

بررسی تأثیر دما و مدت زمان الکتروپلیتینگ در لایه نشانی پلی پیروول در ساخت ماده هوشمند کامپوزیت پلیمر یونی - فلزی

مهران رزاقی قلعه^۱، بهمن میرزاخانی^۲، مهدی رئوفی^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک 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 هوشمندی هستند که اخیراً در صنعت مکترونیک کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند. این کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های لایه‌ای فلزی پلیمری بوده که ساخت آنها از تکنولوژی پیچیده‌ای برخوردار است. این کامپوزیت‌ها نسل جدیدی از مواد هوشمند هستند که در محرک‌ها استفاده می‌شوند. هدف از تحقیق حاضر ساخت 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 استفاده از محلول پروپیلن کربنات، پیروول و نمک تری فلوروئورمتان سولفونیمید لیتیوم، در شرایط کاملاً کنترل شده پلی پیروول بر روی طلا نشانده شد. جهت بررسی کیفیت پوشش از بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی و آنالیز طیف سنجی مادون قرمز استفاده گردید. پارامترهای موثر بر لایه نشانی پلی پیروول نظیر دمای کاری و مدت زمان لایه نشانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در غلظت محلول الکترولیت پیروول و نمک ۰/۱ مولار و دمای ۲۵- درجه سانتی‌گراد با افزایش مدت زمان لایه نشانی، ضخامت پوشش پلی پیروول بیشتر شده و کیفیت سطحی آن بهتر گردیده است. **واژه‌های کلیدی:** پلیمرهای الکترواکتیو، کامپوزیت‌های پلیمری - یونی فلزی، لایه نشانی، پلی پیروول.

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 trifluoromethane 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 trifluoromethane sulfonamide salt temperature of -25 °C.

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

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

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

IPMCها برای دامنه وسیعی از کاربردهای مختلف از جمله بکارگیری در نیروی محرکه هیدرودینامیک، شناورسازی و باله‌های پرواز مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای مهم این مواد در صنعت مکترونیک می‌توان به ساخت گریپهای رباطی، کاهنده‌های نویز، لباس‌های مخصوص فضانوردی و غواصی، عملگرهای تجهیزات نجومی، آنتن‌ها و رادارهای با قابلیت انبساط، حسگرهای بویایی اشاره کرد [۶].

هدف از این پژوهش، ساخت و بررسی رفتار و خواص یک کامپوزیت پلیمر یونی-فلزی است. بدین ترتیب که پوشش پلیمر یونی ایجاد شده بروی یک فلز از نظر فصل مشترک و ساختار میکروسکوپی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین شرایط بهینه ساخت IPMC مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

مواد و روش تحقیق

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

کامپوزیت‌های IPMC در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر شامل یک لایه پلیمر PVDF متخلخل به ضخامت ۱۰۰ میکرون در وسط است که دو طرف آن به روش کندوپاش پوشش طلا داده شده است. عمل پوشش دهی توسط یک دستگاه کندوپاش صورت گرفت. شکل ۲، تصویر شماتیکی از ساختار کامپوزیت پلیمر-فلزی یونی نمایش داده شده است.

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

برای ایجاد لایه سوم که یک لایه پلیمر یونی است مطابق شکل ۳، از محلول الکترولیت پروپیلن کربنات، نمک تری فلئورومتان سولفونیمید لیتیوم، پیرول و آب و روش الکتروپلیتینگ استفاده گردید. در این روش به کمک جریان الکتریکی، لایه نشینی مواد انجام می‌گیرد. در واقع این روش رسوب از یک محلول الکترولیت در اثر عبور جریان الکتریکی صورت می‌گیرد. برای این منظور می‌بایست از یک منبع جریان برای اعمال ولتاژ استفاده نمود.

