

## ساخت آنتن‌های میکرواستریپ بر بستر منسوج به وسیله چاپ جوهر افشان

فاطمه محترم<sup>۱</sup>، وحید متقی طلب\*<sup>۱</sup>، غلامرضا باقرسلیمی<sup>۲</sup> و اکبر خداپرست حقی<sup>۱</sup>

۱- گروه نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

۲- گروه برق دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۲/۲۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۳۰)

**چکیده** - در سال‌های اخیر هم‌زمان با پیشرفت تکنیک چاپ مدار بر روی سطوح، امکان ساخت خطوط نواری و اجتماع آن با عناصر مداری دیگر فراهم شده است. این خطوط نواری معروف به خطوط میکرواستریپ‌اند و به این مجموعه آنتن‌های میکرواستریپ گفته می‌شود. بطور کلی آنتن‌های میکرواستریپ از سه لایه پچ رسانا، زیرلایه دی الکتریک و صفحه زمین رسانا تشکیل شده است. یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از آنتن‌های متداول، انعطاف‌ناپذیری آن‌هاست. در این پژوهش، تمامی لایه‌ها از جنس منسوج است و آنتن بدست آمده از قابلیت انعطاف‌پذیری و خمش قابل قبولی برخوردار است. برای تهیه آنتن‌ها از چاپ جوهر افشان به همراه روش لایه نشانی الکترولس جهت تهیه طرح‌های متنوع آنتنی مشتمل بر ذرات نیکل استفاده شده است. سطوح پوشش داده شده توسط میکروسکوپ الکترونی، تحلیل عنصری و میکروسکوپ نوری مشخصه‌یابی شدند. علاوه بر این ثبات شستشویی سطوح همراه با سایر خصوصیات فیزیکی - مکانیکی به روش‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل عنصری پارچه لایه نشانی شده تشکیل ذرات نیکل را به وضوح نشان می‌دهد. علاوه بر این بررسی مورفولوژیک طرح‌های آنتن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل‌گیری پوششی یکنواخت از نانو ذرات نیکل در محدوده قطری ۱۰۰-۵۰۰ نانو متر با شکل شبه‌کروی و مرزهای مشخص را نشان می‌دهد. هم‌چنین حضور تجمعی ذرات در لایه‌های متوالی با ساختار شبه کلمی موید تشکیل شکل‌گیری کریستال‌های فلزی است. نتایج بدست آمده از آزمون ثبات شستشویی نشان دهنده پایداری قابل قبول مقاومت الکتریکی طرح‌ها پس از شستشوی متوالی است. هم‌چنین بهره و پهنای باند آنتن‌های ساخته شده، با استفاده از تحلیلگر اسپکتروم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از دستگاه تحلیلگر اسپکتروم نشان داد که با افزایش اندازه پچ رسانا، پهنای باند آنتن‌های چاپی به میزان ۱ KHz نسبت به آنتن‌هایی با پچ کوچک‌تر افزایش و بهره آن به میزان ۱۱ dB- کاهش یافته است. از طرفی پهنای باند آنتن مستطیلی نسبت به آنتن مارپیچ، ۰/۲ KHz افزایش و بهره آن ۲/۵ dB- کاهش یافت. هم‌چنین نتایج کسب شده از آزمون هدایت الکتریکی نشانگر آن است که هدایت الکتریکی آنتن‌های میکرواستریپ به میزان قابل قبول ۲۶۳۲ S/cm رسیده است.

**واژگان کلیدی:** لایه‌نشانی الکترولس، آنتن میکرواستریپ، پارچه پلی استر، نانو ذرات فلزی نیکل

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: motaghtalab@guilan.ac.ir

# The Development of Textile Based Microstrip Antenna Using Inkjet Printing

Fatemeh Mohtaram<sup>1</sup>, Vahid Mottaghtalab\*<sup>1</sup>, Gholamreza Baghersalimi<sup>2</sup>, Akbar Khodaparast Haghi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Textile Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Guilan

<sup>2</sup> Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Guilan

**Abstract:** Today, along with the advances in circuit printing technology it has become possible to fabricate band lines integrated with circuit elements. The band lines are known as microstrip lines and the whole packages are called microstrip antennas. The microstrip antennas have three layers, including conductive patch layer, dielectric sub layer, and ground conductive layer. One of the most important problems of prevalent antennas is their inflexibility, which was addressed in the current paper using textile based structure with proper flexibility and flexural stiffness. This was done using ink jet printing techniques followed by electrolytic plating to provide diverse antenna patterns based on nickel particles. The coated surface was characterized by scanning electron microscope, elemental analysis and optical microscope. Moreover, the washing fastness and the other physical and mechanical specifications were measured using standard techniques. The elemental analysis of metal-coated fabric clearly indicated a high level of nickel. Furthermore, the morphological investigation proved the formation of homogenous nickel nanoparticle in a diameter range of 100-500 nm with an evident boundary and semi-spherical shape. In addition, the cumulative presence of particles in a sequence followed a cabbage-like structure originating from metallic crystals. The washing fastness tests revealed a high stability in electrical resistance after several washing steps. In the meantime, the antenna gain and the corresponding bandwidth were measured using spectrum analyzer. The results indicated a 1 kHz increase in bandwidth and 11 dB decrease in antenna gain for a large size compared to a small one. Meanwhile, the bandwidth of rectangular pattern showed a 0.2 kHz increase and 2.5 kHz decrease compared to spiral pattern. Finally, the four-probe electrical conductivity test demonstrated a high level of conductivity around 2632 S/cm.

**Keywords:** Electrolytic plating, Inkjet printing, Microstrip antenna, Polyester fabric, Nickel nanoparticle.

## ۱- مقدمه

پاسخ‌گوی بسیاری از نیازهای انسان امروز شوند. منسوجات الکترونیک در آینده نه چندان دور قادر خواهند بود که با اتکا به یک سیستم یکپارچه و توسعه یافته امکان بسیار بهتری را برای انسان برای داشتن زندگی سالم، ایمن و راحت میسر سازد. یکی از ملزومات اساسی منسوجات الکترونیک، سامانه‌های ارتباطی است. این سامانه‌ها برای برقراری ارتباط بین اجزاء منسوج و یا انتقال داده‌های به دست آمده از منسوج، به گیرنده‌ی خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور معمول در شبکه‌های ارتباطی داخل منسوج الکترونیک، از الیاف نوری و یا نخ‌های رسانا استفاده می‌شود. برقراری ارتباط منسوج الکترونیک با محیط خارج به وسیله‌ی سامانه‌های بی سیم مانند مادون قرمز و بلوتوث امکان‌پذیر است. هم‌چنین می‌توان اطلاعات را از طریق آنتن به گیرنده ارسال کرد.

