجاعی بیشتری داشته و همچنین نسبت به سرامیک‌های الکترواکتیو دارای چگالی و ولتاژ تحریک کمتری می‌باشند[۳].

پلیمرهای الکترواکتیو یونی شـامل دو الکترود و یک الکترولیت در داخل خود هسـتند. بزرگترین مزیت این مواد این اسـت که آنها به ولتاژهای پایین حدود ۱ ولت نیز پاسـخ می‌دهند. پلیمری که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته می‌شود از نوع الکترواکتیو یونی می‌باشد و به کامپوزیت‌های فلزی پلیمر یونی (Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC)) مشهور می‌باشند.

IPMCها در برش مقطع عرضی شبیه به یک ساندویچ با لایه‌های الکترود در خارج و ماتریس پلیمری در مرکز می‌باشند. همچنین این روش قابلیـت انعطاف‌پذیری بهتـری در انتخاب مواد الکترود فلزات گوناگونـی مانند پلاتین، پالادیوم، نقره، طلا، کربن و گرافیت می‌دهد. نوارهای پلیمر همانند الکترودهای سـلول‌های الکتروشیمیایی عمل می‌کنند. هنگامی که پتانسـیلی به الکترودها اعمال شود، اکسایش در آند و احیا در کاتد رخ می‌دهد. بـرای حفظ تعادل بارهای الکتریکی، یون‌ها به داخل و خارج از پلیمر و الکترولیت منتقل می‌شـود. متورم شدن و انبساط، زمانی اتفاق می‌افتد که یون‌های اضافی وجود داشته باشد و انقباض، زمانی که یون‌ها حذف شده باشند روی می‌دهد.

پلیمرهای الکترواکتیو پلیمرهای رسـانای چند لایه می‌باشند که در ساخت آنها از پلی وینیل دن فلورید (PVDF) و پلی پیرول (PPY) اسـتفاده شـده و با ولتاژی در حدود کمتر از ۲ ولت جابجایی پیدا می‌کنند[۵].

IPMCهـا برای دامنه وسـیعی از کاربردهـای مختلف از جمله بکارگیـری در نیـروی محرکـه هیدرودینامیک، شناورسـازی و باله‌های پرواز مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای مهم این مواد در صنعت مکاترونیک می‌توان به سـاخت گریپرهای رباتیکی، کاهنده‌هـای نویز، لباس‌هـای مخصوص فضانـوردی و غواصی، عملگرهای تجهیزات نجومی، آنتن‌ها و رادارهای با قابلیت انبسـاط، حسگرهای بویایی اشاره کرد[٦].

هدف از این پژوهش، سـاخت و بررسـی رفتـار و خواص یک کامپوزیت پلیمر یونی- فلزی اسـت. بدین ترتیب که پوشـش پلیمر یونی ایجاد شـده بروی یک فلز از نظر فصل مشـترک و سـاختار میکروسـکوپی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین شـرایط بهینه ساخت IPMC مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

مواد و روش تحقیق

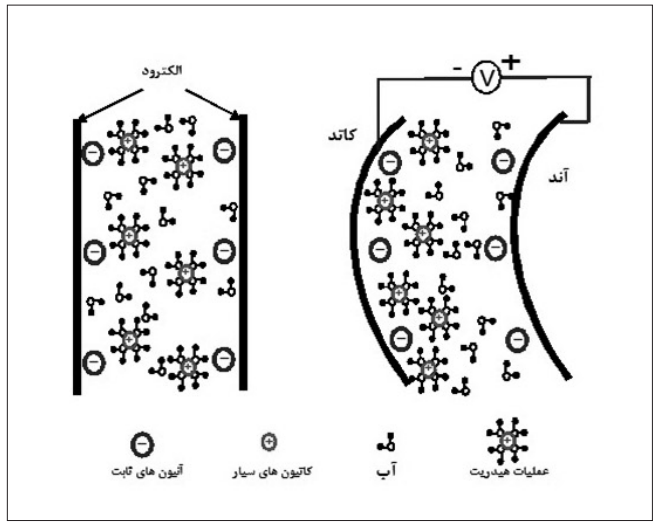
در واقع، پلیمرهای الکترواکتیو، پلیمرهای رسـانای چند لایه با قابلیت هدایت الکتریکی است. شکل ۱ شماتیکی از عملکرد پلیمرهای الکترواکتیو چند لایه را نشان می دهد.

