

فعال سازی سطح منسوج توسط چاپ جوهر افشان برای ایجاد طرح رسانا از طریق لایه نشانی الکترولس

وحید متقی طلب ، فاطمه حق دوست ، فاطمه محترم ، مرجان عباسی و اکبر خداپرست حق

گروه نساجی دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

غلامرضا باقر سلیمی

گروه برق دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

(دریافت مقاله : ۹۱/۰۹/۱۹ - پذیرش مقاله : ۹۲/۰۳/۱۱)

چکیده

در سالهای اخیر پارچه های طرح دار هادی موضوع مورد علاقه بسیاری از محققین با تمرکز بر روی کاربردهای پزشکی و الکترونیکی تجهیزات الکترونیکی قابل پوشش بوده است. در این بین ، تکنولوژی چاپ جوهر افشان به عنوان یک روش با دقت بالا بواسطه کم بودن زمان فرایند، هزینه ، تلفات و همچنین توانایی فوق العاده در ساخت طرح های هادی انعطاف پذیر نسبت به روشهای دیگر ترجیح داده میشود. در این تحقیق از پارچه پلی استر با هدف لایه نشانی فلز نیکل و بهینه سازی دما و اسیدیته فرایند الکترولس استفاده شده است. فرایند شامل سه مرحله دندان زنی، فعال سازی و لایه نشانی الکترولس می باشد. فرایند دندان زنی شرایط لازم را برای مرحله فعال سازی از طریق چاپ جوهرافشان فراهم می کند که در مرحله نهایی لایه نشانی صورت می پذیرد. شکل گیری سطحی حفره دار بعد از فرایند دندان زنی و همچنین تشکیل فاز پیوسته نانو ذرات (۲۰-۱۰۰ نانو متر) متشکل از کریستالهای فلزی دو یافته مهم از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نیروی اتمی است. اندازه گیری هدایت الکتریکی توسط دستگاه چهار پروب معرف هدایت الکتریکی حدود 2632 ± 35 S/cm میباشد. آماده سازی طرحهای متنوع مارپیچی و پانلهای تخت با کاربردهایی در آنتن و حسگرنشانی از توانمندی تکنیک است. اندازه گیری ظرفیت خازنی مقادیری در حدود ۱۰-۲۰ نانو فاراد را ثبت نموده است. واژه های کلیدی: چاپ جوهر افشان، نانو ذرات فلزی، پارچه هادی، آنتن، حسگر

Fabric surface activation using inkjet printing for developing conductive pattern through electroless plating

V. Mottaghitlab, F. Haghdooost, F. Mohtaram, M. Abassi, A.K.Haghi

Textile Engineering department, Faculty of Engineering, University of Guilan

G.R.Baghersalimi

Electrical Engineering department, Faculty of Engineering, University of Guilan

(Received 9 December 2012, accepted 1 June 2013)

Abstract

In recent years, the highly conductive patterned fabric has been field of interest for many researchers by focusing on medical and electrical application of flexible and wearable electronic devices. In the meantime, inkjet printing technology as a high precision technique has been extensively successful in flexible electronic device industry. Compared to other techniques, the ink jet printing is most preferred due to low process time, expenses, waste material and also its great capability for creation of flexible conductive pattern. In current study, the polyester fabric was employed for temperature and pH optimization in nickel electroless plating process. The fabrication process composed of three steps including the etching, activation and electroless plating. The etching process provides necessary condition for inkjet printing in activation step followed by electroless plating. The formation of a multi cavity structure on PET fabric after etching process and a continues metallic phase composed of nickel nano crystals(20-100nm) after plating process are two major finding from AFM, SEM and optical microscopic images. The four probe conductivity measurements showed a range of conductivity around 2632 ± 35 S/cm. Range of patterns including spiral or flat panels with applications in antenna and sensors show the technique perfection. The capacitance measurements also represent a range between 10-20 nF.

Key words: Inkjet printing, metallic nanoparticle, Conductive fabric, Antenna, Sensor

E-mail of corresponding author: motaghitlab@guilan.ac.ir

مقدمه

با ظهور عصر الکترونیک و ساخت تجهیزات الکترونیکی متنوع، تحقیقات گسترده ای برای ساخت اجزاء الکترونیکی و مدارها بر روی سطوح انعطاف پذیر در جهت تحقق رویای ساخت تجهیزات الکترونیکی سبک و انعطاف پذیر در حال انجام است. بر این اساس مقالات علمی و فنی متعددی بر نقش فناوری چاپ در صنعت الکترونیک برای ساخت قطعات تاکید کرده اند. مدار الکترونیکی چاپ شده به عنوان وسایل الکترونیکی با بهره بالا به علت انعطاف پذیری بالا و بهای کم به مقوله ای منحصر بفرد تبدیل شده است. از جمله خصوصیات مهم چاپ مدار رسانا، دمای پایین فرایند چاپ بوده که با توجه به آن چاپ مدار با استفاده از زیرلایه هایی مانند پلاستیک، کاغذ و پارچه فراهم می گردد. استفاده از پارچه به عنوان زیر لایه برای ایجاد طرح رسانا بواسطه رشد روز افزون منسوجات الکترونیکی قابل پوشش و کاربردهای متنوع طرح های هادی جذابیت زیادی در بین محققین ایجاد نموده است [۱]. استفاده از منسوجات به دلیل خواص ذاتی و منحصر به فرد آنها و همچنین ظرفیت بالفعل آنها در تعامل فیزیکی و شیمیایی با مواد آلی و فلزی است. در سال های اخیر، فن آوری چاپ جوهر افشان به دلیل سرعت بالا، انعطاف پذیری و توزیع دقیق، جهت تولید فیلم های جامد کم ضخامت به عنوان یک روش منحصر بفرد به کار برده می شود. این فن آوری دارای محدوده وسیعی از کاربردها نظیر اتصالات نوری و الکترونیکی [۲-۳]، ترانزیستورهای آلی [۴]، دیود های نوری [۵]، حسگرهای زیستی [۶]، استحصال مواد با ساختار نانو [۷-۹] و داربستهای رشد سلول [۱۰-۱۱] می باشد. روش جوهرافشان روشی غیر تماسی بوده و قادر است استحصال دقیق با سرعت بالا حتی بر روی سطوح ناهموار ایجاد نماید. در روشهای غیر تماسی، سطح حسگر آسیب ندیده و عاملیت آن کاهش نمی یابد. این فن آوری قادر است حسگرهای زیستی با قابل انعطاف پذیری را تنها در یک مرحله چاپ نماید که تمامی این

موارد دلیل مزیت این روش بر روش های پیشین می باشد [۱۲-۱۳]. امروزه تعداد پلیمرهایی که با موفقیت با استفاده از تکنیک چاپ جوهرافشان به کار میروند، رو به افزایش می باشد که از آن جمله می توان به چاپ پلی تیوفن [۱۴-۱۵]، پلی آنیلین [۱۶]، پلی پیرول [۱۷ و ۹] و پلیمرهای حاوی فلزات [۱۸-۲۰] اشاره نمود. در سالهای اخیر، تحقیقات بسیاری در زمینه چاپ جوهرافشان سوسپانسیون های نانوذرات آلی یا فلزی بر روی سطوح انعطاف پذیر صورت گرفته است [۲۱-۲۳]. کیم و همکاران [۲۴] موفق به چاپ خطوط هادی بر روی یک سطح انعطاف پذیر شدند. آنها با استفاده از نانو ذرات نقره با محدوده قطری حدود ۲۰ نانو متر توانستند بطور مستقیم چاپ مدار فلزی را بر روی سطوح پلیمری نظیر پلی ایمید، پلی اتیلن نفتالات و پلی اتیلن ترفتالات برای کاربرد در قطعات الکترونیکی انعطاف پذیر انجام دهند. طرح حاصله با دقت مناسبی به طرحی بسیار ظریف و صاف هادی بر روی سطح پلیمر منتهی گردید. در تحقیق دیگری چاپ جوهر افشان برای ایجاد طرح های پلی اتیلن دی اکسی تیوفن - پلی استیرن سولفونات بر روی سطح منسوج پلی اتیلن ترفتالات استفاده شده است [۲۱]. مگداسی و همکارانش توانستند با استفاده از فن آوری جوهرافشان، نیترات نقره ای حل شده در مخلوطی از آب و دی متیل سولفوکسید را روی بستری از پلی آمید در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد استحصال دهند. بر این اساس، ردیف های چاپ شده از طریق جوهرافشان در مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد موجب ایجاد نانو ذرات نقره با مقاومت حدود $10^{-5} \times 11/5$ اهم سانتیمتر گردید [۲۵] در تحقیق انجام شده توسط بیدکی و همکاران [۲۶-۲۷]، جهت دستیابی به مطلوب ترین استحصال شیمیایی فلزات بر منسوجات، محلولهای مختلفی از نمک های مس و نقره با مواد احیا کننده متفاوت مورد آزمون قرار گرفتند. در مطالعه مذکور بهترین زوج مناسب از نمک فلزی و ماده احیا کننده برای استحصال فلزات، وارد کارتریج چاپگر جوهرافشان شده و

در فرآیند استحصال به کار گرفته شدند. چاپ جوهر افشان در مکانهای مشخص شده طرح می تواند باعث اختلاط آن دو بر سطح کالا شده و واکنش آنها منجر به تولید نانو ذرات فلزی بر کالا شود که از هدایت الکتریکی مناسب برخوردار می باشد .

