منسوجات الکترونیکی تهیه شده توسط چاپ اسکرین

چکیده

در سالهای اخیر ضرورت استفاده از منسوجات رسانای الکتریکی در بین منسوجات هوشمند به طور آشکاری افزایش یافته است. به طور معمول این رسانایی از طریق بکار بردن ذرات فلزی، الیاف و یا نخهای رسانا در منسوج و یا از طریق پوشش دهی سطح منسوج توسط یک لایه فلزی حاصل می شود. در این تحقیق میزان کارآمدی روش دیگری (چاپ اسکرین جوهر رسانا بر روی سطح منسوج) مورد بررسی قرار گرفته است. این روش چاپ روش جایگزین مناسبی از جهت انعطاف پذیری این روش و نیز موثر بودن آن می باشد. در این روش رسانایی توسط اندازه گیری مقاومت سطح در مراحل مختلف (پس از چاپ، سایش و شستشو) مورد بررسی قرار گرفته است. منسوج مورد مطالعه قرار گرفته خصوصیات رسانایی خوبی را پس از چاپ و سایش نشان می دهد ولی رسانایی پس از ۲۰ بار شستشو به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. بنابراین جهت افزایش قابلیت شستشویی از یک لایه محافظ پلی اورتان بر روی سطح چاپ استفاده می شود.

مژده قهرمانی

مقدمه

امروزه الفاظی مانند "منسوجات هوشمند" و "کامپیوترهای قابل پوشیدن" بسیار مورد استفاده قرار میگیرند. این واژه ها مربوط به منسوجاتی می باشد که تحریکات محیط اطراف را حس کرده و نسبت به آنها واکنش نشان داده و تطابق پیدا می کنند.

تاریخچه این منسوجات به سال ۱۹۶۰ میلادی بر می گردد. زمانیکه با کشف موادی با حافظه شکل اولیه (در اثر تغییر فرم دوباره به شکل اولیه باز می گردند) سبب ایجاد نوآوری در تاریخچه مواد گردید. پیرو این کشف، در سال ۱۹۷۰ میلادی ژل های پلیمری تحت نام مواد هوشمند معرفی گردید. در سال ۱۹۹۰ میلادی محققین شروع به بکار بردن این مواد در منسوجات کرده و در نتیجه زمینه ای در جهت تولید منسوجات هوشمند ایجاد گردید. پس از آن تحقیقات گسترده تری در ترکیب منسوجات و الکترونیک صورت گرفته و سبب پیشرفتهای قابل توجهی در این زمینه شد. اولین ژاکت الکترونی تحت نام ICD + (Industrial Clothing Design Plus) توسط شرکتهای Strauss & Levi و آزمایشگاه تحقیقاتی Philips در سال ۲۰۰۰ میلادی به بازار معرفی گردید. متعاقبا سیستمهای ارتباطی دیگری نظیر گوشی‌های همراه، سیستمهای پخش فایل‌های صوتی، کامپیوترها و سیستمهای ردیاب بر روی منسوج نصب گردید. جهت کاربردی کردن این محصول و تولید کامپیوترهای قابل پوشش از انواع مواد رسانا، سیم ها و باتری ها استفاده شده است. از دیدگاه علم نساجی تلاش در جهت یافتن راه حل هایی مانند استفاده از الیاف و نخ رسانا، پوشش دهی رسانایی بر روی سطح و یا بکار بردن جوهر رسانا بر روی منسوج بدون تغییر در خصوصیات آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در میان روشهای ذکر شده استفاده از جوهر رسانا، کاربردهای وسیعی را از جمله در تهیه بردهای الکترنی چاپ شده (PCBs)، برچسب‌های بازشناسی توسط امواج رادیویی (RFID) و غیره در بر داشته است. جهت دستیابی به چنین محصولاتی که تاکنون در سطوح سخت مشاهده می شده و بنابراین کاملا متفاوت با سطح منعطف منسوج می باشد روشهای مختلفی مانند چاپ اسکرین بکار رفته است.

در ده سال اخیر جهت کنترل سیگنالهای حیاتی بدن که در تماس مستقیم با منسوج می باشد مدارهای الکترونی مختلفی توسط جوهر حاوی ذرات نقره و روش چاپ اسکرین بر روی پارچه‌های تاری پودی و نیز بر روی سطوح بی بافت (Nonwoven) ایجاد گردیده است. نتیجه کار محصولی سبک و انعطاف پذیر می باشد که مانند سایر پوشاک می توان در کاربردهای روزانه از آن استفاده نمود. بنابراین حفظ انتظارات کاربر نهایی در زمینه عدم نیاز به نگهداری ویژه از کالای نهایی و نیز راحتی شستشو بدون ایجاد تغییر در آن بسیار حائز اهمیت بوده و نیاز به بررسی های بیشتر دارد. در این تحقیق جهت بررسی نوع جوهر بکار رفته در خصوصیات محصول نهایی از دو نوع جوهر بر پایه ذرات نقره استفاده شده است. خصوصیات الکتریکی محصول نهایی توسط اندازه گیری مقاومت سطح چاپ شده در سه مرحله (پس از چاپ، ایجاد سایش و پس از شستشو) مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روشهای بکار رفته

در جدول زیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه پارچه های تهیه شده جهت چاپ جوهر رسانا بر روی آنها بیان شده است. (اندازه گیری‌ها بر اساس استاندارد ISO صورت گرفته است).