در تحقیق حاضر غلظت محلول الکترولیت ۰/۱ مولار برای لایه نشانی پلی پیرول در نظر گرفته شد. بدین منظور برای هر

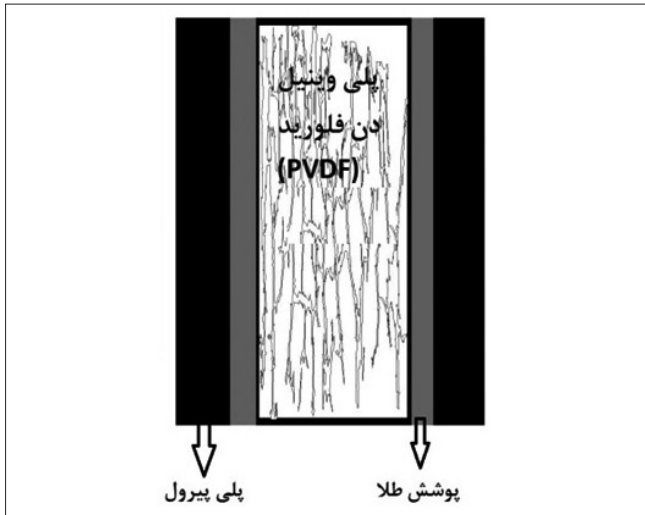
با پیشرفت سریع علم مواد در علوم و صنایع مختلف، مواد هوشمند مختلفی به سرعت توسعه یافته‌اند که در بسیاری از تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواد هوشمند اصطلاحاً به موادی گفته می‌شود که می‌توانند با درک محیط و شرایط اطراف خود نسبت به آن واکنش مناسب نشان دهند. پلیمرها نیز از این قضیه مستثناء نمی‌باشند و در برابر محرک‌های مختلف نظیر دما، میدان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی، 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 الکترواکتیو (Electro active Polymer (EAP)، موادی می‌باشند که با جریان الکتریکی تحریک می‌شوند [۲ و ۳]. این مواد با توجه به مکانیسم تحریک به دو نوع پلیمرهای الکترواکتیو الکترونی و پلیمرهای الکترواکتیو یونی طبقه‌بندی می‌شوند. بطور خلاصه می‌توان گفت که پلیمرهای الکترواکتیو الکترونی توسط میدان الکتریکی و یا نیروهای کولن تحریک می‌شوند و پلیمرهای الکترواکتیو یونی توسط تحرک و یا انتشار یون و مواد مزدوج خود شکل تغییر پیدا می‌کنند [۴].

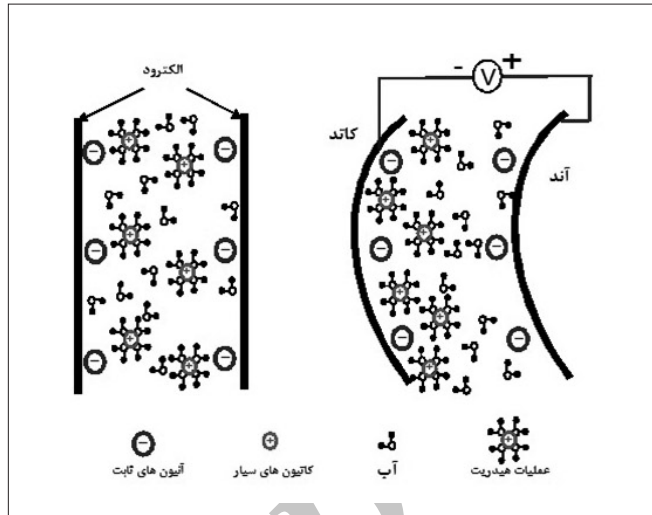
پلیمرهای الکترواکتیو در مقایسه با آلیاژهای حافظه دار، سرعت پاسخ بالاتر، چگالی کمتر و حالت ارتجاعی بیشتری داشته و همچنین نسبت به سرامیک‌های الکترواکتیو دارای چگالی و ولتاژ تحریک کمتری می‌باشند [۳].