چاپ جوهر افشان علیرغم تمام مزایای انجام شده در آماده سازی طرح های هادی بر روی سطوح انعطاف پذیر برای استحصال همزمان فلزات متنوع با مشکلات متعددی روبروست که در عمل کاربرد آنها را دچار محدودیتهای جدی میکند. آماده سازی سطوح با هدایت الکتریکی بالا نیازمند تکرار متعدد فرایند چاپ بر روی یک طرح بوده که عملاً با توجه مشکلات مربوط به حرکت بستر در هنگام چاپ نمی توان به طرحی یکنواخت در سطح و عمق امیدوار بود. این موضوع با تشکیل ترکهای مویین در سطح در هنگام تاخوردگی بستر، بیشتر مشهود خواهد بود . این موضوع تا حدی با اهمیت است که عمدتاً استفاده از پرینترهایی توصیه می شود که حرکت بستر به صورت افقی بدون هیچگونه تاخوردگی باشد که نسل پرینترهای با حرکت افقی بستر منسوخ شده است و پشتیبانی تکنولوژیکی برای آن در حال حاضر وجود ندارد. معضل مهمتر انسداد متعدد نازلها در هنگام استحصال بوده که بواسطه احیا همزمان ذرات و تجمع آن در دهانه نازل است. براین اساس جدا نمودن فرایند احیا از فریند فعال سازی می تواند معضلات فوق را مرتفع کند. لایه نشانی الکترو لس راهی برای پوشش دهی طرحهای ظریف فعال شده بر روی بستر انعطاف پذیر خواهد بود.

لایه نشانی الکترولس روش متداول شیمیایی برای پوشش سطوح با لایه ای از فلز با استفاده از محلول آبی فلز و بدون استفاده از منبع جریان الکتریکی خارجی می باشد. در این روش یون فلز در محلول آبی در حضور ماده ی احیاء کننده به صورت شیمیایی احیاء گردیده و فلز در مواضع فعال شده لایه نشانی می گردد. مهمترین مزیت روش لایه نشانی الکترولس، امکان پوشش سطوح مواد نارسا با فلزات و یا آلیاژهای فلزی می باشد. در لایه نشانی

الکترولس امکان پوشش سطوح با هر شکلی وجود دارد، در این روش تمامی خلل و فرج بستر به صورت یکنواخت با فلز پوشش داده می شود به طوریکه ضخامت لایه فلز در تمامی سطح پوشش داده شده اعم از برآمدگی ها و فرورفتگی ها تقریباً یکسان است. تراکم فلز پوشانده شده در روش لایه نشانی احیایی از دیگر روش ها بیشتر است. همچنین در لایه نشانی به روش الکترولس امکان پوشش بخشی از سطح به صورت انتخابی وجود دارد. زیرا فلز تنها در موضعی از سطح که از نظر شیمیایی فعال شده اند، نشانداده می شود. در روش لایه نشانی الکترولس می توان تمامی فلزات را لایه نشانی نمود ولی به دلیل اکسیداسیون سریع ماده احیاء کننده و در نتیجه پایین بودن مدت زمان پایداری حمام لایه نشانی از فلزاتی برای لایه نشانی استفاده می گردد که از سرعت احیاء بالایی برخوردار باشند.

در لایه نشانی بدون استفاده از جریان الکتریکی از مواد احیاء کننده به منظور احیاء شیمیایی یون فلزی استفاده می گردد. از مواد احیاء کننده متداول مورد استفاده در لایه نشانی احیایی میتوان به سدیم هیپوفسفیت، هیدرازین، سدیم بوروهیدرید، فرمالدهید، سدیم پتاسیم تارتارات و گلوکز نوع آلفا اشاره نمود. انتخاب عامل احیاء کننده به نوع فلز و یا آلیاژی که لایه نشانی می گردد بستگی دارد. همچنین شرایط لایه نشانی و خواص فیزیکی - شیمیایی لایه، متاثر از نوع احیاء کننده ، دما و اسیدیته محیط الکترولس می باشد. عامل پایدارکننده ماده ی شیمیایی است که در لایه نشانی احیایی به منظور جلوگیری از تجزیه و تخریب محلول لایه نشانی به کار می رود. تخریب محلول لایه نشانی در اثر احیاء و رسوب ذرات فلز در محلول لایه نشانی اتفاق می افتد. ذرات فلزی رسوب کرده دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند، به همین دلیل این ذرات مانند کاتالیزور عمل کرده و باعث احیاء یون های فلز در محلول لایه نشانی و در نهایت رسوب فلز در محلول می شوند. بنابراین حضور مواد پایدارکننده در محلول لایه نشانی امکان نگهداری و استفاده دراز مدت از

محلول را فراهم می کنند. نکته ی مهم در کاربرد مواد پایدارکننده میزان غلظت این مواد در محلول لایه نشانی می باشد، زیرا غلظت ماده ی پایدارکننده، تعیین کننده ی سرعت احیاء و تشکیل لایه می باشد و اگر غلظت آن از حد مجاز بیشتر باشد فرآیند لایه نشانی انجام نمی شود. [۲۸-۲۹].

در تحقیق حاضر با رویکردی نوین از چاپگر جوهر افشان جهت فعال سازی سطح پارچه پلی استر به عنوان یک زیر لایه انعطاف پذیر استفاده شده است. در این روش، محلول آبی نمک فلزی (فلز پالادیوم) به عنوان جوهر چاپ بر روی سطح پارچه جوهر افشانی شده که پس از ورود به حمام لایه نشانی نانو ذرات فلز نیکل منجر به استحصال شیمیایی نانو ذرات فلزی هادی جریان الکتریسته بر روی زمینه پارچه مورد نظر می شود. طرح های چاپ شده با دارا بودن هدایت الکتریکی بالا در زمینه های متنوع منسوجات هوشمند همچون حسگر دریافت سیگنال های قلب، آنتن های نساجی با قابلیت انتقال اطلاعات در کاربرد های نظامی، مدارات الکترونیکی با انعطاف پذیری بالا قابل استفاده هستند.

مواد و روش تحقیق

مواد

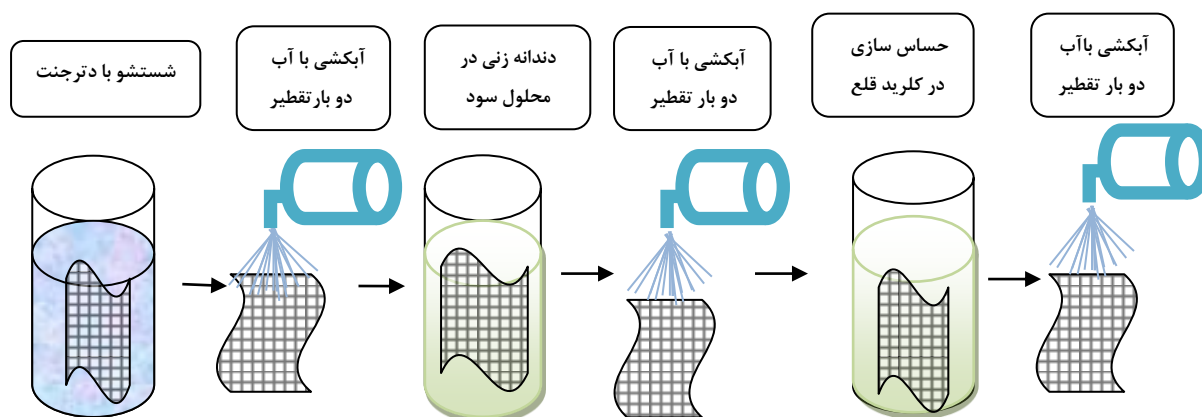
پارچه پلی استر تراکم (۳۰×۳۲ - نمره نخ تار و پود ۸۸/۸ دنیر) با بافت تافته بعنوان زمینه انتخاب شد.

مواد شیمیایی بکار رفته شامل سود، کلرید قلع، اسید کلریدریک، کلرید پالادیوم، سولفات نیکل، هیپوفسفیت سدیم، اسید بوریک، سیترات سدیم، کلرید آمونیوم و ۲- پروپانول همگی با درجه خلوص ۹۹٪ از شرکت سیگما آلد ریچ تهیه گردید.