خصوصیات ذکر شده در چاپ نهایی و در نتیجه در رسانایی خطوط چاپ شده بسیار موثر می‌باشد:

جنس پارچه های تولید شده

CO : پنبه　　CV : ویسکوز

PA : پلی آمید　　PES : پلی استر

جوهر های رسانا

جوهـر رسـانا متشـکل از ذرات فلـزی شـامل مـس، نقـره و طـلا مـی باشـد کـه در رزیـن هـای مناسـب آلـی و غیرآلـی پراکنـده شـده انـد. بـکار بـردن جوهـر حـاوی ذرات مـس بـه دلیـل ناپایـداری ترمودینامیکـی آن در شـرایط اتمسـفری، سـبب اکسیداسـیون شـده و مشـکلاتی را در پـی خواهـد داشـت. اسـتفاده از جوهـر حـاوی ذرات طـلا بـه دلیـل هزینـه بـالا ، مقـرون بـه صرفـه نبـوده و بنابرایـن بهتریـن گزینـه در تهیـه جوهـر رسـانا اسـتفاده از ذرات نقـره مـی باشـد.

خصوصیـات دو جوهـر بـکار رفتـه در چـاپ اسـکرین :

جوهـر Electrodag PF 410 تهیـه شـده توسـط Acheson شـامل رزیـن پلـی اتـر سـولفون (PES) همـراه بـا ذرات نقـره بـا ابعـاد کمتـر از ۳μm می‌باشـد و جوهـر 5025 Silver Conductor تهیـه شـده توسـط Dupont شـامل رزیـن اپوکسـی همـراه بـا ذرات نقـره بـا ابعـاد کمتـر از ۲/۵μm می‌باشـد. جوهرهـای رسـانای نامبـرده شـده بـه طـور عمـده در تهیـه مدارهـای الکترونـی چـاپ شـده بـر روی سـطوح منعطـف (ماننـد: پلـی اسـتر ، پلـی آمیـد و کاغـذ) بـا ولتـاژ پاییـن بـکار مـی رونـد و بـرای چـاپ اسـکرین دسـتی نیـز مناسـب مـی باشـند. همانطـور کـه در جـدول ۲ مشـاهده مـی شـود جوهـر Electrodag PF 410 کشـش سـطحی و ویسـکوزیته پاییـن تـری داشـته و سـبب نفـوذ راحـت تـر و بیشـتر آن بـه درون سـاختار منسـوج مـی گـردد.

چاپ اسکرین

چـاپ اسـکرین از روشـهای قدیمـی مـی باشـد کـه در اواخـر قـرن نهـم معرفـی گردیـد. در ایـن روش از شـابلون هایـی کـه مطابـق طـرح تهیـه شـده انـد جهـت عبـور جوهـر و قرارگیـری آن روی سـطح اسـتفاده مـی شـود. ایـن تکنیـک سـاده و کـم هزینـه در چـاپ روی سـطوح مختلـف ماننـد شیشـه، سـرامیک، منسـوجات، کاغـذ، فلـزات ، چـوب و غیـره کاربـرد فـراوان دارد.

در ایـن تحقیـق ۳ نمونـه از هـر پارچـه ذکر شـده در جـدول ۱ بـا ابعـاد ۶ در ۶ سـانتیمتر تهیـه گردیـده و بسـته بـه میـزان نفوذپذیـری پارچـه ۵ الـی ۱۰ بـار چـاپ جوهـر روی آنهـا صـورت گرفتـه اسـت.

پـس از عملیـات چـاپ جهـت تثبیـت جوهـر بـر روی سـطح نمونـه هـا، ابتـدا آنهـا را داخـل آون در شـرایط گرمادهـی ۱۲۰°C مطابـق بـا جـدول شماره ۲ و سـپس بـه مـدت ۲۴ سـاعت در شـرایط اسـتاندارد (٪۲±۶۵ =RH و °C ۲±۲۰ =T) قـرار مـی دهنـد.

انـدازه گیـری رسـانایی الکتریکـی توسـط روش چهاردرگاهه

مقاومـت الکتریکـی نمونـه هـای چاپ شـده توسـط روش چهـار درگاهـه و دسـتگاه MR-1 سـاخته شـده توسـط شـرکت Schuetz Messtechnik بدسـت آمـده اسـت. ایـن روش سـبب افزایـش دقـت انـدازه گیـری در تعییـن مقاومـت الکتریکـی نسـبت بـه روش معمـول دو درگاهـه مـی گـردد. در ایـن راسـتا از دو درگاه بیرونـی جریـان الکتریکـی عبـور داده شـده و سـپس از طریـق دو درگاه درونـی مقـدار ولتـاژ خوانـده مـی شـود. بـرای جلوگیـری از هـر گونـه تخریـب در نمونـه چـاپ شـده کمتریـن جریـان (۱۰۰ میلـی آمپـر) از درگاههـای بیرونـی عبـور داده مـی شـود.