پلیمرهای الکترواکتیو یونی شامل دو الکتروود و یک الکترولیت در داخل خود هستند. بزرگترین مزیت این مواد این است که آنها به ولتاژهای پایین حدود ۱ ولت نیز پاسخ 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.

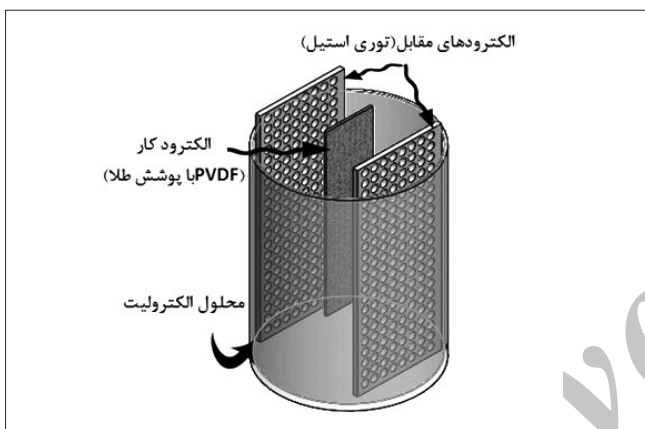
IPMCها در برش مقطع عرضی شبیه به یک ساندویچ با لایه‌های الکتروود در خارج و ماتریس پلیمری در مرکز می‌باشند. همچنین این روش قابلیت انعطاف‌پذیری بهتری در انتخاب مواد الکتروود فلزات گوناگونی مانند پلاتین، پالادیوم، نقره، طلا، کربن و گرافیت می‌دهد. نوارهای پلیمر همانند الکتروودهای سلول‌های الکتروشیمیایی عمل می‌کنند. هنگامی که پتانسیلی به الکتروودها اعمال شود، اکسایش در آند و احیا در کاتد رخ می‌دهد. برای حفظ تعادل بارهای الکتریکی، یون‌ها به داخل و خارج از پلیمر و الکترولیت منتقل می‌شود. متورم شدن و انبساط، زمانی اتفاق می‌افتد که یون‌های اضافی وجود داشته باشد و انقباض، زمانی که یون‌ها حذف شده باشند روی می‌دهد.



شکل ۲- شماتیکی از ساختمان کامپوزیت پلیمری فلزی - یونی



شکل ۱- نمایش شماتیک از سه حالت پلیمرهای چند لایه



شکل ۳- ظرف بشر حاوی محلول الکترولیت و الکتروود کار و الکتروود ناظر

جدول ۱- شرایط لایه نشانی طلا روی ورق PVDF

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

نمونه آزمایش شده درصد ترکیبات مورد نیاز محلول الکترولیت حاوی نمک تری فلئورو متان سولفونیمید لیتیوم، پیروول و پروپیلن کربنات محاسبه شده و برای انجام آزمایش آماده می‌شد.

مطابق شکل ۳ بعد از آماده کردن محلول الکترولیت، آن را داخل یک محفظه یونولیتی قرار داده و با استفاده از یخ خشک که در اطراف ظرف محلول ریخته شده بود، دمای محلول به دمای منفی مورد نیاز تنظیم می‌گردید و دما در طول آزمایش توسط یک دماسنج دیجیتالی کنترل می‌شد. قطعات PVDF پوشش داده شده با طلا الکتروود کار گفته می‌شود و دو توری فولاد ضد زنگ الکتروود ناظر هستند. به الکتروود کار قطب مثبت و الکتروود 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 می‌شود. در این صورت یون‌های پیروول موجود در الکترولیت تحریک شده و از سمت الکتروود آند به سمت الکتروود کاتد یا الکتروود کار حرکت می‌کنند و طی فرآیند پلیمراسیون پیوند یون‌های پیروول شکسته شده و یون‌های لایه ظرفیت پیروول آزاد شده و با حرکت به سمت PVDF با پوشش طلا، باعث می‌شود بر روی لایه طلا نشسته و انباشته شوند. میزان و شکل انباشتگی ذرات به میزان غلظت، دمای کاری، فاصله الکتروودها، ضخامت طلای پوشش داده شده، زمان الکتروانباشت و چگالی جریان بستگی دارد.