حساس سازی سطح پارچه

شکل ۱ بصورت شماتیک فاز اول مراحل آماده سازی پارچه طرحدار هادی را بصورت متوالی نشان می دهد تا بدین طریق درک مناسبی از چگونگی فرایند در ذهن خواننده ایجاد شود. فاز اول شامل مرحله ای است که پارچه را برای چاپ عامل فعال کننده بر روی سطح پارچه آماده میکند. این مرحله شامل شستشوی اولیه، آبکشی، دندان دانه دار کردن با محلول سود، آبکشی مجدد، حساس سازی با کلرید قلع و آبکشی نهایی است.

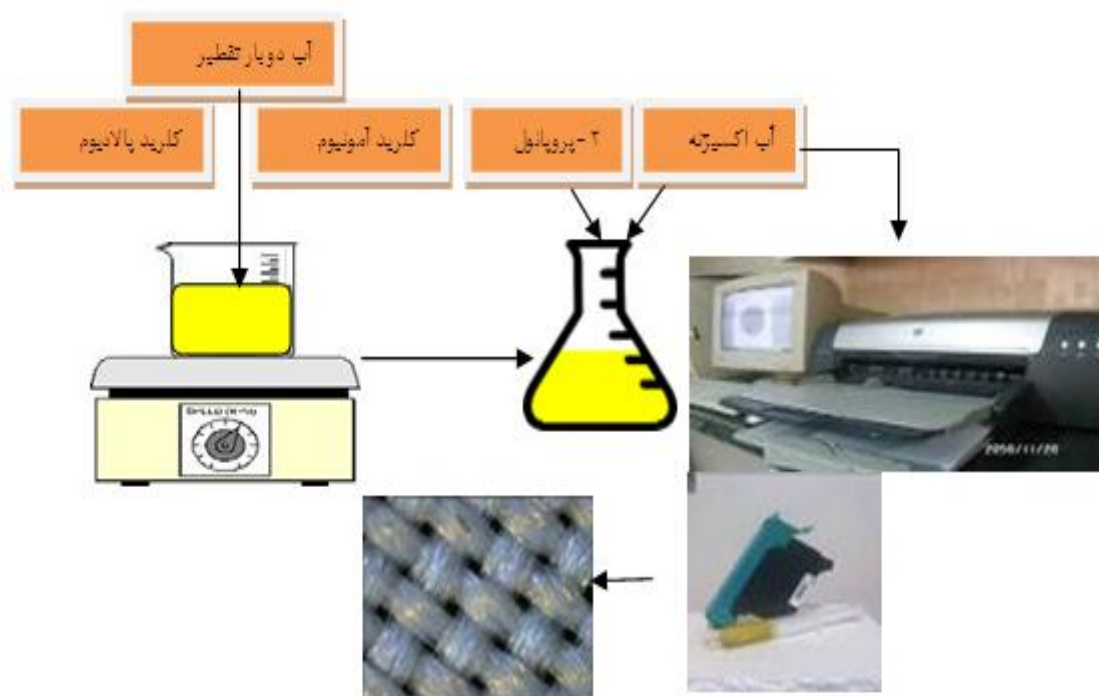
برای آماده سازی سطح هیدروفوب پارچه پلی استر از محلول سود ۱۵ گرم بر لیتر در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه استفاده شد. سپس فرآیند حساس سازی توسط محلول ۱۰ گرم بر لیتر کلرید قلع و ۲۰ میلی لیتر اسید کلریدریک در دمای محیط به مدت ۵ - ۱۰ دقیقه انجام شد. پارچه در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد برای انجام چاپ جوهر افشان خشک گردید.



شکل ۱. مراحل آماده سازی پارچه تا قبل از چاپ فعال کننده پالادیوم.

جوهر پالادیوم آماده شده داخل کارتریج مشکی که کاملاً با محلول اتانول و آب شسته شده ریخته می شود. پس از چاپ نمونه ها در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در آن تثبیت شده و سپس برای تبدیل یون های پالادیوم به فلز پالادیوم نمونه ها در محلول ۰/۱ مول بوروهیدرات سدیم به مدت ۵ دقیقه قرار می گیرند. آب کشی موثر بعد از این مرحله انجام می شود.

آماده سازی جوهر پالادیوم و فعال سازی سطح منسوج
۰/۴ گرم کلرید پالادیوم و کلرید آمونیوم در ۲۳/۷ گرم آب دو بار تقطیر به مدت ۱ ساعت توسط همزن با دور ۳۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. از محلول زرد حاصل مقدار ۰/۱۵ میلی لیتر برداشته شده و به این محلول ۳ قطره آب اکسیژنه اضافه شد و در نهایت به محلول فوق ۱/۲۵ گرم از ۲- پروپانول اضافه شد تا از رسوب جوهر پالادیوم جلوگیری شود. جوهر تهیه شده در دمای محیط به مدت ۲- ۳ هفته پایدار است ولی در دمای ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ماه پایدار می باشد.



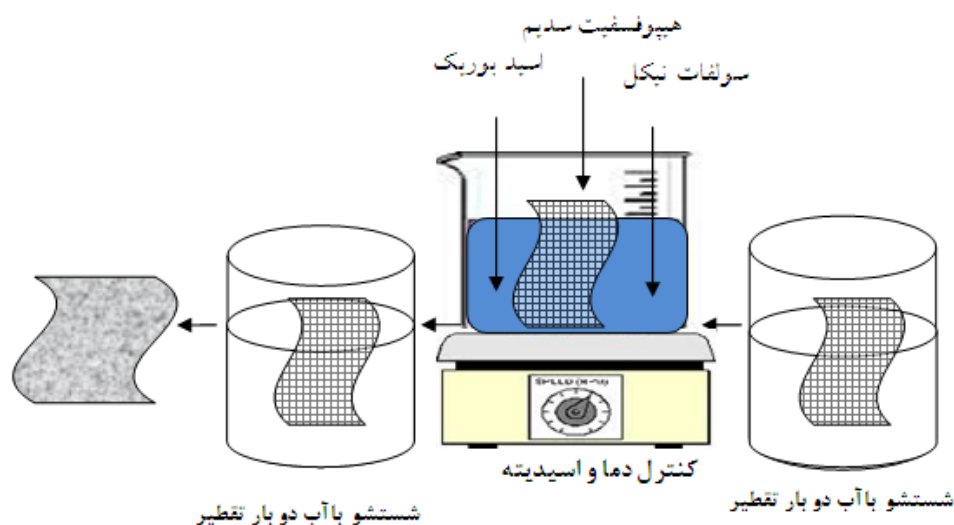
شکل ۲. آماده سازی جوهر پالادیوم جهت چاپ جوهر افشان عامل فعال کننده پالادیوم.

حمام الکترولس

پس از چاپ جوهر افشان توسط جوهر پالادیوم، نمونه ها وارد حمام الکترولس حاوی ۱/۵ گرم سولفات نیکل ، ۳ گرم سیترات سدیم ، ۴/۵ گرم اسید بوریک و ۴/۵ گرم هیپو فسفیت سدیم میشوند.

شکل ۳ شماتیک فرایند الکترولس و لایه نشانی طرح هادی بر روی سطح پارچه را نشان می دهد

شکل ۳ شماتیک فرایند الکترولس و لایه نشانی طرح هادی بر روی سطح پارچه را نشان می دهد



شکل ۳. تصویر شماتیک فرایند الکترولس.

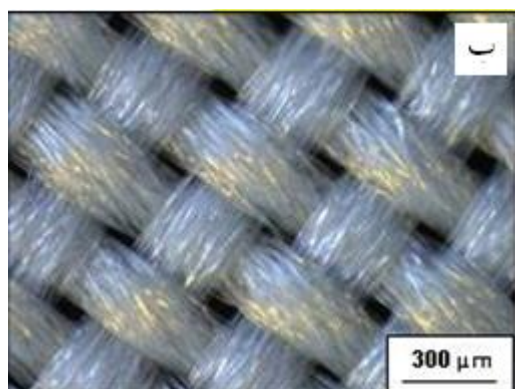
جدول ۱. دما و اسیدیته حمام الکترولس در نمونه های مختلف

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
دما (°C)	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰
اسیدیته	۹	۹	۹	۹	۸	۷	۶	۵	۱۰