در دهه اخیر پیشرفت‌های شگرف در زمینه‌ی تکنولوژی نساجی به همراه رشد روز افزون صنعت کامپیوتر و الکترونیک، فناوری نوینی را به جهان با عنوان منسوجات الکترونیک معرفی نموده است. طراحان و سازندگان، با اضافه کردن سیم‌ها، مدارها، الیاف نوری به پوشاک متداول، لباس‌هایی را خلق کرده‌اند که در برابر عوامل محیطی از خود عکس‌العمل نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها سبب شده است تا امروزه پوشش فقط به عنوان یک محافظ در برابر شرایط محیطی و آب و هوایی و هم‌چنین داشتن ظاهر زیبا مطرح نباشد، بلکه برای دریافت، پردازش، ذخیره و انتقال اطلاعات نیز مورد استفاده قرار گیرد. به همین خاطر اگر پوشاک با توجه به نزدیکی آن‌ها به انسان در زندگی روزمره، به قابلیت‌های خاص الکترونیکی مجهز شوند، می‌توانند

آنتن‌ها ساختارهایی اند که برای تشعشع کردن موثر انرژی الکترومغناطیسی به شکلی از پیش تعیین شده طراحی می‌شوند. بدون یک آنتن کارآمد، انرژی الکترومغناطیسی در یک محل جمع و انتقال بی سیم اطلاعات به فواصل دور غیر ممکن می‌شود. آنتن می‌تواند یک سیم مستقیم تنها با یک حلقه هادی باشد که توسط یک منبع ولتاژ تحریک می‌شود، یا سوراخی در انتهای یک موج‌بر و یا آرایه پیچیده‌ای از این عناصر تشعشعی که به صورت مناسبی ترتیب یافته، باشد. به خاطر نیاز به ارسال اطلاعات به وسیله امواج الکترومغناطیسی، تلاش‌های زیادی بر روی آنتن‌ها انجام گرفته، پیشرفت‌های قابل توجهی حاصل شده است. به طوری که امروزه ما شاهد انواع مختلف آنتن هستیم که به اشکال مختلف و در ابعاد متنوع ساخته شده‌اند. یک نمونه از این تشعشع کننده‌ها آنتن‌های میکرواستریپ اند [۱].

اولین بار ایده آنتن میکرواستریپ در سال ۱۹۳۵ مطرح شد [۲] و در این دهه به خاطر مشکلات موجود در تکنولوژی ساخت دی‌الکتریک‌ها، این آنتن‌ها چندان مورد توجه قرار نگرفتند. پس از رشد تکنولوژی، دی‌الکتریک‌ها با تلفات کم و ضریب نسبی دی‌الکتریک متفاوت، با خواص گرمایی و مکانیکی مناسب ساخته شد. از سال ۱۹۷۰ تلاش برای ساخت این آنتن‌ها افزایش یافت و در نتیجه اولین آنتن عملی میکرواستریپ توسط مانسان و همکارانش [۳] ساخته شد. این آنتن نه تنها در کاربردهای نظامی مثل فضاپیماها و راکت‌ها، بلکه در کاربردهای تجاری مثل مخابرات ماهواره ای سیار، کنترل از راه دور استفاده شد [۴]. از معایب اصلی آنتن‌های میکرواستریپ می‌توان به بازدهی کم، توان پایین و پهنای باند فرکانسی کم اشاره کرد [۵ و ۶]. در این خصوص راه‌های متنوعی برای ساخت آنتن‌های میکرو استریپ بر بستر منسوج معرفی شده است که تمامی آنها مبتنی بر روش‌هایی مانند بافندگی، دوزندگی و گلدوزی است. در بیش‌تر کارهای انجام شده در این حوزه، از قطعات فلزی به عنوان پچ رسانا و از منسوج بعنوان زیرلایه استفاده شده است. یکی از اساسی‌ترین مشکلات این نوع آنتن‌ها، به کار بردن صفحه‌های فلزی [۷ و ۸]

یا دوختن سیم‌های رسانا بر روی منسوج است [۹ و ۱۰] که اثر مستقیم آن کاهش کیفیت زیر دست پارچه است. به همین دلیل استفاده از فناوری جوهرافشان به دلیل برخورداری از ویژگی‌های بارزی چون سرعت مطلوب، داشتن حداقل ضایعات و انعطاف‌پذیری قابل قبول به عنوان گزینه مطلوب در این خصوص مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه چاپ جوهرافشان سوسپانسیون‌های نانوذرات آلی یا فلزی بر روی سطوح انعطاف پذیر صورت گرفته است [۱۱-۱۴]. کیم و همکاران [۱۵] موفق به چاپ خطوط هادی بر روی یک سطح انعطاف پذیر شدند. آن‌ها با استفاده از نانو ذرات نقره در محدوده قطر حدود ۲۰ نانومتر، توانستند بطور مستقیم چاپ مدار فلزی را بر روی سطوح پلیمری نظیر پلی‌ایمید، پلی‌اتیلن نفتالات و پلی‌اتیلن ترفتالات برای کاربرد در صنعت الکترونیک به انجام رسانند. طرح به دست آمده با دقت مناسب به طرحی بسیار ظریف، صاف و هادی بر روی سطح پلیمر مبدل شد تا جایی که پس از عملیات حرارتی کیفیت بالاتری نیز به خاطر ظاهر و هم‌چنین هدایت الکتریکی حاصل شد. در پژوهش دیگری چاپ جوهرافشان برای ایجاد طرح هادی پلی‌اتیلن دی-اکسی تیوفن - پلی‌استیرن سولفونات بر روی سطح منسوج پلی‌اتیلن ترفتالات استفاده شده است [۱۲]. مگ‌داسی و همکارانش [۱۶] توانستند با استفاده از فناوری جوهرافشان، نیترات نقره ای حل شده در مخلوطی از آب و دی‌متیل سولفوکسید را روی بستری از پلی‌آمید در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد کنند. بر این اساس، ردیف‌های چاپ شده از طریق جوهرافشان در مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب ایجاد نانوذرات نقره شد.

چاپ جوهر افشان علیرغم تمام مزایای غیر قابل انکار در آماده سازی طرح‌های هادی بر روی سطوح انعطاف پذیر، برای ایجاد 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 است که از لحاظ عملی با توجه به مشکل‌های مربوط به حرکت بستر در هنگام چاپ نمی‌توان به طرحی یکنواخت در سطح و عمق امیدوار بود. علاوه بر این گرفتگی نازل‌های چاپ نیز مشکل بسیار مهمی در این رابطه است که در عمل، فرایند چاپ طرح‌های هادی را دچار چالش‌های جدی می‌نماید. لایه نشانی الکترولس راهی برای پوشش دهی طرح‌های ظریف فعال شده بر روی بستر انعطاف پذیر خواهد بود.