فرآیند لایه نشانی به روش الکتروپلیتینگ به مدت زمان‌های ۴ و ۸ ساعت در دماهای مختلف و دیگر شرایط مشابه که در جدول ۲ آورده شده است. تعداد ۳ نمونه با شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. سپس این نمونه‌ها مورد آزمایش واقع شد تا شرایط بهینه برای ساخت نمونه کامپوزیت پلیمر یونی - فلزی بدست آید. بعد از پایان لایه نشانی نمونه با استون شسته می‌شد و در داخل محلول ۰/۱ مولار پروپیلن کربنات و نمک تری فلئورو متان سولفونیمید 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

پوشش طلا بر روی پلیمر PVDF توسط دستگاه کندوپاش و برای مدت زمان ۴/۵، دقیقه ایجاد گردید. شکل ۴، تصویر SEM از

جدول ۲ نمونه‌ها لایه نشینی شده با شرایط آزمایش شده

نمونه	زمان اسپاترینگ (طلا) (دقیقه)	غلظت محلول الکترولیت (مولار)	دمای لایه نشانی (C°)	زمان 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

جدول ۳- شرایط لایه نشانی پروپیلن برای بررسی اثر دما

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

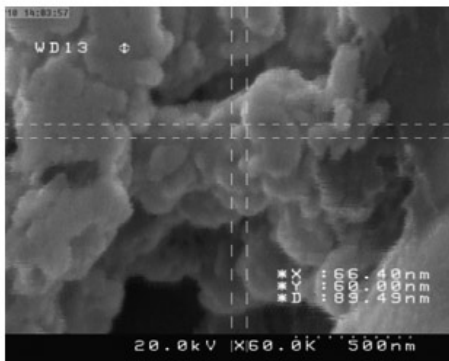
سطح و برش عرضی ورق متخلخل PVDF پوشش داده شده با طلا را نشان می‌دهد. اندازه ذرات طلا در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر است. ضخامت لایه طلا نیز ۱۰ تا ۱۵ میکرومتر است. Alici و همکارانش [۷] نشان دادند که ضخامت فلز نشان داده شده روی دو طرف ورق PVDF متخلخل هم بر خواص پوشش نهایی و هم بر ویژگی‌های کامپوزیت IPMC ساخته شده تأثیر بگذارد.