روشهای اندازه گیری خصوصیات

تمام نمونه ها قبل از انجام کلیه ی اندازه گیری ها طبق روش های استاندارد به مدت ۲۴ ساعت در فشار اتمسفر، رطوبت نسبی $2 \pm 65\%$ و دمای $1 \pm 21^\circ\text{C}$ قرار داده شدند. میزان مقاومت الکتریکی نمونه ها توسط مولتی متر، اندازه گیری شد. میزان یکنواختی لایه در نمونه هایی که پس از لایه نشانی، مقاومت الکتریکی آنها تغییر کرده با استفاده از هدایت سنج چهار کاناله ی خطی بررسی شد. این هدایت سنج در دانشکده ی فنی دانشگاه گیلان ساخته شده به طوری که بین الکترودهای آن یک سانتی متر فاصله باشد. با استفاده از هدایت سنج چهار کاناله و طبق استاندارد F390:2003 میزان مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های رسا نا شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی میزان مقاومت الکتریکی سطحی شدت جریان الکتریکی ثابت توسط منبع تغذیه به نمونه اعمال شد و تغییرات ولتاژ توسط مولتی متر اندازه گیری شد. در

نهایت مقدار متوسط مقاومت الکتریکی سطحی نمونه با استفاده از رابطه $R_s = \frac{V \times w}{I \times l}$ محاسبه شد. در این رابطه V ولتاژ، w عرض نمونه، I متوسط شدت جریان عبوری و l طول فاصله الکترودها می باشند. برای اندازه گیری ثبات سایشی تر و خشک از دستگاه (M238B, SDL Ltd) استفاده شده است که به وسیله مقیاس خاکستری براساس استاندارد ISO 105-A02:1993 مورد ارزیابی قرار گرفت. مقیاس خاکستری معیار متعارفی است که برای مقایسه رنگ نمونه ها پس از عملیات سایشی از آن استفاده می شود. به منظور بررسی میکروسکوپی سطح نمونه ها پس از لایه نشانی توسط نانو ذرات فلزی، از نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویر برداری شد. از پارچه های لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی JXA-840 تصویر برداری و با آنالیز عنصری ترکیب پوشش روی سطح بررسی شد. یک سیستم



ادامه شکل ۴.

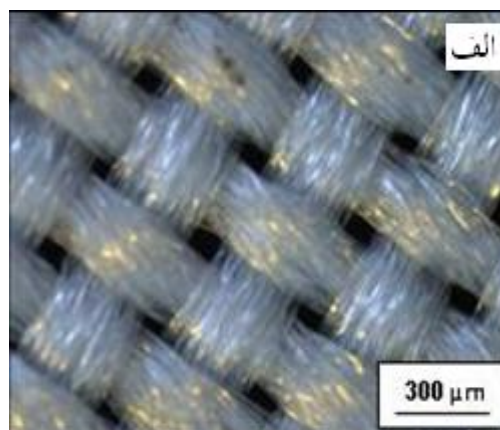
پارچه پس از شستشوی مقدماتی ، برای ایجاد مکانهای لازم به منظور لایه نشانی موثر بصورت غوطه وری در تماس با سود قرار میگیرد و سپس فرایند حساس سازی منسوج با کلرید قلع انجام میشود. شکل ۵ سطح منسوج را پس از عمل آوری با سود نشان میدهد . همان گونه که از تصاویر مشاهده میشود فرایند دندان زنی و یا ایجاد فضاهای لازم برای به تله افتادن ذرات لایه نشانی شده بطرز بسیار ملایمی انجام شده است که در بزرگنمایی بیشتر بصورت سطوح موجدار و یا بصورت زبری بر روی سطح ظاهر می شود. شکل ۶ تصویر سطح را پس از عمل آوری با سود در بزرگنمایی بالاتر نشان میدهد. خلل و فرج ایجاد شده و افزایش قابل توجه زبری سطح این مطلب را تایید میکند. تغییرات در مشخصه های سطح پارچه عمل آوری شده با سود و همچنین حفره هایی با توزیع غیر یکنواخت بخوبی رویت میشود .

بررسی تحقیقات قبلی انجام شده در خصوص بکارگیری چاپ جوهر افشان در ایجاد طرح های هادی [۲۶-۲۷] بر روی منسوج نشان می دهد که در این مطالعات مرحله دندان زنی بستر منسوج توسط سود و یا روش های دیگر انجام نشده است. نتایج گزارش شده در تحقیقات قبلی اگرچه اطلاعاتی در خصوص ثبات سایشی و پایداری طرح ها ارایه نداده است، اما با توجه به مشاهدات و نتایجی که در این مقاله ارایه شده است عدم اجرای فرایند دندان زنی منجر به ثبات بسیار نامطلوب با درجه ۱ میگردد. [۲۸-۲۹]

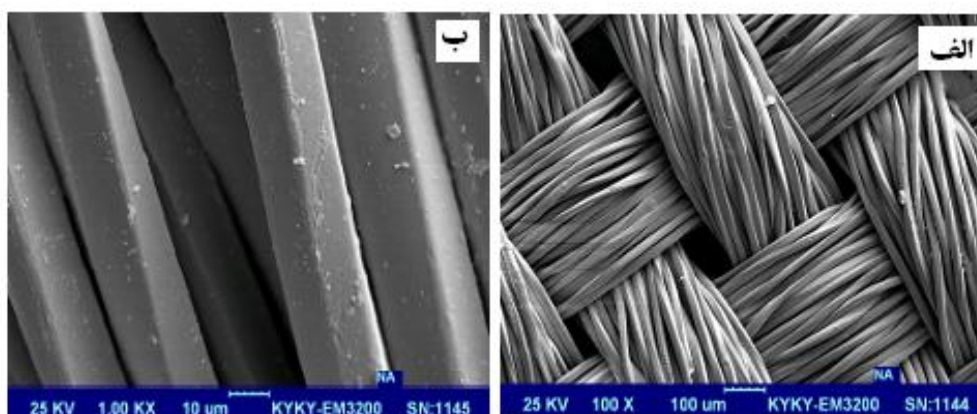
پیشرفته تصویر برداری نیروی اتمی مولتی مد برای اسکن تصویر میکروسکوپی توپولوژی سطح پارچه (مدل No.0101/C) ساخت شرکت داخلی آرا پژوهش ایران مورد استفاده قرار گرفت. رزولوشن عمودی و افقی بترتیب معادل ۰/۱ و ۰/۲ نانومتر است. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی توسط کانتیلور سیلیکونی با نرخ پیمایش ۱ هرتز در محدوده ۵ میکرومتر تنظیم شده است. میزان ظرفیت خازنی نمونه ها توسط مولتی متر خازنی مدل C۸۸ اندازه گیری شد. پروب های اندازه گیری در شرایط محیطی در پشت و روی پارچه قرار می گیرند.

نتایج و بحث

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از روی سطح پارچه قبل و بعد از شستشو با محلول شوینده را نشان میدهد. شفافیت ظاهری سطح پس از شستشو بوضوح قابل رویت بوده که نشان دهنده زدوده شدن چربی ها و یا گرد و غبار احتمالی بر روی سطح پارچه است. این مرحله در فرایند فعال سازی بسیار موثر بوده و موانع عملیاتی تشکیل لایه یکنواخت و با ثبات فلزی را بر روی پارچه فراهم مینماید. شستشوی مقدماتی پارچه در تحقیقات قبلی نیز موید ضرورت این مرحله و تاثیر آن بر روی کیفیت محصول نهایی است [۲۶-۲۳].

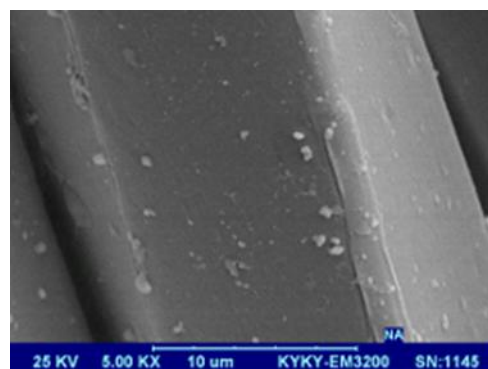


شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نوری (الف) پارچه پلی استر سفید خام (ب) پارچه شستشو شده با دترجنت بزرگنمایی ۱۰۰.



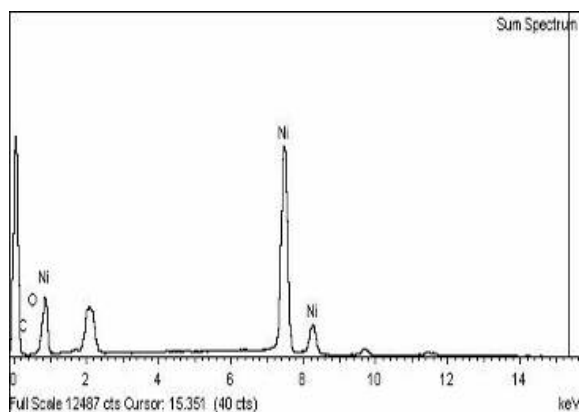
شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پارچه عمل آوری شده با سود (الف) بزرگنمایی ۱۰۰ (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰.