کامپوزیت‌هـای IPMC در نظـر گرفته شـده در تحقیق حاضر شـامل یک لایه پلیمر PVDF متخلخـل به ضخامت ۱۰۰ میکرون در وسـط اسـت که دو طرف آن به روش کندوپاش پوشش طلا داده شـده است. عمل پوشش دهی توسط یک دستگاه کندوپاش صورت گرفت. شکل۲، تصویر شماتیکی از ساختار کامپوزیت پلیمر- فلزی یونی نمایش داده شده است.

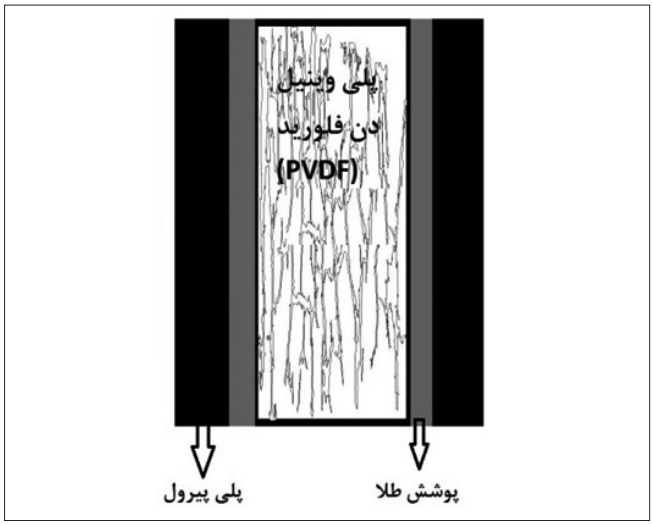
کندوپاش در شرایطی با فشار خلاءِ اولیه ۱۰۰ تور و جریان ۲۵ میلـی آمپر و طی دو مدت زمان متفاوت انجام گرفت که درجدول ۱ شرایط آن نشان داده شده است.

برای ایجاد لایه سـوم که یک لایه پلیمر یونی است مطابق شکل ۳، از محلـول الکترولیت پروپیلن کربنات، نمـک تری فلوئورومتان سـولفونیمید لیتیوم، پیرول و آب و روش الکتروپلیتینگ اسـتفاده گردیـد. در این روش بـه کمک جریان الکتریکی، لایه نشـینی مواد انجام می‌گیرد. در واقع این روش رسـوب از یک محلول الکترولیت در اثـر عبور جریـان الکتریکی صورت می‌گیرد. بـرای این منظور می‌بایست از یک منبع جریان برای اعمال ولتاژ استفاده نمود.

در تحقیـق حاضر غلظت محلـول الکترولیـت ۰/۱ مولار برای لایه نشـانی پلی پیرول در نظر گرفته شـد. بدیـن منظور برای هر



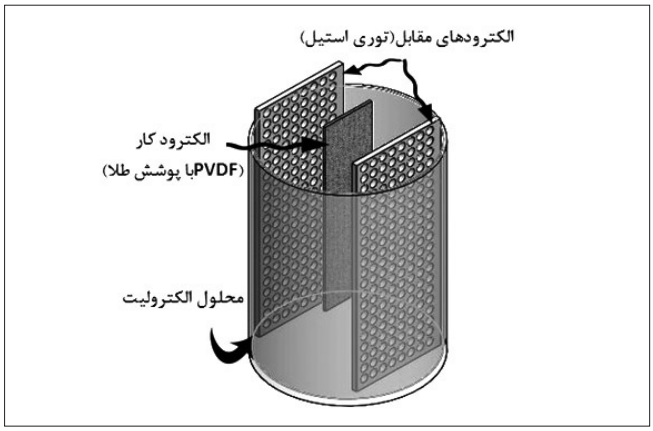
شکل ۱- نمایش شماتیک از سه حالت پلیمرهای چند لایه



شکل۲- شماتیکی از ساختمان کامپوزیت پلیمری فلزی - یونی

جدول۱- شرایط لایه نشانی طلا روی ورق PVDF

نمونه	زمان کندوپاش (دقیقه)	ضخامت تقریبی (میکرون)
A	۳/۵	۴
B	۴/۵	۶



شکل۳- ظرف بشر حاوی محلول الکترولیت و الکترود کار و الکترود ناظر

نمونه آزمایش شـده درصد ترکیبات مـورد نیاز محلول الکترولیت حاوی نمک تری فلوئورو متان سولفونیمید لیتیوم، پیرول و پروپیلن کربنات محاسبه شده و برای انجام آزمایش آماده می‌شد.