بررسی پوشش پلی پیرول

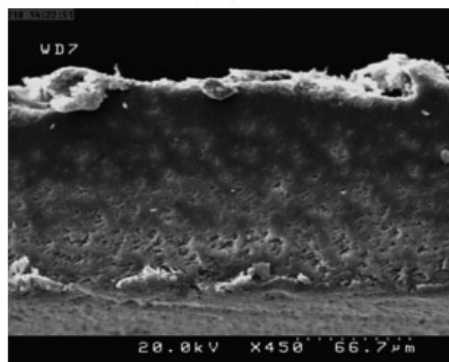
اثر دما بر لایه پوشش

دمای محلول الکترولیت می‌تواند بر لایه پلی پیرول تشکیل شده تأثیر گذارد. افزایش دما باعث افزایش هدایت الکترولیت، سرعت نفوذ، ازباده انحلال شیمیایی در آند 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 محدوده دمایی ۲۰- تا ۲۵- و ۲۵- تا ۳۰- سانتیگراد انجام گرفت که در جدول ۳ شرایط آزمایش برای این بررسی، آورده شده است. برای مقایسه نمونه‌ها و بررسی تأثیر دما بر لایه نشانی پلی پیرول، از طیف سنجی FTIR و تصاویر SEM استفاده گردید. شکل ۵، طیف‌های FTIR نمونه‌های ۱ و ۳ را بطور مقایسه‌ای نشان می‌دهد. در جدول ۴ نیز عدد موجی‌های قوی‌تری که با پلی پیرول مشابه هستند، نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۴، نمونه ۳ در عدد موجی ۱۴۱۰ پیک‌هایی می‌دهد که نشان دهنده گمارش C=C کششی است. هر دو نمونه ۱ و ۳ در عدد موجی ۱۰۴۰ پیک داشته که نشان دهنده گمارش N-H



(الف)



(ب)

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

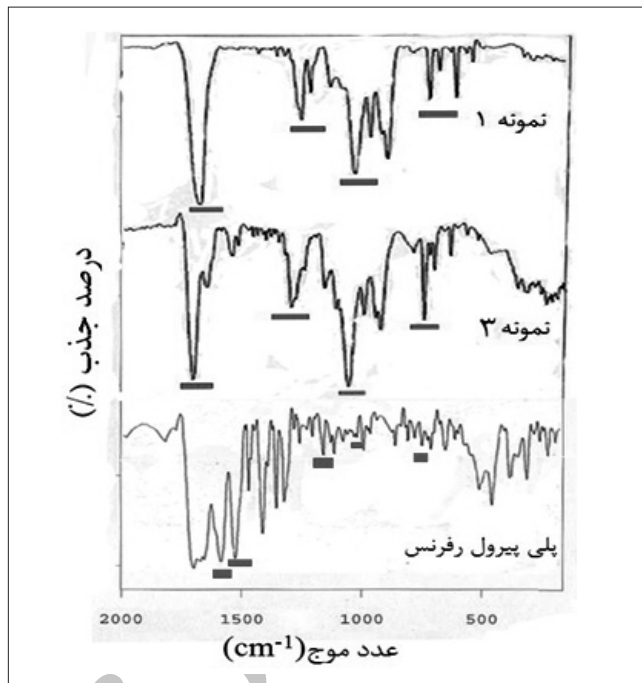
خمشی می‌باشند و همچنین هر دو نمونه در عدد موجی مشابهی با پلی پیرول مرجع [۱۱] در عدد موجی ۸۹۶ با گمارش C-H دارند. با توجه به نمونه‌های ۱ و ۳ و مقایسه با طیف‌های پلی پیرول دارای عدد موجی‌های مشترک بوده و بنابراین لایه پوشش داده شده بروی آنها پلی پیرول است.

تصاویر SEM نشان دهنده در شکل ۶ و شکل ۷ نیز دانه-بندی تشکیل شده پلی پیرول در نمونه‌های ۱ و ۳ را نمایان می‌کند. شکل ۶ تصویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌ها و شکل ۷ تصویر مقطع نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

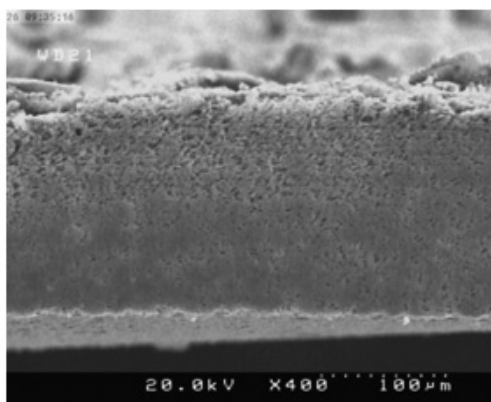
با توجه به شکل ۶ و شکل ۷ می‌توان دریافت که ضخامت پلی پیرول نمونه ۱ نسبت به نمونه ۳ دارای ساختار یکنواخت تر و دانه‌بندی ریزتری است. زیرا دمای لایه نشانی برای نمونه ۳ نسبت به نمونه ۱ بیشتر است. می‌توان گفت با افزایش دما رشد بلورها تسریع شده و ساختار درشت‌تری بوجود می‌آید. همچنین با افزایش دما که کاهش مقاومت الکترولیت را به همراه دارد، چگالی جریان در سطح کاتد را کاهش داده و از پیدایش ناهموازی‌هایی که در دمای کم به وجود می‌آید جلوگیری می‌کند.