در مرحله نهایی پارچه وارد حمام الکترولس میشود. فرایند لایه نشانی به روش احیایی در شرایط مختلف می تواند بر روی کیفیت، میزان لایه ی تشکیل شده و رسانایی نمونه های لایه نشانی شده تاثیر بگذارد. به همین علت شرایط فرایند، جنس منسوج، غلظت و یا اندازه ذرات شرکت کننده در حین فرایند و اسیدیته واکنش می تواند بر روی عملیات لایه نشانی موثر باشد. کیفیت چاپ و مرزهای طرح هادی نیکل بر روی پارچه پلی استر بخوبی در تصویر میکروسکوپ نوری مشخص است (شکل ۷) و نشان دهنده دقت قابل قبول و عدم پخش شدگی آن (۷-ب) در مقایسه با طرحهایی است که به دلایل متنوعی نظیر مناسب نبودن ویسکوزیته جوهر پالادیوم به فرم پخش شده ظاهر میشود (۷-الف). موضوع پخش شدگی طرحهای هادی از لحاظ عملیاتی دارای اهمیت بسزایی بوده و عدم تشکیل مرزهای مشخص منجر به بروز نوسانات شدید در پاسخ سیگنالهای بدست آمده از حسگرها و یا ابزارهای الکترونیکی دیگر میگردد. در تحقیقات قبلی از روشهای نیز هیدروفوب نمودن سطح منسوج و یا بستر برای جلوگیری از پخش شدگی استفاده شده است که به عنوان یکی از راهای موثر در این خصوص قابل استفاده است [۲۶]. اما در تحقیق حاضر بدون استفاده از تکنیک فوق حد قابل قبولی از مرزهای یکنواخت و منظم بدست آمده است.



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پارچه عمل آوری شده با سود با بزرگنمایی ۵۰۰۰.

مرحله حساس سازی با کلرید قلع از نظر ظاهری تاثیری بر روی سطح پس از عمل آوری با سود ایجاد نموده و نقش آن آماده سازی سطح برای فعال سازی توسط کلرید پالادیوم میباشد. تحقیقات نشان داده است که غلظت حساس کننده کلرید قلع در میزان غلظت موثر لازم برای ماده فعال کننده پالادیوم بسیار موثر خواهد بود [۲۸]. فاز دوم با آماده سازی جوهر پریتتر و بارگذاری آن در کارتریج و چاپ عامل فعال کننده در طرح دلخواه و سپس آبکشی دنبال میشود. تفاوت آشکار شیوه فاز سوم عملیات چاپ طرح هادی شامل آماده سازی حمام الکترولس بوده که بسته به نوع حمام دارای نسخه های متفاوتی خواهد بود. در نهایت آبکشی نهایی و خشک کردن نمونه باعث ظهور طرحی هادی با هدایت فوق العاده بالا خواهد شد.



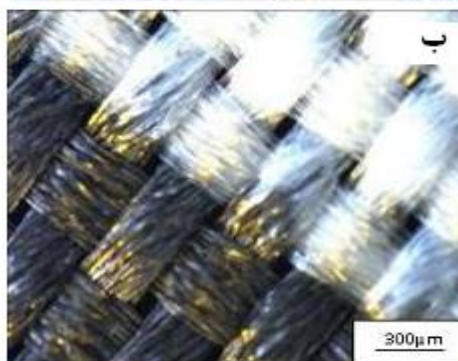
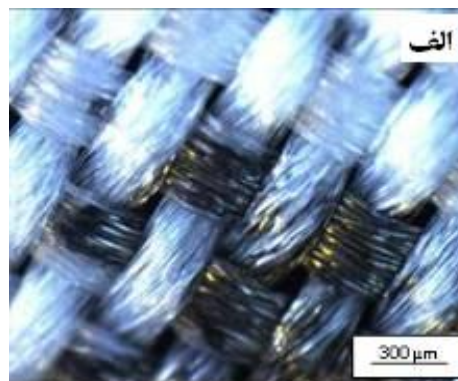
شکل ۸. نمودار آنالیز EDX روی سطح پارچه لایه نشانی شده با نانوذرات نیکل.

جدول ۲. نتایج آنالیز عنصری لایه فلزی پوشش داده شده بر روی

منسوج

عنصر	فسفر	کربن	اکسیژن	نیکل
درصد وزنی (%)	۷/۱۲	۱/۷۳	۲/۰۹	۸۵/۵۷
درصد اتم (%)	۵/۳۴	۳۹/۲۸	۴/۹۹	۵۵/۷۳

به منظور بررسی بازدهی لایه نشانی و میزان لایه تشکیل شده بر روی سطح، مقاومت الکتریکی نمونه ها توسط دستگاه هدایت سنج چهار کاناله خطی اندازه گیری گردید که نتایج آن در جدول شماره ۳ آورده شده است. نتایج جداول ۳ نشان می دهد که در اسیدپتة برابر ۶ و دمای 70°C موثرترین لایه نشانی روی سطح پارچه با توجه به بالاتر بودن میزان هدایت الکتریکی، انجام شده است. ثبات سایشی این نمونه در حد قابل قبول ۳-۴ بوده و همچنان هدایت الکتریکی خوبی بعد از سایش مشاهده شده است [۲۹]. نتایج ارایه شده در این جداول اثبات کرد که وقتی ثبات سایشی کم است ذرات فلزی بیشتر از سطح پارچه کنده شده و هدایت الکتریکی بطور طبیعی کاهش می یابد.



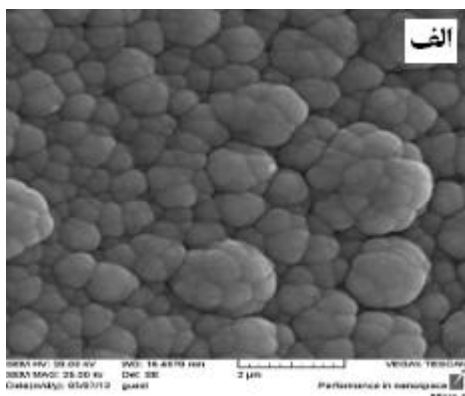
شکل ۷. تصویر میکروسکوپ نوری از مرزهای چاپ (الف) همراه با پخش شدگی (ب) بدون پخش شدگی

تست مقدماتی بر روی پارچه لایه نشانی شده توسط آنالیز عنصری، حضور ذرات نیکل را به وضوح نشان می دهد. همانطور که مشخص است عنصر نیکل در مقایسه با عناصر دیگر بالاترین درصد را به خود اختصاص داده است (شکل ۸). در جدول ۲ درصد ترکیب عناصر تشکیل دهنده لایه روی سطح پارچه پلی استر نشان داده شده است. مقادیر جدول نشان دهنده، تشکیل عمده ذرات عنصر نیکل (۸۵/۵۵٪ وزنی) بر سطح پارچه پلی استر می باشد. لازم به توضیح می باشد که پیک اول از سمت چپ مربوط به طلای پوشش داده شده بر سطح نمونه برای گرفتن تصویر می باشد. با توجه به تاثیر قابل ملاحظه اسیدپتة و دما بر میزان و کیفیت لایه نشانی انجام شده، فرآیند لایه نشانی پارچه با نیکل طبق جدول ۱ انجام گردید.

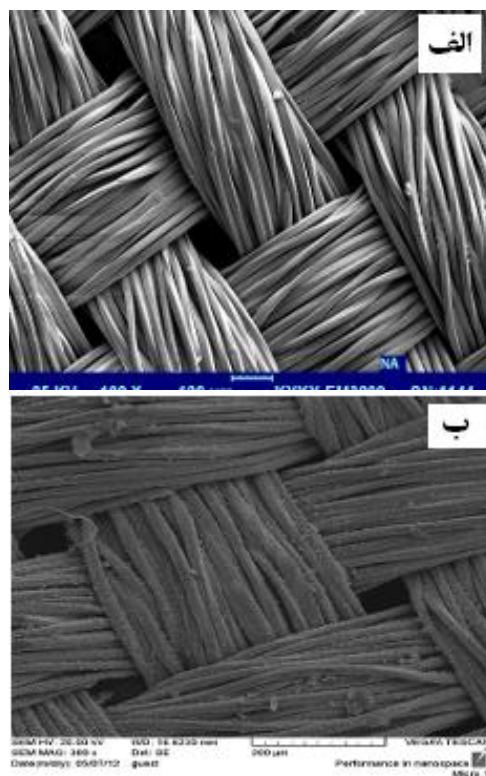
جدول ۳. مقاومت الکتریکی سطحی و ثبات سایشی پارچه های لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل.