مطابق شـکل ۳ بعد از آمـاده کردن محلـول الکترولیت، آن را داخل یک محفظه یونولیتی قرار داده و با اسـتفاده از یخ خشـک که در اطـراف ظرف محلول ریخته شـده بود، دمـای محلول به دمای منفی مورد نیاز تنظیم می‌گردید و دما در طول آزمایش توسـط یک دماسنج دیجیتالی کنترل می‌شد. قطعات PVDF پوشش داده شده با طلا الکترود کار گفته می‌شـود و دو توری فولاد ضد زنگ الکترود ناظر هسـتند. به الکترد کار قطب مثبـت و الکترود ناظر قطب منفی متصل گردید. بعد از آن که دمای محلول به دمای مورد نظر رسید، منبع جریان وصل می‌گردید. در اثر برقراری جریان فرآیند اکسایش و احیاء آغاز می‌شـود. در این صـورت یون‌های پیرول موجود در الکترولیت تحریک شـده و از سـمت الکترود آند به سـمت الکترود کاتد یا الکترود کار حرکت می‌کنند و طی فرآیند پلیمرازسیون پیوند یون‌های پیرول شکسته شده و یون‌های لایه ظرفیت پیرول آزاد شده و با حرکت به سـمت PVDF با پوشش طلا، باعث می‌شود بر روی لایه طلا نشسـته و انباشته شوند. میزان و شکل انباشتگی ذرات به میزان غلظت، دمای کاری، فاصله الکترودها، ضخامت طلای پوشش داده شده، زمان الکتروانباشت و چگالی جریان بستگی دارد.

فرآیند لایه نشانی به روش الکتروپلیتینگ به مدت زمان-های ٤ و ٨ ساعت در دماهای مختلف و دیگر شرایط مشابه که در جدول۲ آورده شـده اسـت. تعداد ۳ نمونه با شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. سـپس این نمونه‌ها مورد آزمایش واقع شـد تا شرایط بهینه برای ساخت نمونه کامپوزیت پلیمر یونی - فلزی بدست آید.

بعد از پایان لایه نشـانی نمونه با اسـتون شسـته می‌شد و در داخل محلـول ۰/۱ مولار پروپیلن کربنات و نمک تری فلوئورومتان سـولفونیمید لیتیوم قرار داده می‌شد تا نمک به داخل آن نفوذ کرده و جذب آن شود.

نتایج و بحث

پوشش طلا پوشش طلا روی ورق PVDF

پوشـش طلا بر روی پلیمر PVDF توسـط دستگاه کندوپاش و برای مدت زمان ٤/٥، دقیقه ایجاد گردید. شـکل ٤، تصویرSEM از

جدول۲ نمونه‌ها لایه نشینی شده با شرایط آزمایش شده

نمونه	زمان اسپاترینگ طلا(دقیقه)	غلظت محلول الکترولیت (مولار)	دمای لایه نشانی(C°)	زمان لایه نشانی (hr)
۱	۴/۵	۰/۱	۲۵- تا ۳۰-	۴
۲	۴/۵	۰/۱	۲۰- تا ۲۵-	۸
۳	۴/۵	۰/۱	۲۰- تا ۲۵-	۴

جدول۳- شرایط لایه نشانی پروپیلن برای بررسی اثر دما

نمونه	زمان پوشش طلا(دقیقه)	غلظت محلول الکترولیت(مولار)	دمای لایه نشانی(C°)	زمان لایه نشانی(hr)
۱	۴/۵	۰/۱	۲۵- تا ۳۰-	۴
۳	۴/۵	۰/۱	۲۰- تا ۲۵-	۴

سطح و برش عرضی ورق متخلخل PVDF پوشش داده شده با طلا را نشـــان می‌دهد. اندازه ذرات طلا در حـــدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر است. ضخامت لایه طلا نیز ۱۰ تا ۱۵ میکرومتر است.