لایه‌نشانی الکترولس روش متداول شیمیایی برای پوشش سطوح با لایه‌ای از فلز با استفاده از محلول آبی فلز و بدون استفاده از منبع جریان الکتریکی خارجی است. در این روش یون فلز در محلول آبی در حضور ماده‌ی احیاء کننده به صورت شیمیایی احیاء و فلز در مواضع فعال شده لایه‌نشانی می‌شود. مهم‌ترین مزیت روش لایه‌نشانی الکترولس، امکان پوشش سطوح مواد نارسانا با فلزات و یا آلیاژهای فلزی است. در لایه‌نشانی الکترولس امکان پوشش سطوح با هر شکلی وجود دارد. در این روش تمامی خلل و فرج بستر به صورت یکنواخت با فلز پوشش داده می‌شود، به طوری که ضخامت لایه فلز در تمامی سطح پوشش داده شده اعم از برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها تقریباً یکسان است. تراکم فلز پوشاننده شده در روش لایه‌نشانی احیایی از دیگر روش‌ها بیشتر است، هم‌چنین در لایه‌نشانی به روش الکترولس امکان پوشش بخشی از سطح به صورت انتخابی وجود دارد زیرا فلز تنها در مواضعی از سطح که از نظر شیمیایی فعال شده است، پوشش داده می‌شود. در روش لایه‌نشانی الکترولس می‌توان تمامی فلزات را لایه‌نشانی نمود ولی به دلیل اکسیداسیون سریع ماده احیاءکننده و در نتیجه پایین بودن مدت زمان پایداری حمام لایه‌نشانی از فلزات سی‌سی برای لایه‌نشانی استفاده می‌شود که از سرعت احیاء شونده‌گی بالایی برخوردار باشند [۱۶].

در پژوهش حاضر با رویکردی نوین از چاپگر

جوهرافشان برای فعال سازی سطح پارچه پلی استر به عنوان یک زیر لایه انعطاف پذیر و هم‌چنین از حمام الکترولس به دلیل دمای کم حمام لایه نشانی (کمتر از  $100^{\circ}\text{C}$ ) استفاده می‌شود [۱۷]. در این روش، محلول آبی نمک فلزی (فلز پالادیوم) به عنوان جوهر چاپ بر روی سطح پارچه جوهرافشانی می‌شود که پس از ورود به حمام لایه نشانی نانو ذرات فلز نیکل منجر به ایجاد شیمیایی نانو ذرات فلزی هادی جریان الکتروسیسته بر روی زمینه پارچه مورد نظر می‌شود. طرح‌های متنوع از آنتن‌ها با اندازه‌های مختلف بر بستر منسوج برای تعیین پهنای باند و بهره آنتنی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

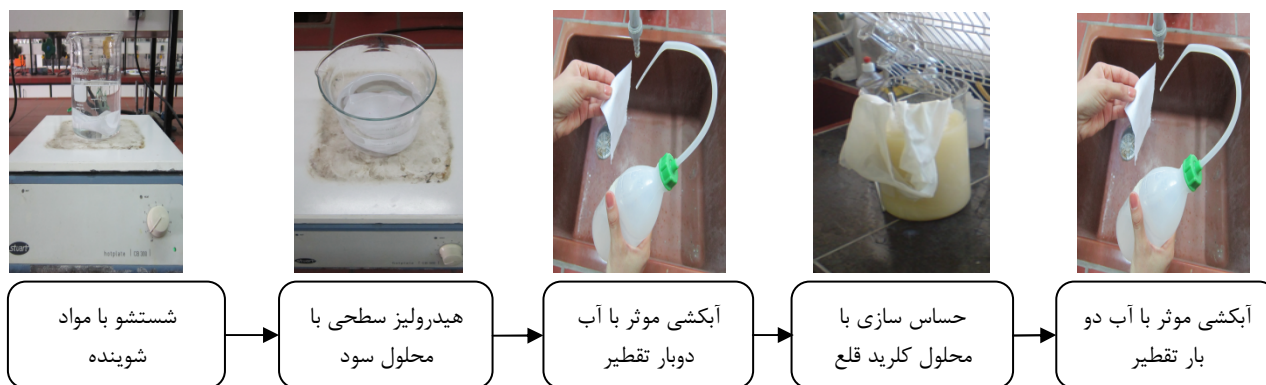
## ۲- روش پژوهش

### ۲-۱- مواد مورد استفاده

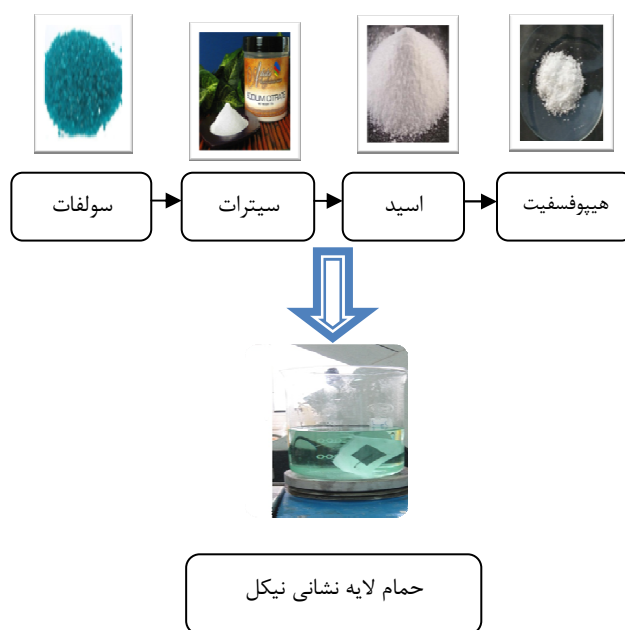
پارچه پلی استر با تراکم  $(30 \times 32)$  - نمره نخ تار و پود  $8/8$  دنیر) با بافت تافته به عنوان زمینه انتخاب شد. مواد شیمیایی بکار رفته شامل سود، کلرید قلع، اسید کلریدریک، کلرید پالادیوم، سولفات نیکل، هیپوفسفیته سدیم، اسید بوریک، سترات سدیم، آب اکسیژنه، کلرید آمونیوم و اتانول است که همگی از کمپانی مرک خریداری شدند و بدون پالایش شیمیایی یا فیزیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۲-۲- تهیه طرح‌های رسانا

برای آماده سازی سطح هیدروفوب پارچه پلی استر از محلول سود ۱۵ گرم بر لیتر در دمای  $70^{\circ}$  درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه استفاده شد. سپس فرایند حساس سازی توسط محلول  $10^{\circ}$  گرم بر لیتر کلرید قلع و  $20$  میلی لیتر اسید کلریدریک در دمای محیط به مدت ۵-۱۰ دقیقه انجام شد و پارچه در دمای  $70^{\circ}$  درجه سانتی گراد برای انجام چاپ جوهر افشان خشک گردید. چاپ جوهر افشان توسط پریتر اچ- پی  $1280$  مجهز به کارتريج مشکی اچ- پی  $45$  و کارتريج رنگی اچ- پی  $48$  انجام شد. شکل (۱) مراحل آماده سازی پارچه برای چاپ جوهر