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
دما (°C)	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰
اسیدیته	۹	۹	۹	۹	۸	۷	۶	۵	۱۰
هدایت الکتریکی (S/cm)	۴۳۹±۶۸	۳۰۶±۵۳	۴۹۳±۳۱	۲۲۷±۳۲	۳۳۲±۴۷	۱۵۹۹±۲۷	۲۶۳۲±۳۵	۱۱۶۵±۱۹	۱۴۶±۷۵
ثبات سایشی	۴-۵	۴	۴-۵	۴	۴	۴	۳-۴	۴-۵	۴-۵

شکل ۱۰-الف و ب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شماره ۷ که بالاترین میزان رسانایی را دارا ست، نمایش می دهد. در بزرگ نمایی ۵۰۰ پوشش یکنواخت سطح الیاف با ذرات نیکل و در بزرگ نمایی ۲۵۰۰ نانو بودن ذرات نیکل بطور کامل قابل تشخیص می باشد. تصویر میکروسکوپی بخوبی نشان میدهد که ذراتی با اندازه حدود ۵۰-۱۰۰ نانومتر بصورت مجزا و یا بصورت بهم پیوسته با مرزهای کاملاً قابل رویت در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. نواحی بهم پیوسته از چند ذره تا دهها ذره در کنار یکدیگر تشکیل شده است. این ساختار چند لایه برای تحقق هدایت الکتریکی بسیار بالا ضروری است و نتایج هدایت الکتریکی برای نمونه ۷ این موضوع را اثبات میکند. البته شکل گیری لایه یی با یکنواختی بیشتر در سطح و همچنین انباشتگی ذرات کوچک بصورت تپه ای کاملاً مطلوب نیست و تحقیقات متنوعی بر روی سینتیک شکل گیری و دانه بندی ذرات در حال انجام است.

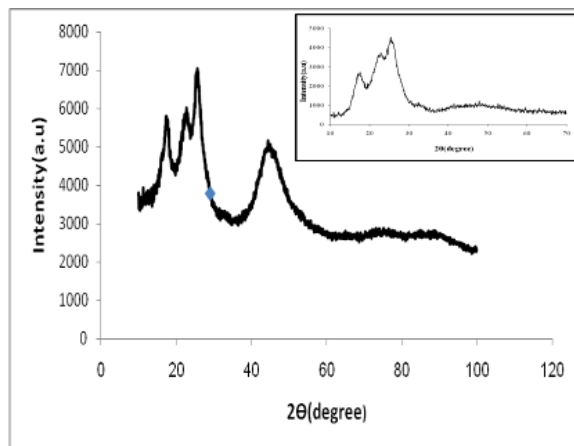


به منظور بررسی تغییرات به وجود آمده در سطح نمونه ها پس از لایه نشانی، از سطح نمونه های تهیه شده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد، در شکل ۹-الف و ب تصاویر سطح نمونه را قبل و بعد از لایه نشانی نشان می دهد. همان طور که در تصویر مشاهده می شود، سطح الیاف پس از لایه نشانی، به طور کامل و یکنواخت با لایه ای از فلز پوشیده شده است به طوری که ساختار میکروسکوپی الیاف پلی استری بعد از لایه نشانی بطور کامل تغییر کرده است.



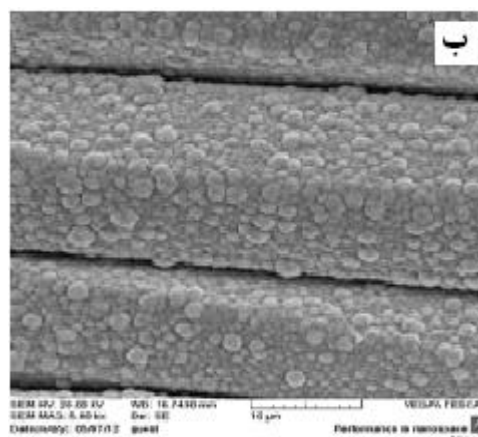
شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی پارچه ی پلی استری: (الف) متراکم خام، (ب) متراکم لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل

این دو اتم نیکل و فسفر، نرخ تفرق فسفر در مقایسه با نیکل بطور نسبی کوچک است.



شکل ۱۱. نمودار طیف تفرق اشعه ایکس پارچه لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل (نمونه ۷) نمودار کوچک در گوشه سمت راست طیف تفرق اشعه ایکس پارچه پلی استر خام است

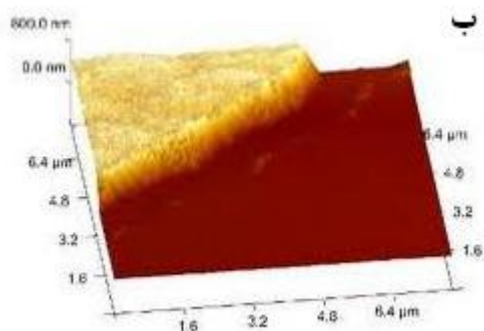
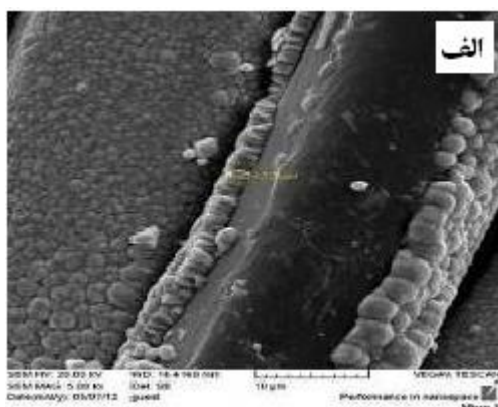
از این رو لایه نشانی نیکل با مقدار بالایی از فسفر همراه با حرکت تعداد زیادی از اتمهای فسفر در هر واحد از زمان لایه نشانی می باشد که به جداسازی نیکل و فسفر منتهی می شود. این حرکت و جدایی مقدار زیادی فسفر، مانع هسته زایی فاز نیکل کریستالی مکعب وجوه مرکز دار و در نتیجه تشکیل ساختار آمورف در شرایط لایه نشانی می شود. بطور معمول پوششهای نیکل - فسفر در سه نوع با محتوی فسفر پایین (۱-۳٪)، متوسط (۴-۷٪) و بالا (۷٪) طبقه بندی می شوند. محتوی فسفر در لایه نشانی انجام شده تابعی از غلظت هیپوفسیت در حمام و دمای انجام واکنش می باشد [۳۱]. شکل ۱۲ مربوط به تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شماره ۶ می باشد. با مقایسه تصاویر متوجه می شویم که ذرات روی سطح الیاف در نمونه شماره ۶ بصورت نایکناخت و به میزان کمتری نسبت به نمونه شماره ۷ لایه نشانی شده است.



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی پارچه لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل در: الف) بزرگمایی ۲۵۰۰، ب) در بزرگمایی ۵۰۰.

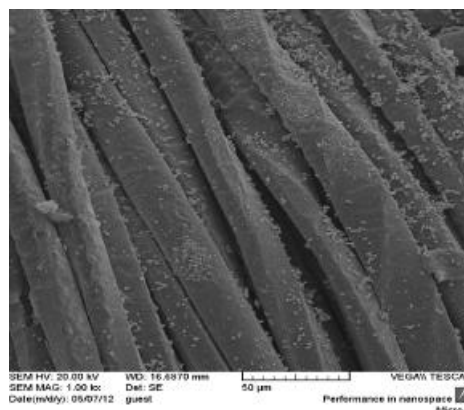
برای بررسی ساختار بلوری و آمورف از نمونه ۷ با بالاترین هدایت الکتریکی طیف تفرق اشعه ایکس تهیه گردید. الگوی تفرق اشعه ایکس پارچه پلی استر خام در شکل ۱۱ (گوشه سمت است) نشان داده شده است. پیک تفرق قوی در زوایای 2θ $17/5^\circ$ ، $22/8^\circ$ و $25/3^\circ$ پیک های مشخص پارچه پلی استر می باشد. طیف تفرق اشعه ایکس برای پارچه لایه نشانی شده با نیکل (شکل ۱۱) علاوه بر پیک های متعلق به مشخصه های پارچه پلی استری، یک پیک پهن در اطراف زاویه 2θ 45° را نشان می دهد. این پیک متناسب با یک ساختار آمورف می باشد که این امر متناسب با تحقیقاتی است که بیان می دارد که وقتی محتوای فسفر لایه نشانی نیکل بیشتر از ۷٪ وزنی باشد، ساختار آمورف تشکیل می شود [۳۰]. پس در لایه نشانی انجام شده بر روی پارچه پلی استر با نانوذرات نیکل با توجه به جدول ۲ که محتوای فسفر لایه نشانی را ۷/۱۲٪ وزنی نشان می دهد یک ساختار آمورف تشکیل شده است. از لحاظ تئوری یک بی نظمی در آرایش یافتگی اتمها در این پیک پهن مشهود است [۳۱]. مکانیسم تشکیل پوششهای نیکلی بیان می دارد که در طول لایه نشانی نیکل، فسفر بطور تصادفی توسط اتمهای نیکل درگیر شده و تغییرات در نرخ جداسازی اتمهای نیکل و فسفر، بلوری بودن لایه تشکیل شده را باعث می شود. بین

به منظور تشخیص چگونگی قرار گیری ذرات بر روی مونو فیلامنتها تصویر میکروسکوپی پس از لایه برداری جزئی از الیاف هادی در مقیاس طولی انجام شد. تصویر بخوبی ضخامت لایه تشکیل شده را بر روی سطح فیلامنت در نمونه شماره ۷ که نسبت به بقیه نمونه ها از هدایت الکتریکی و یکنواختی بهتری برخوردار است، نشان میدهد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده حاکی از تشکیل لایه با ضخامت در حدود ۲/۲۶ میکرومتر بر روی سطح پارچه می باشد. (شکل ۱۵).