جدول ۴ مقایسه عدد موجی‌های نمونه‌های ۱ و ۳

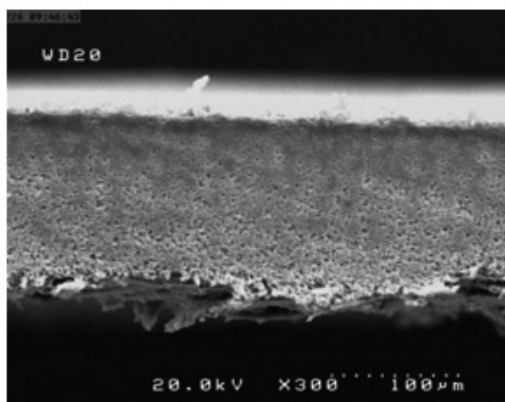
ردیف	پلی پیرول	نمونه ۱	نمونه ۳	گمارش
۱	۱۴۵۸	-	۱۴۱۰	C=C کششی
۲	۱۰۴۱	۱۰۴۰	۱۰۴۰	N-H خمشی
۳	۹۰۸	۸۹۶	۸۹۶	C-H خمشی



شکل ۵ مقایسه طیف‌های FTIR نمونه‌های ۱ و ۳

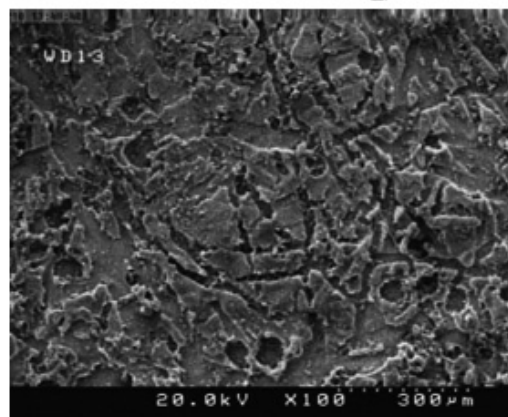


(الف)

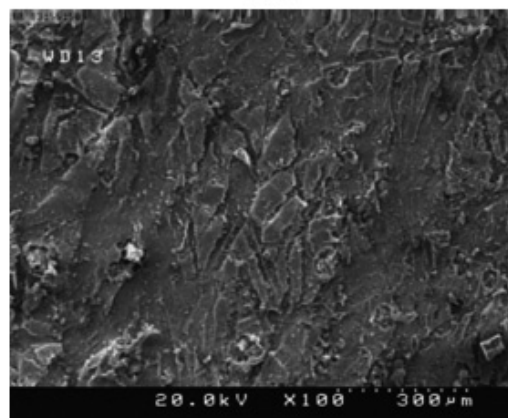


(ب)

شکل ۷- تصویر SEM مقطع (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۳



(الف)



(ب)

شکل ۶- تصویر SEM از سطح 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 ۴ و ۸ ساعت) در فرآیند الکتروپلیتینگ مورد آزمایش واقع شدند. شرایط این دو نمونه در جدول ۵ آورده شده است.

در شکل ۸ تصویر طیف‌های FTIR نمونه‌های ۲ و ۳ و در جدول ۶ 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°)	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 به جدول ۶، نمونه‌های ۲ و ۳ در عدد موجی ۱۴۵۸ با گمارش C=C کششی دارای طیف می‌باشند. هر دو نمونه ۲ و ۳ در ۱۰۴۰، گمارش N-H خمشی می‌دهند. هر دو نمونه در ۸۹۶ دارای عدد موجی مشابه با پلی پیرول مرجع با گمارش C-H خمشی می‌باشند. نتیجه اینکه هر دو نمونه دارای طیف‌های مشترکی با طیف پلی پیرول مرجع داشته و لذا در سطح این دو نمونه نیز تشکیل پلی پیرول قطعی است.