Alici و همکارانش [۷] نشـــان دادند که ضخامت فلز نشان داده شـــده روی دو طرف ورق PVDF متخلخل هم بر خواص پوشـــش نهایـــی و هم بر ویژگی‌های کامپوزیت IPMC ســـاخته شـــده تأثیر بگذارد.

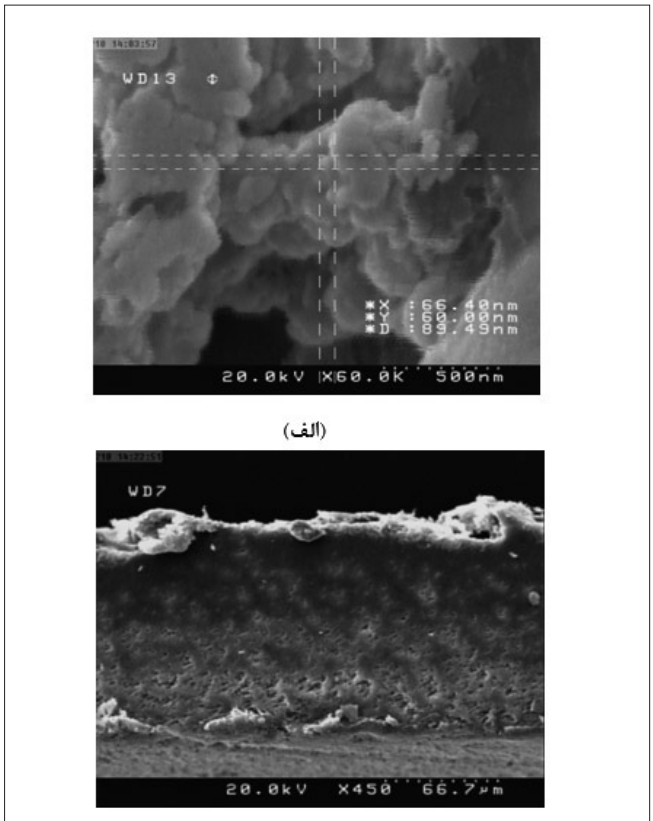
بررسی پوشش پلی پیرول

اثر دما بر لایه پوشش

دمای محلول الکترولیت می‌تواند بر لایه پلی پیرول تشکیل شده تأثیر گذارد. افزایش دما باعث افزایش هدایت الکترولیت، سرعت نفوذ، ازدیاد انحلال شیمیایی درآند و انحلال مجدد در کاتد می‌شود. دمای محلول الکترولیت برای لایه نشانی در منابع ۲۴- تا ۳۰- سانتیگراد گزارش شده است [۷-۱۰]. در این تحقیق لایه نشانی پروپیلن در دو محـــدوده دمایی ۲۰- تا ۲۵- و ۲۵- تا ۳۰- ســـانتیگراد انجام گرفت که در جدول ۳ شرایط آزمایش برای این بررسی، آورده شده است.

برای مقایســـه نمونه‌ها و بررســـی تأثیر دما بر لایه نشانی پلی پیـــرول، از طیـــف ســـنجی FTIR و تصاویر SEM اســـتفاده گردید. شـــکل ۵، طیف‌های FTIR نمونه‌های ۱ و ۳ را بطور مقایسه‌ای نشان می‌دهد. در جـــدول ٤ نیز عدد موجی‌های قوی‌تری که با پلی پیرول مشابه هستند، نشان داده شده است.