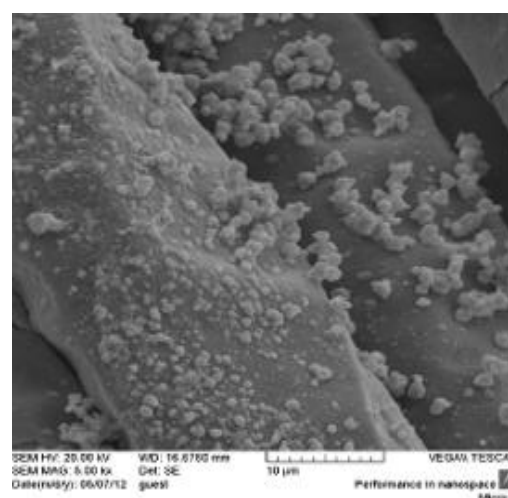
شکل ۱۴. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع پارچه لایه نشانی با نانو ذرات نیکل (ب) تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از ضخامت لایه نشانیده شده.

در مقایسه تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از ضخامت لایه فلزی به فرمی شبیه به ساقه های گندم با ارتفاعی معادل ۲/۳۵ میکرومتر در شکل ۱۴- ب بخوبی مشاهده میشود. ساختار شبه سوزنی مرزهای کریستالهای فلزی از نکات مشهود این تصویر است. با افزایش تعداد دفعات چاپ تا ۱۰ بار، لایه نشانی بیشتری بر سطح پارچه

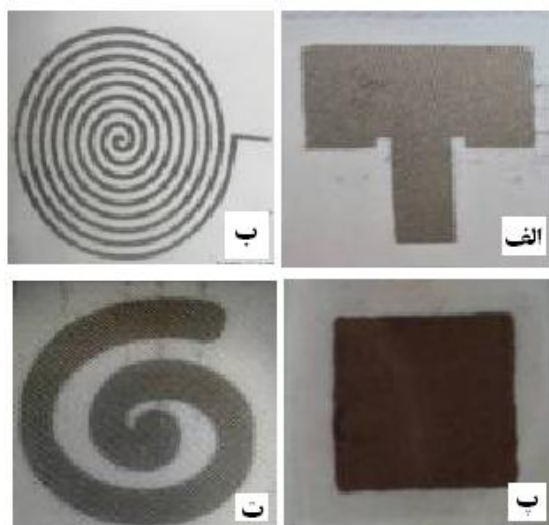


شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۶ در اسیدپته ۷ و دمای ۷۰ درجه سانتی گراد.

برای مشاهده میکروسکوپی تاثیر دما در لایه‌نشانی انجام گرفته روی الیاف، از نمونه شماره ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد. (شکل ۱۳) این نمونه تحت دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و اسیدپته ۹ قرار گرفته بود. با توجه به شکل ۱۳ می‌توان دریافت که در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد ذرات روی سطح الیاف بصورت متراکم بوده ولی همچنان نایکناخت روی سطح توزیع شده است. تراکم این نانو ذرات موجب هدایت الکتریکی قابل قبول در نمونه شده ولی بدلیل عدم توزیع یکنواخت، ثبات سایشی پایینی را داراست و براحتی در بعضی از نقاط از سطح پارچه کنده می‌شود.



شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۴ در اسیدپته ۹ و دمای ۸۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۱۵. نمونه پارچه چاپی لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل با طرحهای متنوع توسط طرح آزمایش استفاده شده در نمونه ۶ (الف) آنتن پچ (ب) آنتی مارپیچ (پ) سنسور الکتروود سیگنال قلب (ت) آنتن مارپیچ ۲.

همه طرحهای نمونه موید کارایی روش برای چاپ میکرو افزارهای الکترونیک بر سطح انعطاف پذیر پارچه است که قابلیت های متنوعی برای ساخت البسه هوشمند و تکنیکی ایجاد میکند. ظرفیت خازنی برای طرحهای متنوع بین ۱۰-۲۰ نانو فاراد اندازه گیری شد که این مقدار با ظرفیت خازنی طرحهای هادی چاپ شده توسط نقره در تحقیقات قبل [۲۶] قابل مقایسه بوده و در عین حال انعطاف پذیری بسیار بالای طرحهای آماده شده و تنوع آن میتواند نقطه عطفی در فرایند مذکور باشد. شکل ۱۶ شیوه اندازه گیری و حدود مقادیر بدست آمده را نشان میدهد.



شکل ۱۶. ظرفیت خازنی اندازه گیری شده در طرحهای آنتنی مختلف.

صورت گرفته که منجر به افزایش میزان رسانایی نمونه ها شده ولی افزایش بیشتر تعداد دفعات چاپ منجر به کاهش ثبات نمونه ها خواهد شد. در بررسی استحکام نمونه ها مشاهده شد، لایه نشانی با نانوذرات نیکل استحکام و مقاومت کششی پارچه خام را تقویت می کند که این امر قابلیت کاربرد منسوج را برای استفاده در کاربردهای الکترونیکی فراهم می کند. نتایج حاصل از انجام تست استحکام کششی حاکی از افزایش میزان استحکام با افزایش تعداد دفعات چاپ داشته، به طوری که با انجام ۸ مرتبه چاپ استحکام به اندازه ۳۰٪ نسبت به پارچه خام افزایش می یابد. این امر بخوبی بیانگر توزیع بسیار مناسب ذرات بر روی سطح پارچه و تشکیل لایه یکنواخت و متراکم در مقیاس نانو بر روی سطح الیاف می باشد. با اندازه گیری زاویه ی بازگشت از چروک پس از لایه نشانی مشاهده گردید، زاویه ی بازگشت از چروک پس از لایه نشانی (حدود ۴۵٪) کاهش یافته است. وجود ذرات فلزی بین الیاف پس از لایه نشانی، اصطکاک بین نخ ها و الیاف را افزایش می دهد. وقتی پارچه لایه نشانی شده تحت نیرویی قرار گرفته و چروکیدگی در آن ایجاد می شود و بعد نیرو حذف می گردد، بدلیل افزایش اصطکاک لایه لای الیاف دیگر، آنها نمی توانند چندان به موضع قبلی خود برگردند. پس چروک پذیری پارچه بعد از لایه نشانی با نانو ذرات فلزی نیکل افزایش می یابد.

شکل ۱۵ تصویر دو نمونه چاپ شده بر روی پارچه ی پلی استری با استفاده از تکنیک جوهر افشان و الکتروسل نیکل در بهترین دما و اسیدیته بدست آمده می باشد. شکل ۱۵-الف تصویر یک آنتن چاپ شده مایکرو استریپ برای ارتباطات در محدوده کم خارج از بدن، که بعنوان شبکه بی سیم محلی (WLAN) شناخته شده و در فرکانس ۲/۴ GHZ کار می کند و از انعطاف پذیری بالایی برخوردار می باشد. شکل ۱۵-ب و ت تصویر یک خازن مارپیچ می باشد. همچنین نمایی از یک حسگر قلب نیز در شکل ۱۵-پ ملاحظه می گردد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت که چاپ جوهر افشان به دلیل سازگاری با زیرلایه‌های مختلف و دمای پایین عملیات چاپ نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد. از طرفی، همانطور که گفته شد از جمله پارامترهای مهم در حمام الکترولس دما و اسیدیته می‌باشد. در این مقاله سعی بر آن شد تا بهترین دما و اسیدیته برای حمام الکترولس با توجه به روش چاپ جوهرافشان انتخاب گردد. نتایج بدست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و هدایت الکتریکی بدست آمده از نمونه‌ها در این مقاله، نشان داد که بهترین اسیدیته برای حمام الکترولس نمونه‌های چاپ شده اسیدی و برابر با ۶ و بهترین دمای برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نتایج بدست آمده از آنالیز عنصری معرف تشکیل ساختار آمورف فسفر- نیکل بوده که نتایج تفرق اشعه ایکس و ظهور پیک پهن در حدود زاویه ۴۵ درجه تاییدی بر این نتیجه است. همچنین افزایش زیاد دما و اسیدیته باعث تخریب حمام و سیاه شدن آن و کاهش شدید هدایت الکتریکی میگردد. از طرفی، برای چاپ مدارات و برد‌های الکتریکی استفاده از جوهر پالادیوم و لایه نشانی فلز نیکل به منظور دستیابی به رسانایی مورد انتظار، مناسب می‌باشد و با ایجاد هدایت الکتریکی بالا $2632 \pm 355 \text{ S/m}$ و استحکام مطلوب کاربردهای گسترده‌ای در حوزه الکترونیک خصوصاً کاربرد در مدارات الکترونیکی چاپی و آنتن‌های چاپی بر زیر لایه پارچه‌ای دور از انتظار نیست. برای کاربردهای دیگر نیز ظرفیت خازنی حدود ۱۰-۲۰ نانو فاراد ثبت گردیده است که در ذخیره‌سازی انرژی بسیار با اهمیت است.