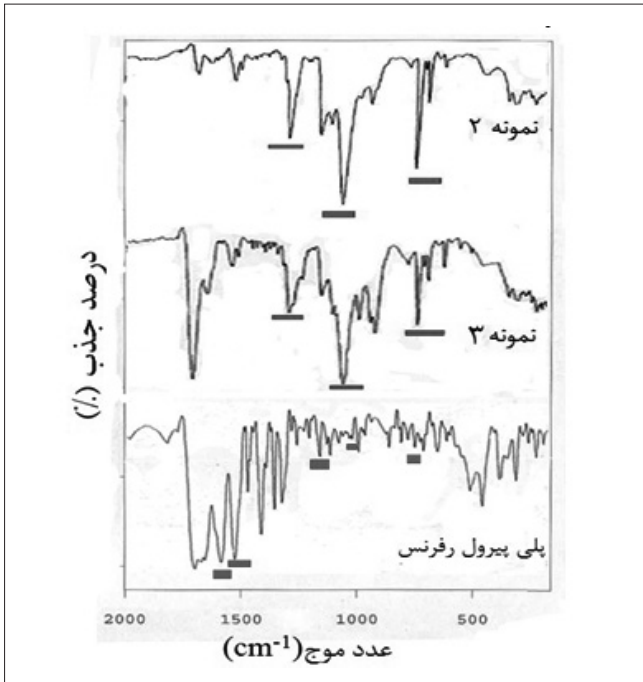
شکل ۹ تصاویر سطح مقطع نمونه‌های ۲ و ۳ را نشان می‌دهد که از نظر دانه‌بندی ذرات پلی پیرول تشکیل شده مشابه به نظر می‌رسند. شکل ۱۰ نیز نشان دهنده تصاویر SEM از مقطع عرضی نمونه‌های ۲ و ۳ هستند. ضخامت پوشش پلی پیرول تشکیل شده روی نمونه‌های ۲ و ۳ به ترتیب حدود ۱۶ میکرون و ۹ میکرون بدست می‌آید.

مشاهده می‌شود که نمونه ۲ نسبت به نمونه ۳ دارای ضخامت بیشتری از پلی پیرول است. علت آن واضح بوده و به مدت زمان لایه نشانی بیشتر نمونه ۲ مربوط می‌شود. بنابراین هرچه مدت زمان لایه نشانی بیشتر باشد ضخامت پوشش پلی پیرول بیشتر می‌شود.