مقاومـت الکتریکـی نمونـه هـا قبـل از شستشـو، بعـد از شستشـو (۱۵، ۱۰، ۵ و ۲۰ بـار شستشـو) و پـس از هـر بـار سـایش تعییـن گردیـده اسـت. بـرای هـر نمونـه در ۵ نقطـه مختلـف آن اندازه‌گیـری مقاومـت الکتریکـی صـورت گرفتـه و

جدول شماره ۱ : مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه پارچه های تهیه شده جهت چاپ جوهر رسانا

جنس پارچه بکار رفته	تراکم پارچه، تعداد نخ /cm		طرح بافت پارچه	ضخامت، mm	وزن پایه، g/m^2	ظرفیت جذب، ٪
	تار	پود				
CO۱	۲۴	۱۶	سرژه ۱/ ۳	۰/۸۶۴	۴۳۵	۱۲۴
CO۲	۴۲	۲۹	سرژه ۱/ ۳	۰/۴۱۴	۲۳۳	۷۷
CO۳	۵۲	۲۴	سرژه ۲/ ۲	۰/۳۹۰	۲۳۸	۹۸
CO۴	۴۷	۲۶	سرژه ۱/ ۴	۰/۴۶۸	۲۸۳	۱۰۰
CV۱	۱۸	۱۱	تافته ۱/ ۱	۰/۴۸۸	۲۵۴	۱۰۱
CV۲	۲۰	۱۹	تافته ۱/ ۱	۰/۳۱۰	۱۳۲	۱۵۲
CV۳	۳۲	۲۰	تافته ۱/ ۱	۰/۳۷۸	۱۹۱	۸۸
PA۱	۴۵	۳۲	سرژه ۲/ ۲	۰/۱۹۸	۹۹	۱۳۵
PES۱	۴۶	۲۵	تافته ۱/ ۱	۰/۳۸۰	۱۶۳	۱۲۸
PES۲	۵۵	۴۸	سرژه ۱/ ۲	۰/۱۴۰	۱۰۱	۶۴
PES۳	۵۷	۴۶	سرژه ۱/ ۲	۰/۱۴۶	۱۰۴	۶۴
PES۴	۲۱	۲۲	تافته ۱/ ۱	۰/۴۷۸	۱۷۷	۱۶۲
CO/PES۱	۴۶	۲۶	سرژه ۱/ ۳	۰/۲۹۶	۱۱۳	۱۶۱
PES/CV۲	۴۵	۲۵	سرژه ۱/ ۳	۰/۲۴۶	۱۰۸	۱۵۳

جدول شماره ۲ : خصوصیات دو جوهر بکار رفته در چاپ اسکرین

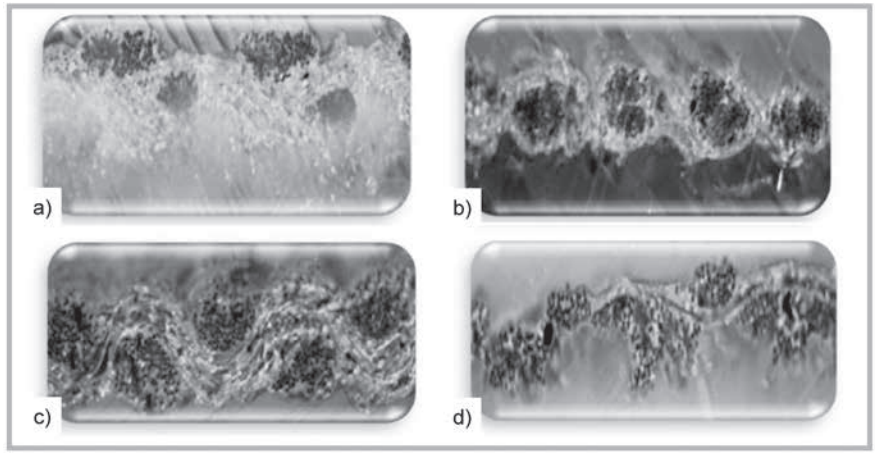
خصوصیات	نوع جوهر	
	Electrodag PF410	5025Silver Conductor
ویسکوزیته	۱۰ -۲۵	۲۰ - ۳۰
کشش سطحی	۳۵	۳۷
درصد جامد	۷۳/۵ - ۷۶	۶۸ – ۷۲
زمان گرمادهی در دمای ۱۲۰ °C، min	۱۵	۵ - ۷
مقاومت سطح ، Ω/sq	<۰/۰۲۵	۰/۰۱۲ – ۰/۰۱۵

میانگین اعداد بدست آمده به عنوان مقاومت الکتریکی آن نمونه در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از اندازه گیری های صورت گرفته جهت تعیین مقاومت الکتریکی نمونه های چاپ شده در شکل ۳ مشخص شده است.