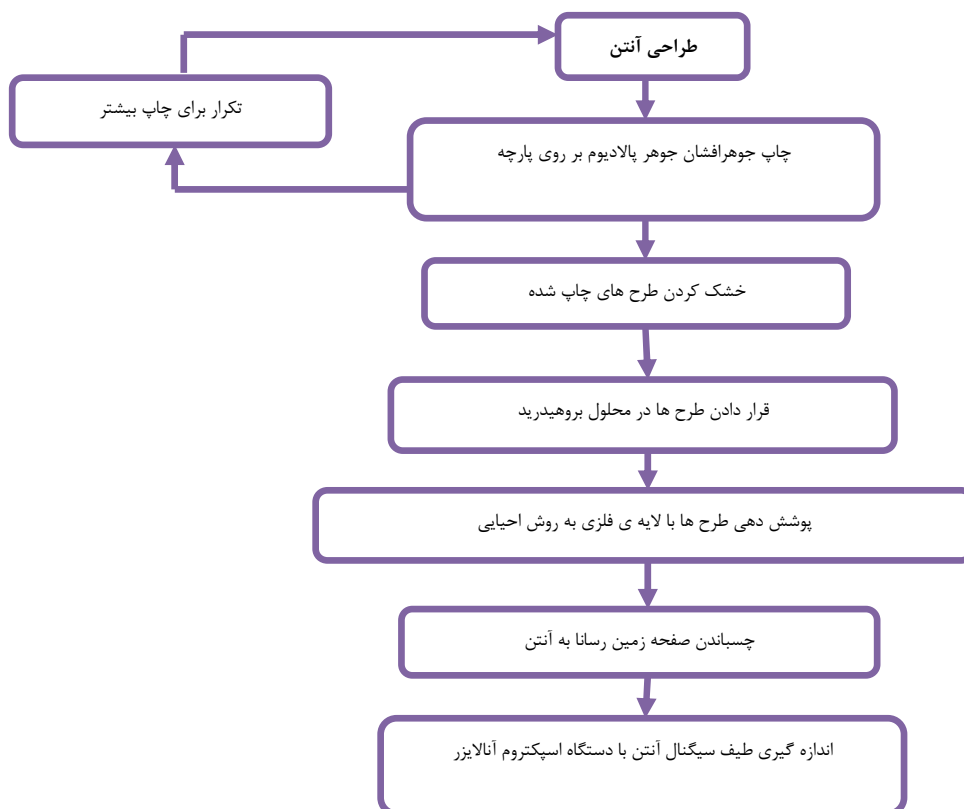
شکل ۱- مراحل آماده سازی پارچه جهت چاپ جوهر افشان



شکل ۲- مشخصات و شرایط حمام لایه نشانی

اتانول و آب شسته شده بود، ریخته شد. پس از چاپ نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در آن تثبیت شدند و سپس برای تبدیل یون‌های پالادیوم به فلز پالادیوم نمونه‌ها در محلول ۰/۱ مولار بوروهیدرات سدیم به مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند. آب کشی موثر بعد از این مرحله انجام شد و پس از آن نمونه‌ها وارد حمام لایه نشانی نیکل (حاوی ۱/۵ گرم سولفات نیکل، ۳ گرم سیترات سدیم، ۴/۵ گرم اسید بوریک و ۴/۵ گرم هیپوفسفیت سدیم) شدند. لایه نشانی به مدت دو ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و اسیدیته ۸/۵ انجام و در انتها

افشان را نشان می‌دهد. سپس ۰/۰۴ گرم کلرید پالادیوم و ۰/۰۴ گرم کلرید آمونیوم در ۲۳/۷ گرم آب دو بار تقطیر به مدت ۱ ساعت توسط هم‌زن با ۳۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. مقدار ۰/۱۵ میلی لیتر از محلول زرد حاصل به همراه ۳ قطره آب اکسیژنه به ۱/۲۵ گرم از اتانول 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 سانتی‌گراد به مدت ۴ ماه پایدار است. جوهر پالادیوم آماده شده داخل کارت‌ریج مشکی که کاملاً با محلول



شکل ۳- نمودار گردش مراحل تهیه آنتن نساجی

### ۳-۲- روش های 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  $1 \pm 21$  سانتی گراد 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 آن ها تغییر کرده بود با استفاده از مقاومت سنج چهار کاناله ی خطی و طبق استاندارد F390:2003 بررسی شد. در ارزیابی میزان مقاومت الکتریکی سطحی شدت جریان الکتریکی ثابت توسط منبع تغذیه به نمونه اعمال و تغییرات ولتاژ توسط مولتی متر اندازه گیری شد. در نهایت مقدار متوسط مقاومت الکتریکی سطحی نمونه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$R_s = \frac{V \times w}{I \times l} \quad (1)$$

نمونه ها در دمای ۷۰ سانتی گراد خشک شدند. شکل (۲) مقادیر و شرایط حمام لایه نشانی نیکل را نشان می دهد.

### ۳-۲- تهیه آنتن میکرو استریپ

پس از انتخاب بهترین نمونه از نظر رسانایی ثبات ها و خواص مکانیکی و فیزیکی به آماده سازی طرح آنتن منسوج که هدف اصلی این مقاله است، پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا به طراحی اشکال مختلف پیچ پرداخته، پس از آن چاپ جوهر پالادیوم در شرایط بهینه انجام شد. بعد از خشک شدن نمونه ها و لایه نشانی نیکل بر روی آنها پیچ ها آماده شدند. سپس پارچه لایه نشانی شده نیکل را به عنوان صفحه زمین به پیچ رسانا با استفاده از لایه چسباننده شد و بدین ترتیب آنتن میکرواستریپ آماده گردید. شکل (۳) نمودار گردش مراحل تهیه آنتن نساجی را نشان می دهد.

در این رابطه  $V$  ولتاژ،  $w$  عرض نمونه،  $I$  متوسط شدت جریان عبوری و  $l$  طول فاصله الکترودها هستند. برای بررسی میکروسکوپی سطح نمونه‌ها پس از لایه‌نشانی توسط نانو ذرات فلزی، از نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی تصویر برداری شد. از پارچه‌های لایه نشانی شده با نانو ذرات نیکل توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی JXA-840 تصویر برداری و با تحلیلگر عنصری ترکیب پوشش روی سطح بررسی شد. با توجه به کاربردهای متنوع منسوج رسانی، تعیین ثبات لایه تشکیل شده روی پارچه ضروری است. بنابراین بعد از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌های مختلف، بر روی آن‌ها ثابت شستشویی انجام و دوباره مقاومت الکتریکی سطحی اندازه‌گیری شد. تعیین ثابت شستشویی طبق استاندارد ISO 105-C06:1994 انجام گرفت. آزمایش ارزیابی این ثابت پنج بار تکرار و پس از هر بار انجام آزمایش، میزان مقاومت الکتریکی سطحی اندازه‌گیری و محاسبه شد. هم‌چنین برای بررسی سطح نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری نور پلاریزه شده (Blackl.33C) استفاده شد. میزان مقاومت خمشی، لطافت، زبری و شقی یا لختی نمونه لایه‌نشانی شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین برای اندازه‌گیری بهره آنتن‌های چاپی از تحلیلگر اسپکتروم مدل Physio-control- Lifepeak استفاده شد.

### ۳- بحث و نتایج

شکل (۴) تصویر میکروسکوپ نوری از روی سطح پارچه قبل و بعد از شستشو با ماده شوینده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل تاثیر شستشو بوضوح قابل رویت و نشان دهنده زدوده شدن چربی‌ها و یا گردو غبار احتمالی بر روی سطح پارچه همراه با افزایش براقیت است. این مرحله در فرایند فعال سازی بسیار موثر است و موانع عملیاتی تشکیل لایه یکنواخت و با ثبات فلزی را بر روی پارچه فراهم می‌نماید.