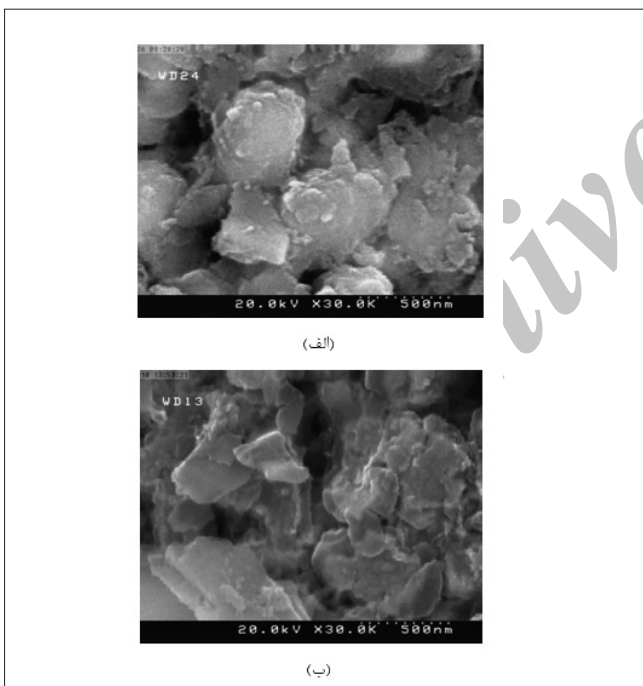
نتیجه گیری

در این پژوهش بر روی IPMCهای چند لایه با پلیمر PVDF و PPY تحقیق شد و نمونه‌هایی از این نوع کامپوزیت ساخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده، پارامترهای موثر بر ساخت آنها شناسایی و تأثیرات آنها بررسی شده است.

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



شکل ۸ - مقایسه طیف‌های FTIR نمونه‌های ۲ و ۳



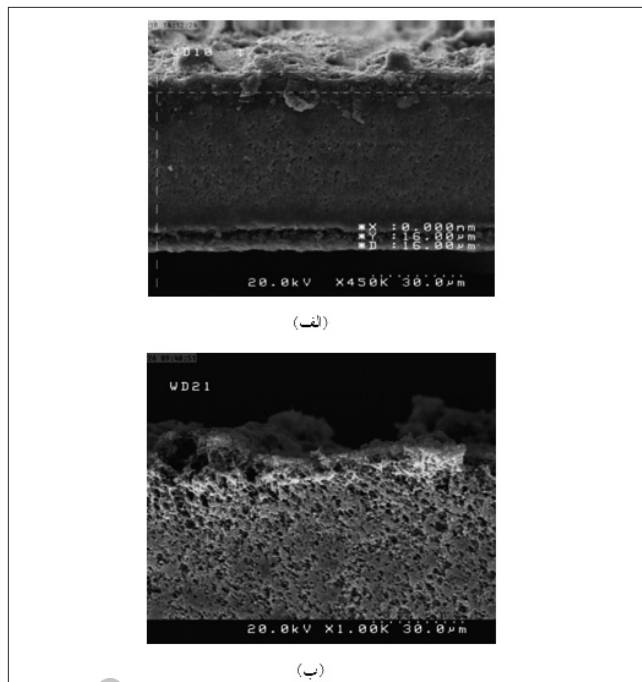
شکل ۹ - تصویر SEM از سطح مقطع. الف) نمونه ۲ ب) نمونه ۳

و همچنین تصاویر گرفته شده SEM از نمونه‌ها نتیجه می‌شود که دمای لایه نشانی در دانه‌بندی پوشش پلی پیرول تأثیر داشته است. ۲- با توجه به عکس‌های SEM از نمونه‌ها و بررسی آنها نشان می‌دهد که، دمای ۲۰- تا ۲۵- درجه سانتیگراد دمای بهینه‌تر می‌باشد و باعث یکنواختی سطح مقطع و دانه‌بندی می‌شود. علت آن

۴- با افزایش زمان لایه نشانی پلی پیرول ضخامت آن افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه دو زمان مورد بررسی قرار گرفت مدت زمان ۸ ساعت لایه نشینی تأثیر بیشتری بر پلی پیرول پوشش داده شده دارد و ضخامت آن افزایش یافته بود اما در ساختار 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 Structures, 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 Gaihera, Gursel Alici, Geoffrey M. Spinks, Julie M. Cairney. (2011). Synthesis and Performance Evaluation of Thin Film PPY-PVDF Multilayer Electroactive Polymer Actuators. Sensors and Actuators A 165, 321-328.



شکل ۱۰- تصویر SEM برش عرضی. الف) نمونه ۲ ب) نمونه ۳

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

۳- افزایش دما که موجب کاهش مقاومت الکترولیت می‌شود، سبب می‌شود که چگالی جریان در سطح کاتد کاهش یابد و از پیدایش ناهموازی‌هایی که در دمای کم به وجود می‌آید جلوگیری می‌کند.