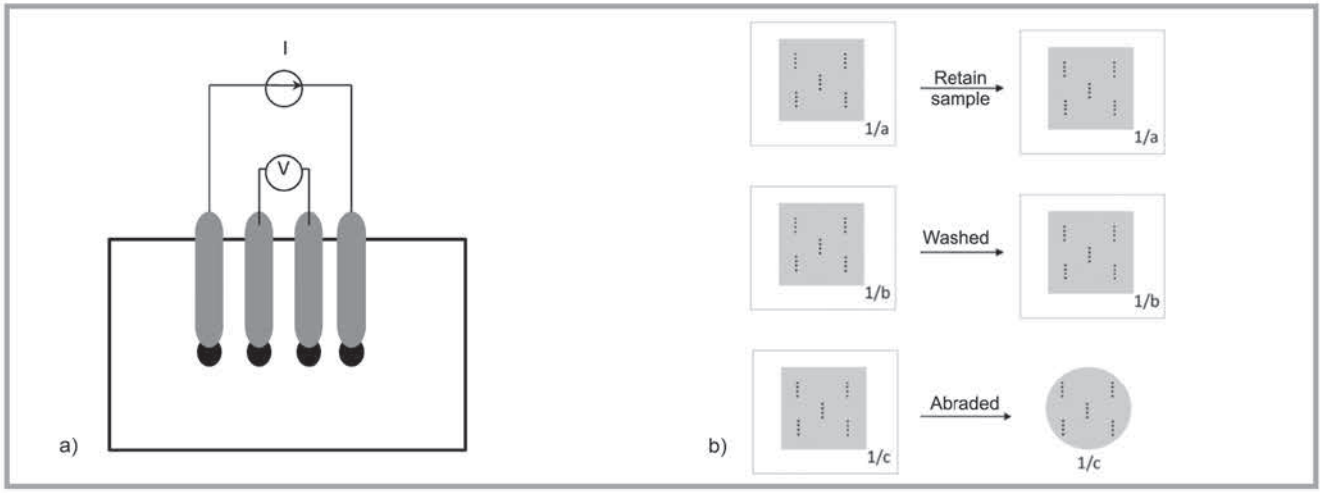
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود مقدار مقاومت الکتریکی لایه های چاپ شده به میزان قابل توجهی وابسته به جنس منسوج بکار رفته می باشد. در ضمن فاکتور جوهر بکار رفته نیز در رسانایی نهایی بدست آمده تاثیر قابل ملاحظه ای دارد. محدوده مقاومت الکتریکی بدست آمده در مورد چاپ جوهر Electrodag PF 410 بین ۰/۰۳۰ Ω/sq تا ۰/۱۲۹ بوده در حالیکه این محدوده در مورد چاپ جوهر 5025 Silver Conductor کمتر بوده و بین ۰/۰۲۰ Ω/sq و ۰/۱۰۴ می باشد. همچنین مشاهده می شود که روند مقاومت الکتریکی بین نمونه ها در دو جوهر بکار رفته یکسان نمی باشد.

در مورد استفاده از جوهر Electrodag PF 410 کمترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه CV1 برابر با ۰/۰۳۰ Ω/sq و بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه PES1 برابر با ۰/۱۲۹ Ω/sq بوده در حالیکه در مورد استفاده از جوهر 5025 Silver Conductor کمترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه‌های PES1 و CV1 برابر با ۰/۰۲۰ Ω/sq و بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه CV2 برابر با ۰/۱۰۴ Ω/SQ می باشد.

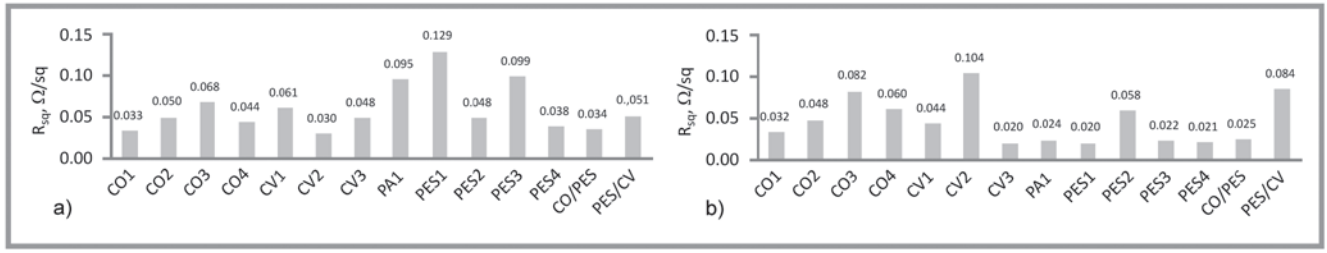
در جدول شماره ۲ مقاومت سطح جوهر Electrodag PF 410 برابر با <۰/۰۲۵ Ω/sq و نیز محدوده مقاومت الکتریکی بدست آمده در شکل شماره ۳ در مورد چاپ این جوهر بسیار بالاتر از این مقدار و بین ۰/۰۳۰ Ω/sq تا ۰/۱۲۹ می باشد و نیز به طور مشابه در مورد جوهر



شکل شماره ۱ : تصاویر سطح مقطع بدست آمده توسط استریسکوپ از نمونه پارچه ها پس از عملیات چاپ جوهر رسانا a) CO2 b) CV2 C) PES4 d) CO/PES