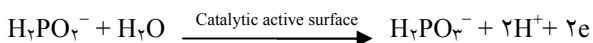
پارچه پس از شستشوی مقدماتی، برای ایجاد مکان‌های لازم برای لایه نشانی موثر بصورت غوطه‌وری در تماس با سود قرار می‌گیرد و سپس فرایند حساس سازی منسوج با کلرید قلع

انجام می‌شود. شکل (۵) سطح منسوج را پس از عمل‌آوری 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 به طرز بسیار ملایمی انجام شده است. مرحله حساس سازی با کلرید قلع از نظر ظاهری تاثیری بر روی سطح پس از عمل‌آوری با سود ندارد و نقش آن آماده‌سازی سطح برای فعال سازی توسط کلرید پالادیوم است. پژوهشات نشان داده است که غلظت حساس کننده کلرید قلع در میزان غلظت موثر لازم برای ماده فعال کننده پالادیوم بسیار موثر خواهد بود [۱۸].

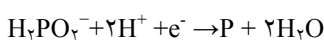
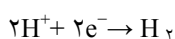
بعد از حساس سازی پارچه و آماده سازی چوهر پالادیوم و چاپ مدارهای الکترونیکی پارچه وارد حمام الکترولس می‌شود. کیفیت چاپ و مرزهای طرح هادی نیکل بر روی پارچه پلی‌استر به خوبی در تصویر میکروسکوپ نوری زیر مشخص است (شکل (۶)) و نشان دهنده دقت قابل قبول و عدم پخش‌شدگی آن در مقایسه با طرح‌هایی است که به دلایل متنوعی نظیر مناسب نبودن ویسکوزیته چوهر پالادیوم به فرم پخش شده ظاهر می‌شود.

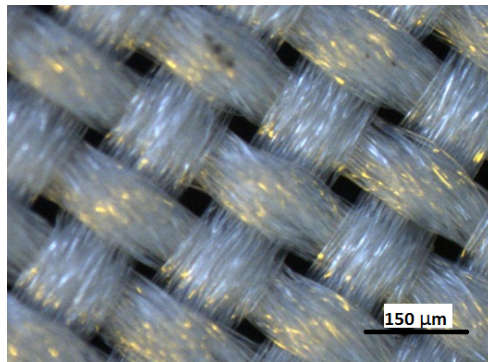
### ۳-۱- واکنش‌های انجام شده در حمام لایه نشانی نیکل

واکنش‌ها بر روی سطح بصورت کاتالستی با دریافت انرژی گرمایی در دماهای بین ۷۰ تا ۹۵ درجه سانتی‌گراد فعال می‌شوند. علاوه بر نیکل فلزی (M)، مقداری هیدروژن مولکولی نیز تشکیل می‌شود. سپس نصف هیپوفسیت تجزیه شده تا گاز هیدروژن آزاد کند. واکنش آندی:

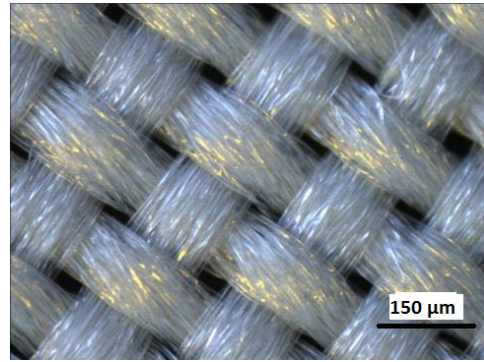


واکنش‌های کاتدی:



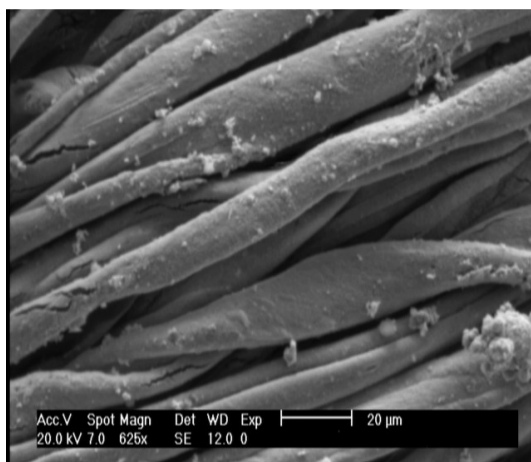


(الف)

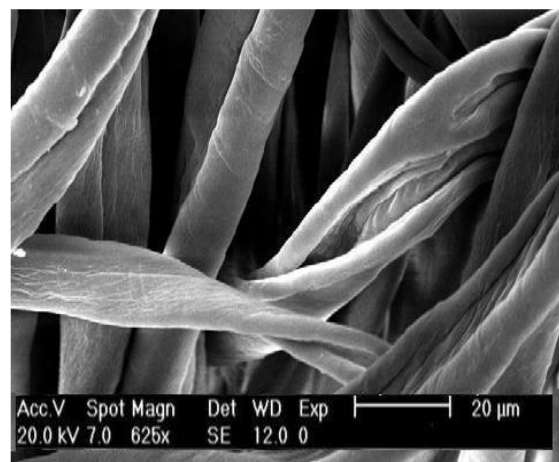


(ب)

شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری (الف) پارچه پلی استر سفید خام و (ب) پارچه شستشو شده با ماده شوینده



(ب)

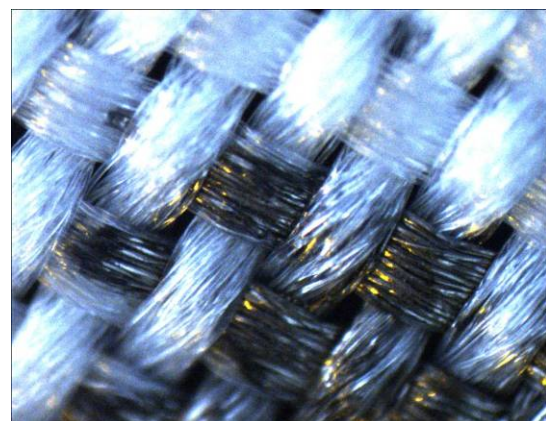


(الف)

شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی پارچه (الف) پارچه خام و (ب) عمل آوری شده با سود



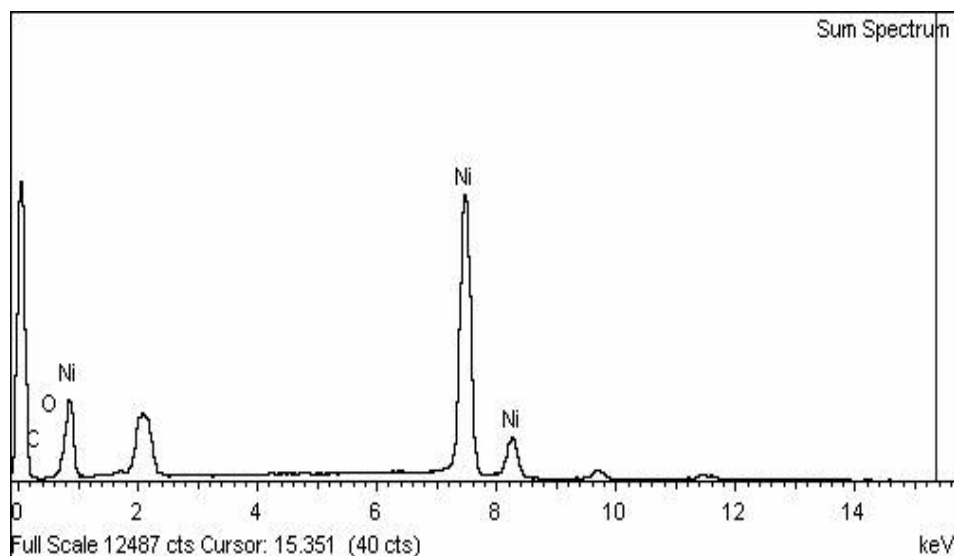
(ب)