با توجه بـــه جدول ٤، نمونه ۳ در عـــدد موجی ۱٤۱۰ پیک‌هایی می‌دهد که نشـــان دهنده گمارش C=C کششی است. هر دو نمونه ۱ و ۳ در عدد موجی ۱۰٤۰ پیک داشـــته که نشان‌دهنده گمارش N-H

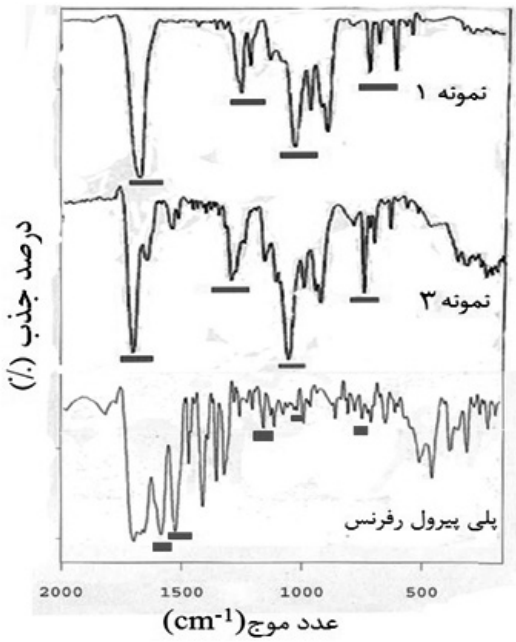


شکل ۴- تصویر SEM ورق PVDF لایه نشانی شده با طلا. الف) سطح ب) برش عرضی

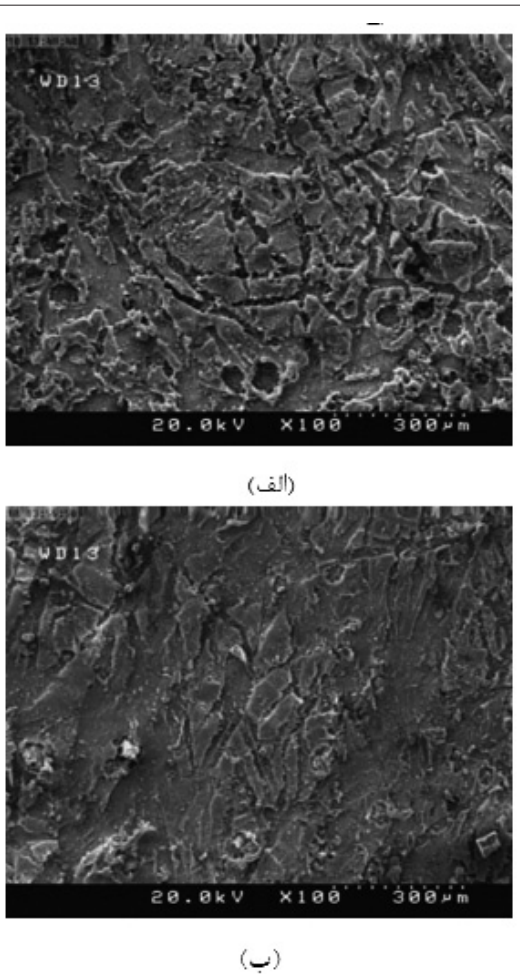
خمشی می‌باشند و همچنین هر دو نمونه در عدد موجی مشابهی با پلـــی پیرول مرجع [۱۱] در عدد موجی ۸۹٦ با گمارش C-H دارند. با توجه به نمونه‌های ۱ و ۳ و مقایســـه با طیف‌های پلی پیرول دارای عدد موجی‌های مشـــترک بوده و بنابراین لایه پوشـــش داده شـــده بروی آنها پلی پیرول است.

تصاویر SEM نشـــان دهنده در شکل ٦ وشکل ۷ نیز دانه-بندی تشـــکیل شده پلی پیرول در نمونه‌های ۱ و ۳ را نمایان می‌کند. شکل ٦ تصویر میکروسکوپی از ســـطح نمونه‌ها و شکل ۷ تصویر مقطع نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

با توجه به شـــکل ٦ و شکل ۷ می‌توان دریافت که ضخامت پلی پیرول نمونه ۱ نســـبت بـــه نمونه ۳ دارای ســـاختار یکنواخت تر و دانه‌بندی ریزتری است. زیرا دمای لایه نشانی برای نمونه ۳ نسبت به نمونه ۱ بیشـــتر اســـت. می‌توان گفت با افزایش دما رشد بلورها تسریع شده و ساختار درشت‌تری بوجود می‌آید. همچنین با افزایش دما که کاهش مقاومت الکترولیت را به همراه دارد، چگالی جریان در ســـطح کاتد را کاهش داده و از پیدایش ناهمواری‌هایی که در دمای کم به وجود می‌آید جلوگیری می‌کند.