شکل شماره ۲ : مقاومت الکتریکی نمونه های چاپ شده با جوهر رسانای a) اندازه گیری رسانایی الکتریکی توسط روش ٤ درگاهه b) اندازه گیری از ۵ نقطه مختلف نمونه پارچه های چاپ شده



شکل شماره ۳ : a) Electrodag PF 410 b) 5025 Silver Conductor

5025 Silver Conductor مقاومت سطح جوهر برابر با ۰/۰۱۵ Ω/sq – ۰/۰۱۲ و نیز محدوده مقاومت الکتریکی بدست آمده در شکل شماره ۳ در مورد چاپ این جوهر بسیار بالاتر از این مقدار و بین ۰/۰۲۰ Ω/sq تا ۰/۱۰۴ می باشد. با مقایسه اطلاعات داده شده در بالا می توان گفت تفاوت مقادیر بیان شده مربوط به سطح چاپ بوده و در سطوح متخلخل مقداری جوهر جذب سطح شده و در نتیجه میزان مقاومت الکتریکی حاصله بیشتر از مورد مشابه آن بر روی سطح سخت و بدون منفذ می گردد.

نکته دیگری که از مقایسه داده های موجود می توان به آن اشاره نمود مربوط به تفاوت مقاومت الکتریکی بدست آمده در چاپ جوهر بکار رفته می باشد. جوهر Electrodag PF 410 به دلیل ویسکوزیته و کشش سطحی پایین تر، نفوذ بیشتری در منسوج داشته و بنابراین سبب ایجاد مقاومت الکتریکی بالاتر نسبت به جوهر 5025 Silver Conductor می شود.

مقاومت الکتریکی پس از ایجاد سایش

از آنجاییکه هدف نهایی از تهیه پوشاک الکترونیکی، استفاده روزمره از آنها بوده و به طور حتم سطح منسوج در طول کاربرد در تماس با مواد پیرامون خود و نیز پوست انسان قرار می گیرد، بررسی فاکتور مقاومت سایشی نمونه های رسانای چاپ شده و مطالعه اثر سایش بر میزان تغییرات مقاومت الکتریکی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

ایجاد سایش مطابق شکل شماره ۴ بر اساس روش Martindale و استاندارد ISO129472:1998 صورت می گیرد.

در این روش نمونه ها به شکل دایره ای بریده شده و در جایگاه نگهدارنده نمونه قرار گرفته و سپس وزنه ۱۲ KPa بر روی سطح کاملا پشمی ساییده شده و همچنان در طول آزمایش نگهدارنده نمونه نیز حول محور عمودی خود در حال چرخش می باشد.. سایش های

شکل شماره ٤: دستگاه اندازه گیری مقاومت سایشی

مکانیکی ایجاد شده توسط این دستگاه بر روی ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ دور تنظیم شده است.

پس از ایجاد سایش، لکه های خاکستری رنگ بر روی سطح پارچه پشمی زیر نمونه مشاهده می شود که نشاندهنده انتقال لایه رسانای چاپ شده به سطح پشمی در اثر ایجاد سایش می باشد. این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی سطح چاپ و در نتیجه کاهش رسانایی می گردد.

مقدار افزایش مقاومت الکتریکی مطابق با رابطه زیر قابل محاسبه می باشد :

$$\Delta R_{sq} = \frac{R_M - R_O}{R_O}$$

R_m : مقاومت الکتریکی بدست آمده پس از عملیات سایش

R_0 : مقاومت الکتریکی بدست آمده قبل از عملیات سایش

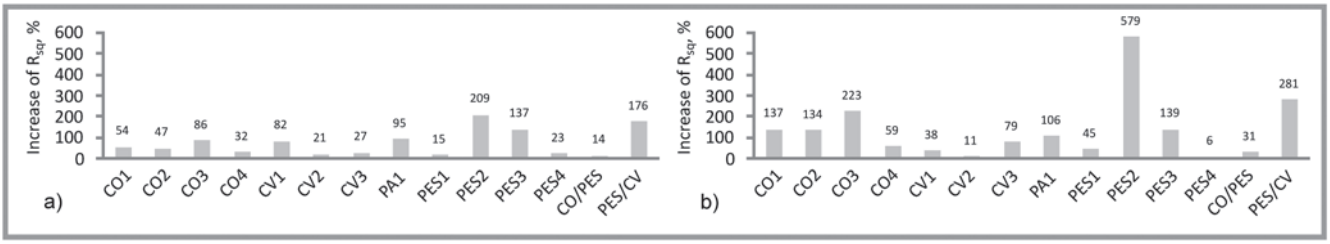
نتایج بدست آمده از اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه ها پس از ۵۰۰۰ دور سایش در شکل زیر مشخص گردیده است:

در مقایسه بین دو جوهر بکار رفته پس از انجام آزمایش سایش بر روی نمونه پارچه های چاپ شده و اندازه گیری مقاومت الکتریکی نهایی، مشخص گردید که مقاومت الکتریکی حاصله در نمونه پارچه های چاپ شده با جوهر Silver 5025 Conductor بسیار بیشتر می باشد.