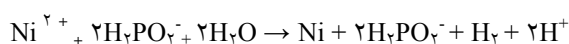
(الف)

شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری از مرزهای چاپ (الف) همراه با پخش شدگی و (ب) بدون پخش شدگی





شکل ۷- نمودار تحلیل عنصری روی سطح پارچه لایه‌نشانی شده با نانوذرات نیکل

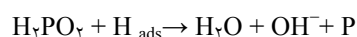
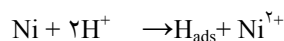


برای بررسی بازدهی لایه‌نشانی و میزان لایه تشکیل شده بر روی سطح، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها توسط دستگاه مقاومت‌سنج چهار کاناله خطی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که در اسیدیته برابر ۵ و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد پس از گذشت مدت زمان لایه‌نشانی ۱۲۰ دقیقه، موثرترین لایه‌نشانی روی سطح پارچه با توجه به بالاتر بودن میزان هدایت الکتریکی، انجام شده است. آزمون مقدماتی بر روی پارچه لایه‌نشانی شده توسط تحلیل عنصری حضور ذرات نیکل را به وضوح نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است عنصر نیکل در مقایسه با عناصر دیگر بالاترین درصد را به خود اختصاص داده است.

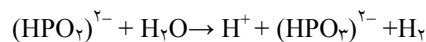
برای بررسی تغییرات به وجود آمده در سطح نمونه‌ها پس از لایه‌نشانی، از سطح نمونه‌های تهیه شده تصویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شد، که در شکل زیر نشان داده شده است. شکل (۸-الف) و (۸-ب) تصاویر سطح نمونه را قبل و بعد از لایه‌نشانی نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، سطح یاف پس از لایه‌نشانی، به‌طور کامل و یکنواخت با

### ۱-۱-۳- مکانیسم اتم هیدروژن

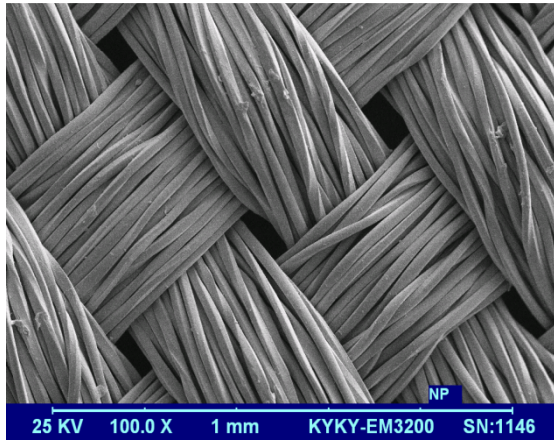
از هیدروژن‌زدایی کاتالیستی مولکول هیپوفسفیت جذب شده در سطح، اتم هیدروژن آزاد می‌شود.



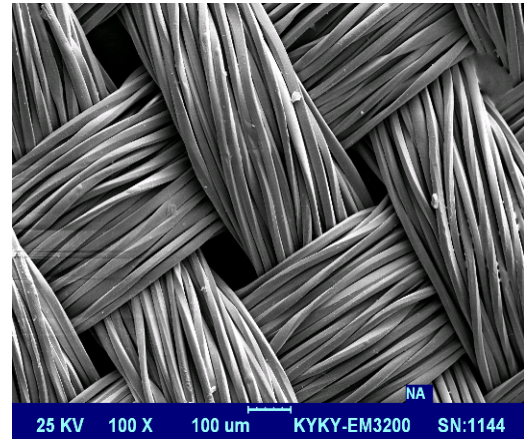
هیدروژن فعال جذب شده، نیکل را در سطح کاتالیست احیاء می‌کند.



هم‌زمان تعدادی از هیدروژن‌های جذب شده، مقدار کمی از هیپوفسفیت را در سطح کاتالیستی می‌کاهند و با اکسید شدن، اُرتوفسفیت و گاز هیدروژن تولید می‌کنند که پایین آمدن بازده محلول الکترولسی نیکل برای پوشش‌های آلیاژی را به دنبال دارد. این در حالی است که لایه‌نشانی نیکل و فسفر ادامه دارد. واکنش تشکیل نیکل در سطح پارچه تحت شرایط اسیدی حمام لایه‌نشانی به صورت زیر است:



(ب)



(الف)

شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی پارچه‌ی پلی استری: الف) متراکم خام و ب) متراکم لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل

مقاومت الکتریکی به نمایش در آمده است.

### ۳-۳- سختی خمشی و چروک‌پذیری پارچه‌های لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل

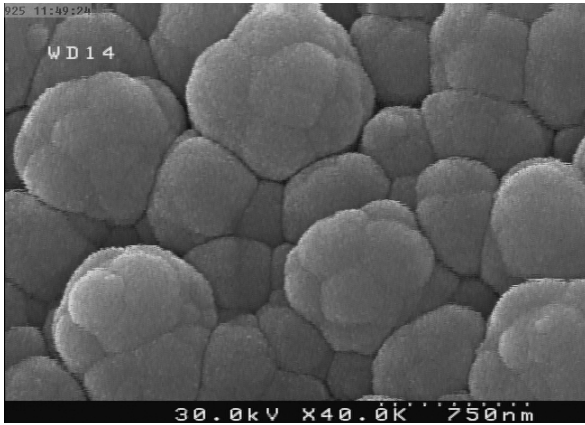
با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۱) پس از لایه‌نشانی، سختی خمشی نمونه افزایش یافته است. با توجه به این‌که اصطکاک سطحی بین نخ‌ها و الیاف بر حرکت نسبی آن‌ها در پارچه موثر است و افزایش اصطکاک باعث کاهش حرکت نسبی نخ‌ها و الیاف می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که پس از لایه‌نشانی وجود ذرات نیکل در سطح پارچه موجب افزایش اصطکاک بین نخ‌ها و الیاف می‌شود و در نتیجه سختی خمشی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، سختی خمشی با توان سوم ضخامت رابطه مستقیم دارد، بنابراین افزایش ضخامت نمونه پس از لایه‌نشانی نیز در افزایش سختی خمشی موثر است. سختی خمشی نشان‌دهنده رفتار انعطافی و یکی از عوامل مهم در ارزیابی زیردست پارچه است. بنابراین پس از لایه‌نشانی زیردست پارچه سخت‌تر می‌شود.