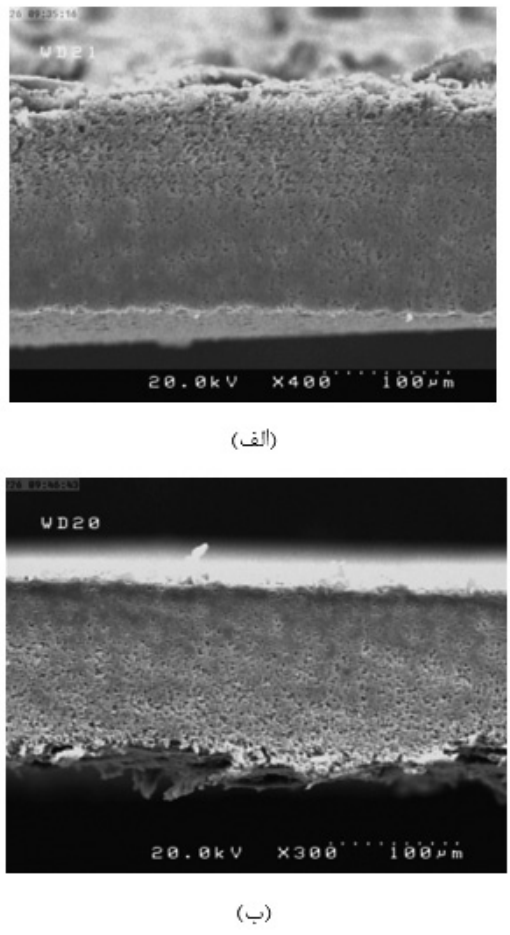
شکل ۵ مقایسه طیف‌های FTIR نمونه‌های ۱ و ۳



شکل۶- تصویرSEM از سطح مقطع. الف) نمونه۱ ب) نمونه ۳

جدول ۴مقایسه عدد موجی‌های نمونه‌های ۱ و ۳

ردیف	پلی پیرول	نمونه ۱	نمونه ۳	گمارش
۱	۱۴۵۸	-	۱۴۱۰	C=C کششی
۲	۱۰۴۱	۱۰۴۰	۱۰۴۰	N-H خمشی
۳	۹۰۸	۸۹۶	۸۹۶	C-H خمشی



شکل۷- تصویر SEM مقطع. الف) نمونه ۱ ب)نمونه ۳

تأثیر مدت زمان لایه نشانی پلی پیرول

برای بررسی تأثیر زمان لایه نشانی پلی پیرول، دو نمونه (نمونه‌های ۲ و ۳) در شرایط غلظت محلول الکترولیت، دما و ضخامت طلای یکسان به مدت زمان‌های مختلف (به ترتیب ٤ و ٨ ساعت) در فرآیند الکتروپلیتینگ مورد آزمایش واقع شدند. شرایط این دو نمونه در جدول ٥ آورده شده است.

در شکل ٨ تصویر طیف‌های FTIR نمونه‌های ۲ و ۳ و در جدول ٦ عدد موجی‌های نمونه‌ها در مقایسه با پلی پیرول مرجع مقایسه شده‌اند.

جدول ۵ نمونه‌های مقایسه شده از نظر تأثیر مدت زمان لایه نشانی پلی پیرول

نمونه	زمان پوشش طلا(دقیقه)	غلظت محلول الکترولیت(مولار)	دمای لایه نشانی(C^o)	زمان لایه نشانی(hr)
۲	۴/۵	۰/۱	۲۰- تا ۲۵-	۸
۳	۴/۵	۰/۱	۲۰- تا ۲۵-	۴

جدول ۶ - مقایسه عدد موجی‌های ۲ و ۳

ردیف	پلی پیرول	نمونه ۱	نمونه ۳	گمارش
۱	۱۴۵۸	۱۴۵۵	۱۴۵۶	C=C کششی
۲	۱۰۴۱	۱۰۴۰	۱۰۴۰	N-H خمشی
۳	۹۰۸	۸۹۶	۸۹۶	C-H خمشی

باتوجه بـــه جدول ٦، نمونه‌های۲ و ۳ در عـــدد موجی ١٤٥٨ با گمارش C=C کششـــی دارای طیف می‌باشند. هر دو نمونه۲ و ۳ در ١٠٤٠، گمارش N- H خمشـــی می‌دهند. هر دو نمونه در ٨٩٦ دارای عدد موجیی مشـــابه با پلـــی پیرول مرجع با گمارش C-H خمشـــی می‌باشـــند. نتیجه اینکـــه هر دو نمونه دارای طیف‌های مشـــترکی با طیـــف پلی پیرول مرجع داشـــته و لذا در ســـطح ایـــن دو نمونه نیز تشکیل پلی پیرول قطعی است.