منابع

1. A.S. Joshi, K. Sharma, D. Wagh and D. Pareek, *Development of E-health monitoring garment*, Man-Made Textiles in India, 39(2011)279-285.
2. S.I. Ahn, W.K. Kim, S.H. Ryu, K.J. Kim, S.E. Lee, S.H. Kim, J.C. Park and K.C. Choi, *OLED with a controlled molecular weight of the PVK (poly(9-vinylcarbazole)) formed by a reactive ink-jet process*, Organic Electronics: physics, materials, applications, 13(2012)980-984.
3. L. Basiricò, P. Cosseddu, B. Fraboni and A. Bonfiglio, *Inkjet printing of transparent, flexible, organic transistors*, Thin Solid Films, 520(2011)1291-1294.
4. T. Blaudeck, P.A. Ersman, M. Sandberg, S. Heinz, A. Laiho, J. Liu, I. Engquist, M. Berggren and R.R. Baumann, *Simplified large-area manufacturing of organic electrochemical transistors combining printing and a self-aligning laser ablation step*, Advanced Functional Materials, 22(2012)2923-2948.
5. W.Y. Chou, S.T. Lin, H.L. Cheng, M.H. Chang, H.R. Guo, T.C. Wen, Y.S. Mai, J.B. Horng, C.W. Kuo, F.C. Tang, C.C. Liao and C.L. Chiu, *Polymer light-emitting diodes with thermal inkjetprinted poly(3,4ethylenedioxythiophene):polystyrenesulfonate as transparent anode*, Thin Solid Films, 515(2007)3718-3723.
6. I. Bernacka-Wojcik, R. Senadeera, P.J. Wojcik, L.B. Silva, G. Doria, P. Baptista, H. Aguas, E. Fortunato and R. Martins, *Inkjet printed and "doctor blade" TiO₂ photodetectors for DNA biosensors*, Biosensors and Bioelectronics, 25(2010)1229-1234.
7. R.A. Barry Iii, R.F. Shepherd, J.N. Hanson, R.G. Nuzzo, P. Wiltzius and J.A. Lewis, *Direct-write assembly of 3D hydrogel scaffolds for guided cell growth*, Advanced Materials, 21(2009)2407-2410.
8. W.Y. Yeong, C.K. Chua, K.F. Leong, M. Chandrasekaran and M.W. Lee, *Indirect fabrication of collagen scaffold based on inkjet printing technique*, Rapid Prototyping Journal, 12(2006)229-237.

9. D. Xu, V. Sanchez-Romaguera, S. Barbosa, W. Travis, J. De Wit, P. Swan and S.G. Yeates, *Inkjet printing of polymer solutions and the role of chain entanglement*, Journal of Materials Chemistry, 17(2007)4902-4907.
10. J.T. Wu, S.L.C. Hsu, M.H. Tsai and W.S. Hwang, *Inkjet printing of lowerature cured silver patterns by using AgNO 1/3-dimethylamino-2-propanol inks on polymer substrates*, Journal of Physical Chemistry C, 115(2011)10940-10945.
11. B. Weng, X. Liu, R. Shepherd and G.G. Wallace, *Inkjet printed polypyrrole/collagen scaffold: A combination of spatial control and electrical stimulation of PC12 cells*, Synthetic Metals, 162(2012)1375-1380.
12. S. Gamerith, A. Klug, H. Scheiber, U. Scherf, E. Moderegger and E.J.W. List, *Direct ink-jet printing of Ag-Cu nanoparticle and Ag-precursor based electrodes for OFET applications*, Advanced Functional Materials, 17(2007)3111-31118.
13. S. Hauschild, U. Lipprandt, A. Rumblecker, U. Borchert, A. Rank, R. Schubert and S. Förster, *Direct preparation and loading of lipid and polymer vesicles using inkjets*, Small, 1(2005)1177-1180.
14. P.D. Angelo, G.B. Cole, R.N. Sodhi and R.R. Farnood, *Conductivity of inkjet-printed PEDOT:PSS-SWCNTs on uncoated papers*, Nordic Pulp and Paper Research Journal, 27(2012)486-495.
15. P.D. Angelo and R.R. Farnood, *Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrene sulfonate) inkjet inks doped with carbon nanotubes and a polar solvent: The effect of formulation and adhesion on conductivity*, Journal of Adhesion Science and Technology, 24(2010)643-659.
16. W.R. Small, F. Masdarolomoor, G.G. Wallace and M. In Het Panhuis, *Inkjet deposition and characterization of transparent conducting electroactive polyaniline composite films with a high carbon nanotube loading fraction*, Journal of Materials Chemistry, 17(2007)4359-4361.
17. K.H. Shin, J. Cho, J. Jang, H.S. Jang, E.S. Park, K. Song and S.H. Kim, *Polypyrrole top-contact electrodes patterned by inkjet printing assisted vapor deposition polymerization in flexible organic thin-film transistors*, Organic Electronics: physics, materials, applications, 13(2012)715-720.
18. M. Černá, M. Veselý and P. Dzik, *Physical and chemical properties of titanium dioxide printed layers*, Catalysis Today, 161(2011)97-104.
19. C.J. Chang, S.T. Hung, C.K. Lin, C.Y. Chen and E.H. Kuo, *Selective growth of ZnO nanorods for gas sensors using ink-jet printing and hydrothermal processes*, Thin Solid Films, 519(2010)1693-1698.
20. W. Cui, W. Lu, Y. Zhang, G. Lin, T. Wei and L. Jiang, *Gold nanoparticle ink suitable for electric-conductive pattern fabrication using in ink-jet printing technology*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 358(2010)35-41.
21. B. Hu, D. Li, O. Ala, P. Manandhar, Q. Fan, D. Kasilingam and P.D. Calvert, *Textile-based flexible electroluminescent devices*, Advanced Functional Materials, 21(2011)305-311.
22. J.S. Kang, H.S. Kim, J. Ryu, H. Thomas Hahn, S. Jang and J.W. Joung, *Inkjet printed electronics using copper nanoparticle ink*, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 21(2010)1213-1220.
23. D. Li, D. Sutton, A. Burgess, D. Graham and P.D. Calvert, *Conductive copper and nickel lines via reactive inkjet printing*, Journal of Materials Chemistry, 19(2009)3719-3724..
24. N.S. Kim and K.N. Han, *Future direction of direct writing*, Journal of Applied Physics 108 (2010). 102801-102807
25. S. Magdassi, A. Bassa, Y. Vinetsky and A. Kamyshny, *Silver nanoparticles as pigments for water-based ink-jet inks*, Chemistry of Materials, 15(2003)2208-2217.
26. S.M. Bidoki, D.M. Lewis, M. Clark, A. Vakorov, P.A. Millner and D. McGorman, *Ink-jet fabrication of electronic components*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 17(2007)967-974.
27. S.M. Bidoki, D. McGorman, D.M. Lewis, M. Clark, G. Horler and R.E. Miles, *Inkjet printing of conductive*

- patterns on textile fabrics*, AATCC Review, 5(2005)11-14.
28. A. Afzali, V. Mottaghitalab, M.S. Motlagh and A.K. Haghi, *The electroless plating of Cu-Ni-P alloy onto cotton fabrics*, Korean Journal of Chemical Engineering, 27(2010)1145-1149.
 29. M. Mohammadian, A. Afzali, V. Mottaghitalab and A.K. Haghi, *Washing and rubbing fastness of electroless plated polyester conductive fabric*, Materiale Plastice, 49(2012)182-185
 30. J.N. Balaraju, T.S.N. Sankara Narayanan, S.K. Seshadri, "Structure and phase transformation behavior of electroless Ni-P composite coatings." Mater. Res. Bull., 41:847-860, 2006.
 31. I. Baskaran, T.S.N. Sankara Narayanan, A. Stephen, "Effect of Accelerators and Stabilizers on the Formation and Characteristics of Electroless Ni-P Deposits.", Mater. Chem. Phys, Vol. 99, pp. 117-126, 2006