این پدیده به دلیل ویسکوزیته و کشش سطحی بالاتر جوهر می باشد که سبب نفوذ کمتر آن در سطح منسوج شده و در اثر انجام عملیات سایش مقدار بیشتری عامل رسانایی از روی سطح حذف و در نتیجه مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد که PES2 بیشترین افزایش مقاومت الکتریکی را در نمونه های چاپ شده در هر دو جوهر بکار رفته نشان می دهد (٪ ۲۰۹ در مورد چاپ با جوهر Electrodag PF 410 و ٪۵۷۹ در مورد چاپ با جوهر Silver Conductor 5025). همانطور که در جدول شماره ۱ مشاهده می شود این ماده دارای ظرفیت جذب بسیار پایینی می باشد (٪۶۳/۷۳) که سبب می شود جذب جوهر توسط این منسوج به مقدار بسیار جزیی صورت گیرد. محدوده مقدار مقاومت الکتریکی بدست آمده پس از عملیات سایش در مورد چاپ جوهر Electrodag PF 410 برابر با ۰/۲۳۴- Ω/sq و ۰/۰۳۶ و این محدوده در مورد چاپ جوهر 5025 Silver Conductor برابر با ۰/۳۹۶- Ω/sq و ۰/۰۲۲ می باشد.

مقاومت الکتریکی پس از شستشو

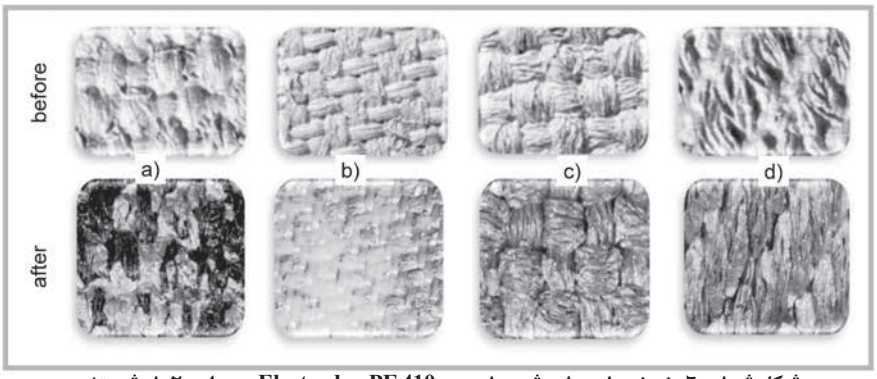
"منسوجات هوشمند" مانند ژاکت O'Neil's Nav که GPS در آن تعبیه گردیده و هم اکنون در بازار در دسترس می باشد در زمان شستشو نیاز به جداسازی تمام قطعات الحاقی داشته و این موضوع سبب سخت شدن شرایط نگهداری آن و در نتیجه نارضایتی مشتریان گردیده است. بنابراین اگر هدف نهایی از چاپ رسانایی در این سطوح بکار بردن آن به عنوان منسوج هوشمند می باشد، مقاومت شستشویی از پارامتر های بسیار مهم محسوب خواهد شد. در این تحقیق تغییرات رسانایی نمونه پارچه‌های چاپ شده توسط شستشوی خانگی، مطابق با روش استاندارد ISO6330:2000 مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این روش مطابق با برنامه شستشوی 6A که در دمای ۳°C ± ۴۰ و مناسب نمونه های چاپ شده می باشد، نمونه پارچه‌ها را ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ بار شستشو



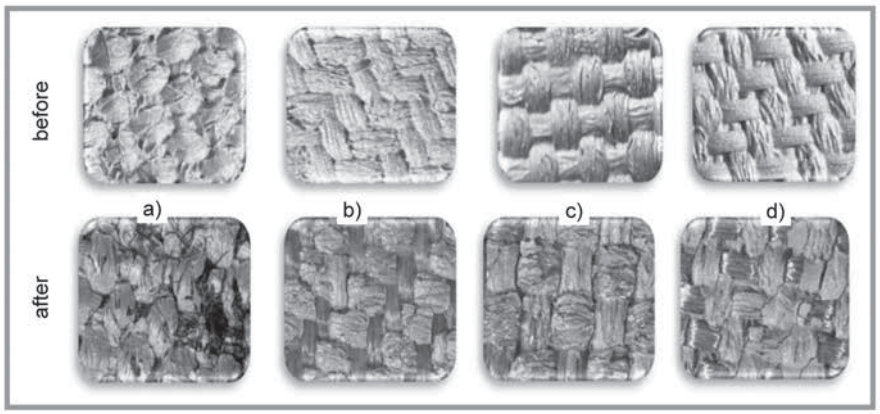
شکل شماره ۵ : مقاومت الکتریکی نمونه ها پس از ۵۰۰۰ دور سایش Electrodag PF 410 (a
5025 Silver Conductor (b

می‌دهند. پس از هر ۵ بار شستشو مقدار مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده است. پس از ۲۰ بار شستشو تقریبا نیمی از نمونه ها رسانایی خود را از دست داده و سایر نمونه ها نیز مقاومت الکتریکی بسیار بالایی را نشان می دهند. برای نمونه هایی که پس از ۲۰ بار شستشو رسانا باقی ماندند، مقدار مقاومت الکتریکی حاصله بسیار بالا بوده و در محدوده ۲۴۴ Ω/sq – ۲ می باشد.