زاویه‌ی بازگشت از چروک پس از لایه‌نشانی (حدود ۳۰٪) کاهش یافته است. وجود ذرات فلزی بین الیاف پس از لایه‌نشانی، اصطکاک بین نخ‌ها و الیاف را افزایش می‌دهد. وقتی پارچه لایه‌نشانی شده تحت نیرویی قرار می‌گیرد، چروکیدگی

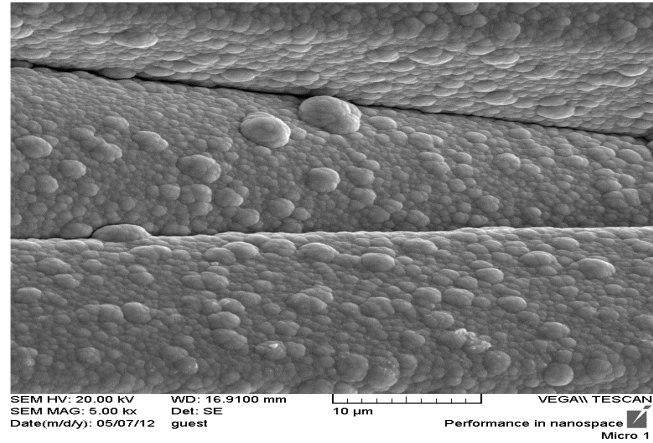
لایه‌ای از فلز پوشیده شده است، به طوری که ساختار میکروسکوپی الیاف پلی استری بعد از لایه‌نشانی بطور کامل تغییر کرده است. شکل (۹) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح طرح هادی چاپ شده بر روی منسوج را در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. بررسی مورفولوژی سطح نشان دهنده شکل‌گیری پوشش یکنواخت سطح الیاف با ذرات نیکل است که این پوشش از به هم پیوستگی ذرات در مقیاس نانو با مرزهای قابل تشخیص بوجود آمده است. تصویر (۹-ب) ادعای نانو بودن ذرات تشکیل شده را به اثبات می‌رساند که اندازه ذرات مجتمع شده در محدوده ۱۰۰-۵۰۰ نانومتر قابل تشخیص است. شکل ذرات شبه کره‌ای است که به واسطه توده‌ای بودن فرایند ذرات بصورت لایه‌های متوالی بر روی یکدیگر مجتمع می‌شود.

### ۳-۲- بررسی ثبات شستشویی طرح‌های هادی

بعد از انتخاب بهترین نمونه از نظر رسانایی در آزمایش‌های اولیه، در این قسمت به بررسی ثبات شستشویی نمونه لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل پرداخته می‌شود. نتایج بدست آمده نشان دهنده این است که وقتی هدایت الکتریکی نمونه بالاتر است، ثبات شستشویی مطلوب‌تری حاصل می‌شود. در دفعات آخر شستشو همان‌طور که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود تغییری در مقاومت الکتریکی حاصل نمی‌شود و پایداری قابل قبولی در میزان

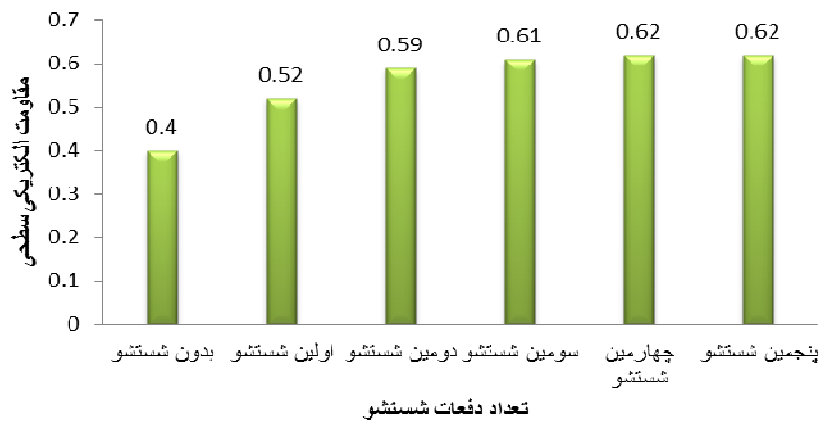


(ب)



(الف)

شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی پارچه لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل در دو بزرگ‌نمایی مختلف



شکل ۱۰- مقاومت الکتریکی سطحی پارچه لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل قبل و بعد از شستشو.

جدول ۱- ارزیابی سختی خمش و بازگشت از چروک پارچه لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل

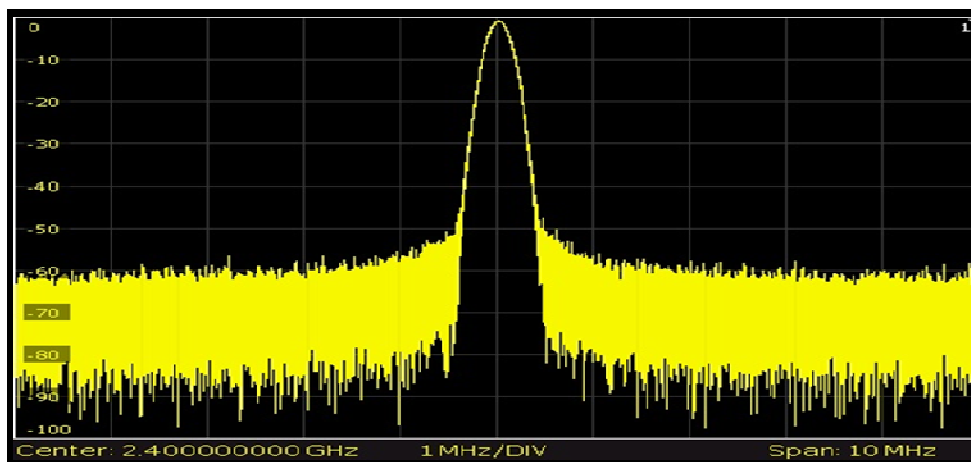
|  | سختی خمشی ( $\mu\text{N. m}$ ) | زاویه‌ی بازگشت از چروک (درجه) |
|--|--------------------------------|-------------------------------|
| پارچه خام                              | ۲۲/۲۵                          | ۴۶°                           |
| پارچه لایه‌نشانی شده با نانو ذرات نیکل | ۲۶/۷۱ (↑ ۱۲/۰۴٪)               | ۳۰° (↓ ۳۴/۷۸٪)                |