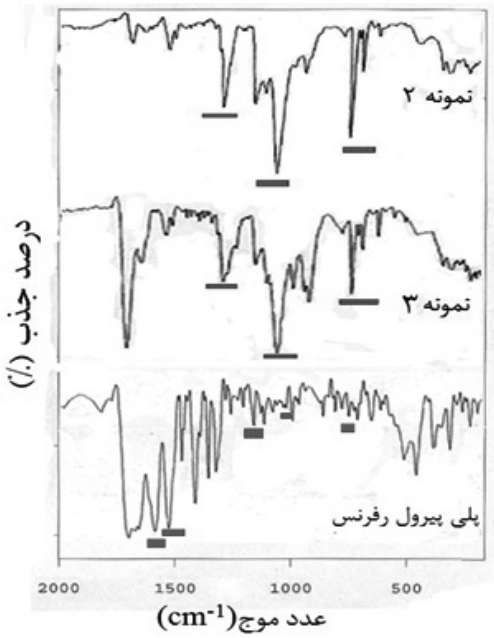
شکل ۹ تصاویر ســـطح مقطع نمونه‌های ۲ و ۳ را نشان می‌دهد که از نظر دانه‌بندی ذرات پلی پیرول تشـــکیل شـــده مشـــابه به نظر می‌رســـند. شکل ۱۰ نیز نشان دهنده تصاویر SEM از مقطع عرضی نمونه‌های ۲ و ۳ هســـتند. ضخامت پوشش پلی پیرول تشکیل شده روی نمونه‌هـــای ۲ و ۳ بـــه ترتیب حدود ١٦ میکـــرون و ۹ میکرون بدست می‌آید.

مشاهده می‌شـــود که نمونه۲ نسبت به نمونه ۳ دارای ضخامت بیشـــتری از پلی پیرول اســـت. علت آن واضح بوده و به مدت زمان لایه نشانی بیشـــتر نمونه ۲ مربوط می‌شـــود. بنابراین هرچه مدت زمان لایه نشـــینی بیشتر باشـــد ضخامت پوشش پلی پیرول بیشتر می‌شود.

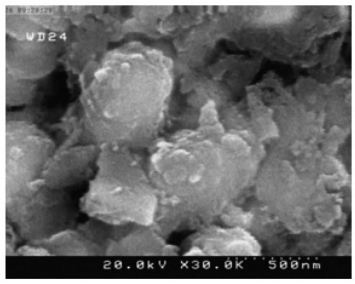
نتیجه گیری

در ایـــن پژوهش بـــرروی IPMCهای چند لایه بـــا پلیمر PVDF و PPY تحقیق شـــد و نمونه‌هایی از این نوع کامپوزیت ساخته شد. با توجه به نتایج بدســـت آمـــده، پارامترهای موثر بر ســـاخت آنها شناسایی و تأثیرات آنها بررسی شده است.

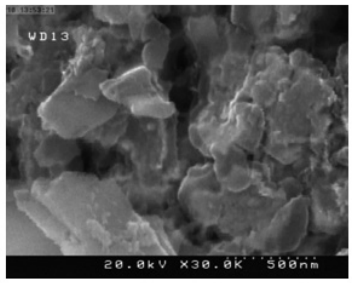
۱- با توجه به مقایســـه طیف‌های FTIR نمونه‌ها و بررسی آنها



شکل ۸ - مقایسه طیف‌های FTIR نمونه‌های ۲ و ۳



(الف)

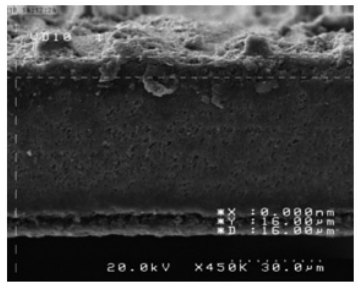


(ب)