در مورد استفاده از جوهر Electrodag PF 410 کمترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه CO/PES برابر با ۲ Ω/sq و بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه CO4 برابر با ۷۱ Ω/sq بوده در حالیکه در مورد استفاده از جوهر 5025 Silver Conductor کمترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه CO/PES برابر با ۴ Ω/sq و بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه پارچه PES4 برابر با ۲۴۴ Ω/sq می‌باشد. با توجه به اعداد و ارقام حاصله می توان نتیجه‌گیری کرد که به طور کلی مقاومت‌های الکتریکی حاصله از چاپ جوهر Electrodag PF 410 مقادیر کمتری را در مقایسه با نمونه‌های چاپ شده با جوهر 5025 Silver Conductor نشان می دهد در حالیکه قبل از عملیات



شکل شماره ٦ : نمونه های چاپ شده با جوهر Electrodag PF 410 پس از ۲۰ بار شستشو
a) CV3 b) PA1 c) PES1 d) CO/PES



شکل شماره ۷ : نمونه های چاپ شده با جوهر 5025 Silver Conductor پس از ۲۰ بار شستشو
a) CV3 b) PA1 c) PES1 d) CO/PES

جدول شماره ۳ : خصوصیات دو جوهر بکار رفته در چاپ اسکرین

جنس پارچه بکار رفته	مقاومت سطح Rsq (Ω/sq)			
	Electrodag PF 410		ink5025	
	قبل از شستشو	پس از ۲۰ بار شستشو	قبل از شستشو	پس از ۲۰ بار شستشو
CO۱	۰/۰۳۳	–	۰/۰۳۲	۲۰۳
CO۲	۰/۰۵۰	۴۰	۰/۰۴۸	–
CO۳	۰/۰۶۸	–	۰/۰۸۲	–
CO۴	۰/۰۴۴	۷۱	۰/۰۶۰	–
CV۱	۰/۰۶۱	–	۰/۰۴۴	۲۶
CV۲	۰/۰۳۰	۷	۰/۱۰۴	۳۳
CV۳	۰/۰۴۸	۳۶	۰/۰۲۰	۱۱
PA۱	۰/۰۹۵	–	۰/۰۲۴	۴۵
PES۱	۰/۱۲۹	۲۴	۰/۰۲۰	–
PES۲	۰/۰۴۸	–	۰/۰۵۸	–
PES۳	۰/۰۹۹	–	۰/۰۲۲	–
PES۴	۰/۰۳۸	۸	۰/۰۲۱	۲۴۴
CO/PES۱	۰/۰۳۴	۲	۰/۰۲۵	۴
PES/CV۲	۰/۰۵۱	۵	۰/۰۸۴	۷۸

شستشو عکس این روند مشاهده گردیده است. شکل های شماره ۶ و ۷ نشاندهنده عبور جوهر از روی سطح و نفوذ آن به درون ساختار می باشد.

اندازه گیری مقاومت الکتریکی توسط روش Van Der Pauw :

جهت جلوگیری از ایجاد هر نوع ترک بر روی سطح چاپ پس از عملیات شستشو، پیش از انجام فرایند شستشو یک لایه پلی اورتان ترموپلاستیک (TPU) از شرکت Epurex (LPT) با ضخامت mμ ۸۰) بر روی سطح چاپ پوشش داده می شود. از آنجاییکه لایه رسانا پوشش دهی شده است نمی توان از روش معمول ۴ درگاهه برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی استفاده کرد. روش جایگزین معرفی شده توسط مراجع موجود روش Van Der Pauw می باشد. در این روش ۴ نوار مسی در نقاط مرزی نمونه رسانا که می تواند در گوشه‌ها یا در جهت عمود به هم و یا در طول ۱/۳ یا ۱/۴ باشد، نسبت به هم قرار داده شوند. این نوارها توسط چسب الکتریکی به سطح متصل می گردند. از دو نقطه اتصالی کنار هم برای عبور جریان الکتریکی استفاده شده و از دو نقطه دیگر می توان مقدار ولتاژ را بدست آورد. جریان کاربردی در این پژوهش ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ mA در نظر گرفته شده است. از آنجاییکه مقاومت سطح به صورت خطی تغییر می کند میانگین اعداد بدست آمده در نظر گرفته می شود. این اندازه گیری ها در دمای اتاق صورت گرفته است. مقاومت سطح توسط روابط زیر قابل محاسبه می باشند :

$$R_{sq} = \frac{\pi \cdot V}{I \cdot \ln 2}$$

$$R_{sq} = 4.53 \cdot \frac{V}{I}$$

عدد ۴/۵۳ ضریب تصحیح می باشد.

در سری دوم آزمایشات ۸ نمونه پارچه جهت چاپ هر دو نوع جوهر مطابق شکل ۹ در نظر گرفته شده و پس از چاپ و پوشش دهی سطح با لایه TPU مقدار مقاومت الکتریکی آنها اندازه گیری شده است.