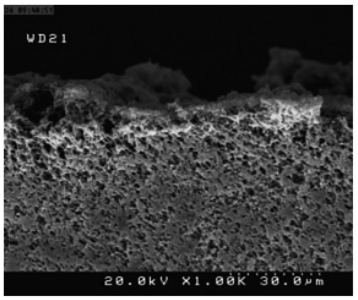
شکل ۹ -تصویرSEM از سطح مقطع. الف) نمونه۲ ب)نمونه ۳

و همچنین تصاویر گرفته شـــده SEM از نمونه‌ها نتیجه می‌شود که دمای لایه نشینی در دانه‌بندی پوشش پلی پیرول تأثیر داشته است.

۲- با توجه به عکس‌های SEM از نمونه‌ها و بررسی آنها نشان مـــی دهد که، دمـــای ۲۰- تا ۲۵- درجه ســـانتیگراد دمـــای بهینه‌تر می‌باشد و باعث یکنواختی سطح مقطع و دانه‌بندی می‌شود. علت آن



(الف)



(ب)

شکل۱۰ -تصویر SEM برش عرضی. الف) نمونه۲ ب)نمونه۳

این اســت که افزایش دما رشد بلورها را تسریع می‌کند ولی موجب تشکیل بلورهای جدید و اولیه نمی‌شود.

۳- افزایــش دما که موجب کاهش مقاومت الکترولیت می‌شــود، ســبب می‌شــود که چگالی جریان در ســطح کاتد کاهش یابد و از پیدایش ناهمواری‌هایی کــه در دمای کم به وجود می‌آید جلوگیری می‌کند.

٤- با افزایش زمان لایه نشــانی پلی پیرول ضخامت آن افزایش می‌یابــد. با توجه به اینکه دو زمان مورد بررســی قرار گرفت مدت زمان ۸ ســاعت لایه نشــینی تأثیر بیشــتری بر پلی پیرول پوشش داده شــده دارد و ضخامت آن افزایش یافته بود اما در ســاختار و دانه‌بندی تأثیری نداشته بود.

منابع و مراجع

1. H. S. Tzou, h. J. Lee, Smart Materials, (2004), Precision Sensor/Actuators, Smart Structures, and Structronic Systems, Mechanics of Advanced Materials and Structurs, 367-393.
2. Y.Bar-Cohen, Jet Propulsion Lab, California Institute of Technology, Biomimetic Actuators using Electroactive Polymers (EAP) as Artificial Muscles.
3. Y.Bar-Cohen, (2001)..Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles-Reality,Potential and Challenges, SPIE Press,Vol.PM98.
4. Yoseph Bar-Cohen. (2006). Biomimetics Biologically Inspired Technologies. Jet Propulsion Laboratory (JP) California Institute of Technology Pasadena, California, USA. Published by CRC Press.
5. Mohsen Shahinpoor and Kwan Kim. (2005). Ionic polymer–metal composites: IV.Industrial and Medical Applications, Smart Mater. Struct. 14, 197–214.
6. Gaoyi Han, Gaoquan Shi. (2004). Conducting Polymer Electrochemical Actuator Made Of High-Strength Three-Layered Composite Films of Polythiophene and Polypyrrole. Sensors and Actuators B 99, 525–531.
7. Y. Wu, G. Alici, G.M. Spinks, G.G. Wallace. (2006). Fast Trilayer Polypyrrole Bending Actuators for High Speed Applications. Synthetic Metals 156, 1017–1022.
8. Gursel Alici and Nam N. Huynh. (2007). Performance Quantification of Conducting Polymer Actuators for Real Applications: A Micro Gripping System. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 12, no. 1.
9. Eisazadeh, Hossein. (2007). Studying the Characteristics of Polypyrrole and its Composites.» World Journal of Chemistry 2.2, 67-74.
10. Babita Gaihrea, Gursel Alici, Geoffrey M. Spinksa, Julie M. Cairney. (2011). Synthesis and Performance Evaluation of Thin Film PPY-PVDF Multilayer Electroactive Polymer Actuators. Sensors and Actuators A 165, 321–328.