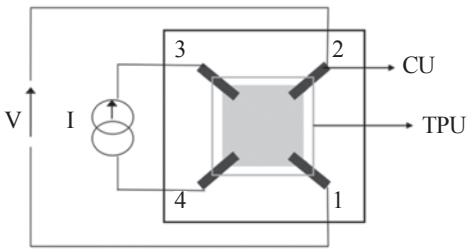
همانطور که مشاهده می شود مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌های چاپ شده توسط جوهر Electrodag PF 410 (بین ۰/۰۲۵ Ω/sq- ۰/۰۶۱) بالاتر از نمونه‌های حاصل از چاپ با جوهر 5025 Silver Conductor (بین Ω/sq ۰/۰۱۵- ۰/۰۳۰) می باشد.

مقاومت الکتریکی پس از شستشو

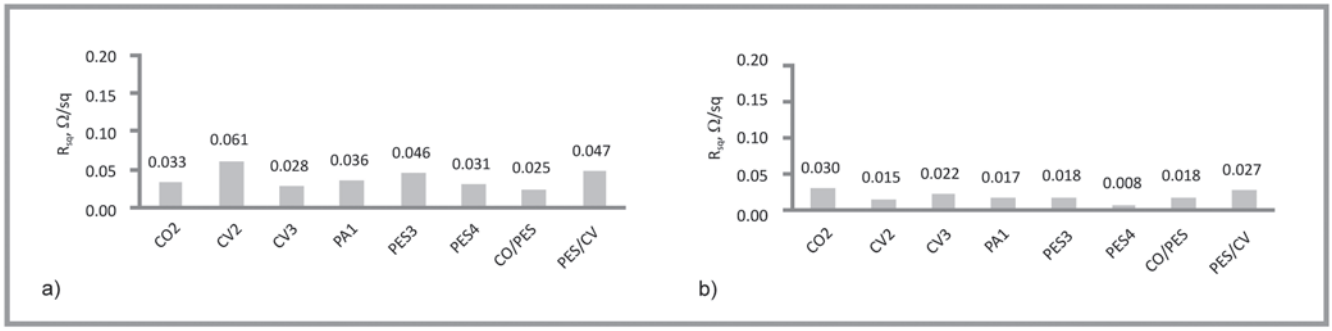
عملیات شستشو پس از پوشش دهی سطح با لایه TPU صورت گرفته و نتایج حاصله مطابق با شکل شماره ۱۰ می باشد. همانطور که مشاهده می شود پس از پوشش دهی، افزایش کمتری در مقاومت الکتریکی در اثر شستشو مشاهده می شود. همچنین مشخص شده است که پارچه های پلی استری خصوصیات الکتریکی بسیار خوبی را پس از شستشو دارا می باشند. پارامتر تاثیر گذار دیگر ضخامت پارچه ها بوده که هر چه بیشتر باشد سطح رسانای بالاتری را موجب می شود.

مرجع

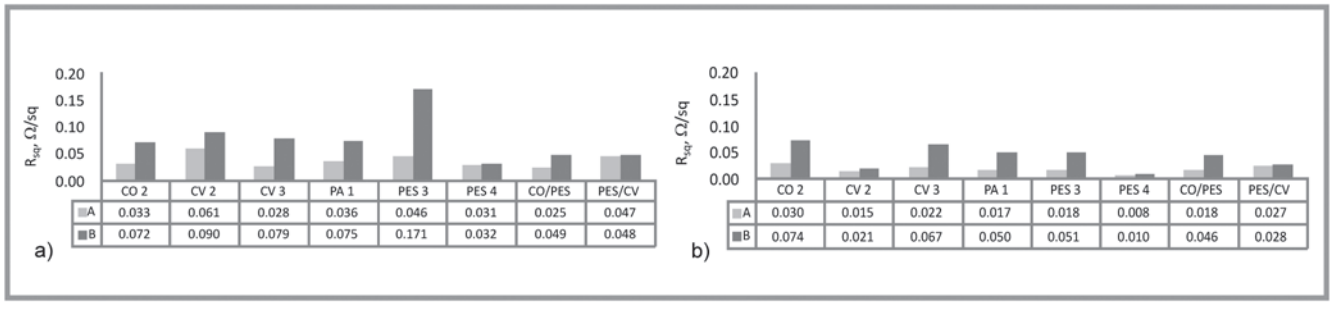
- "Electrical Conductive Textiles Obtained by Screen Printing" , Ilda Kazani, Carla Hertleer et all, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2012, 20, 1(90) 57-63.



شکل شماره ۸ : اندازه گیری مقاومت الکتریکی توسط روش Van Der Pauw



شکل شماره ۹ : مقاومت الکتریکی نمونه های چاپ شده پس از پوشش دهی توسط لایه TPU
a) Electrodag PF 410 b) 5025 Silver Conductor



شکل شماره ۱۰ : مقاومت الکتریکی نمونه های چاپ شده پس از پوشش دهی توسط لایه TPU
a) Electrodag PF 410 b) 5025 Silver Conductor A. قبل از شستشو B. پس از شستشو