### ۳-۴- بررسی مشخصات آنتن میکرو استریپ

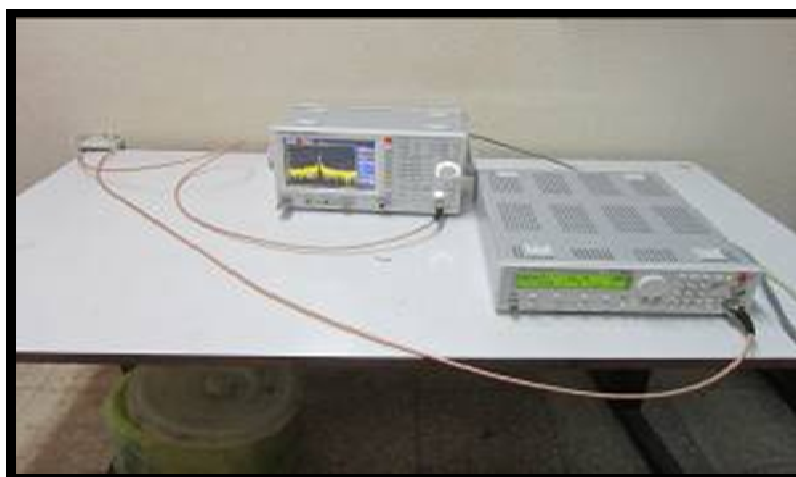
#### ۳-۴-۱- اندازه‌گیری تلفات نسبی آنتن

برای مقایسه کارایی آنتن‌های چاپ شده مختلف، تلفات نسبی آنتن‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری تلفات نسبی و بهره، آنتن باید با یک آنتن استاندارد مقایسه شود. بدین منظور برای

در آن ایجاد و سپس نیرو حذف می‌شود، به دلیل افزایش اصطکاک در لایه لای الیاف، دیگر آن‌ها نمی‌توانند چندان به موضع قبلی خود برگردند، پس چروک پذیری پارچه بعد از لایه‌نشانی با نانو ذرات فلزی نیکل افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- طیف سیگنال آنتن استاندارد بدست آمده از دستگاه تحلیلگر اسپکتروم



شکل ۱۲- نحوه اندازه‌گیری آنتن با دستگاه تحلیلگر اسپکتروم

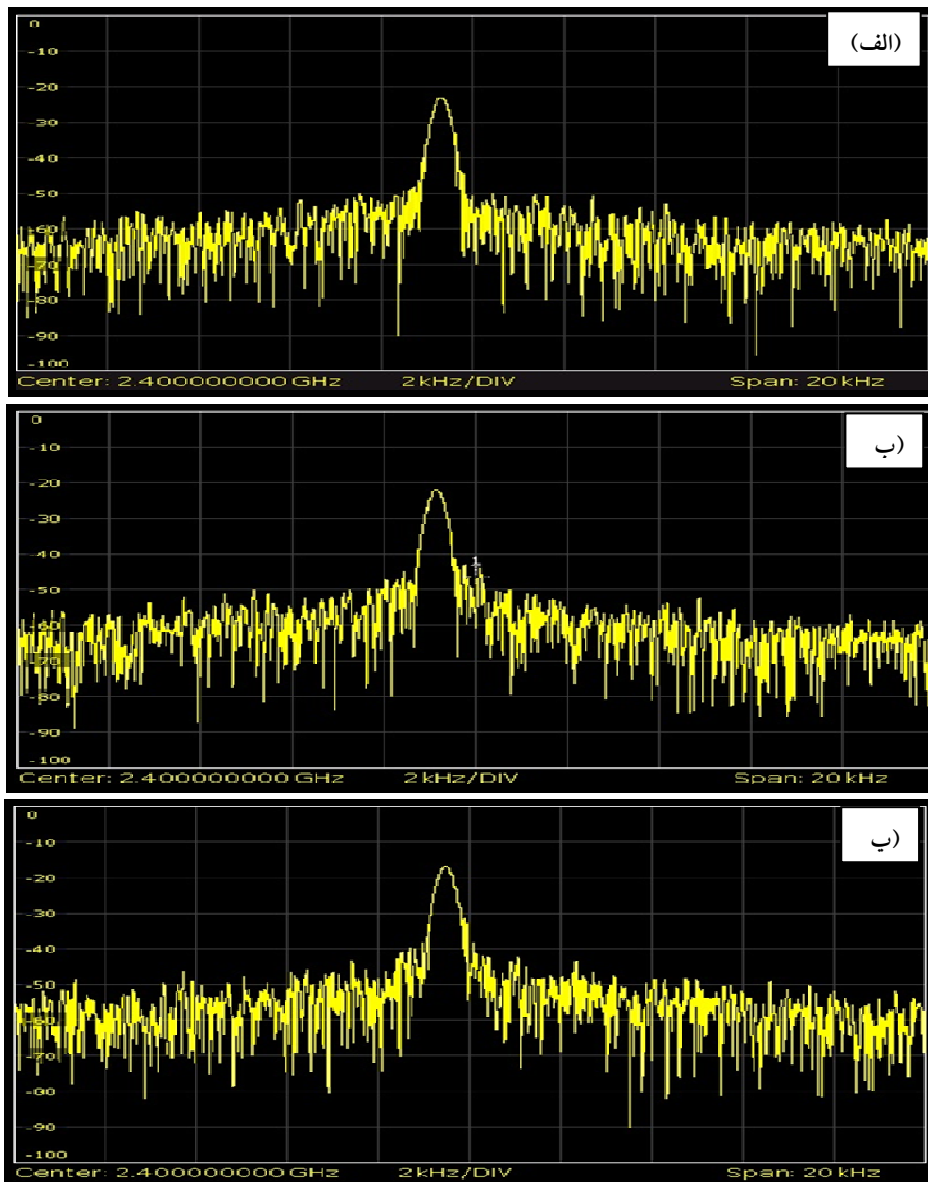
۳-۴-۲- بررسی تاثیر اندازه پیچ رسانا بر بهره آنتن و پهنای باند یکی از پارامترهای مهم تاثیرگذار بر روی بهره آنتن که نشان دهنده بازده آنتن است، شکل پیچ‌هاست. در این قسمت به مقایسه سه شکل پیچ چاپ شده پرداخته می‌شود. شکل (۱۳) پیچ ماریپیچ چاپ شده بر روی پارچه پلی استری را در سه اندازه مختلف نشان می‌دهد و جدول (۲) مشخصات این سه آنتن را بیان می‌کند.

شکل (۱۴- الف) تا (۱۴- پ) طیف سیگنال بدست آمده از این سه آنتن را به ترتیب نشان می‌دهد. رابطه بین بهره آنتن و اتلاف پیچ در رابطه (۲) مشاهده می‌شود.

اندازه‌گیری طیف آنتن گیرنده با استفاده از دستگاه تحلیلگر اسپکتروم و بدست آوردن تلفات نسبی و بهره آنتن‌ها، آنتن استاندارد به صورت پشت به پشت به دستگاه وصل می‌شود و طیف سیگنال را بدون هیچ اتلافی بدست می‌آید. شکل (۱۱) طیف سیگنال آنتن استاندارد است که بر اساس پیک تلف (S<sub>0</sub> (dB)) در برابر فرکانس است. لازم به ذکر است که توان فرستنده برای تمام اندازه‌گیری‌ها برابر با ۱۰ dBm، اندازه‌گیری‌ها در زاویه ۹۰ درجه و فرکانس مرکزی برابر با ۲/۴ GHz است. شکل (۱۲) نحوه اندازه‌گیری طیف سیگنال آنتن را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- پچ‌های ماریچ چاپ شده بر روی پارچه پلی استر در سه سایز مختلف  
 نمونه ۱                      نمونه ۲                      نمونه ۳



شکل ۱۴- طیف سیگنال آنتن (الف) شماره ۱، (ب) آنتن شماره ۲ و (ب) آنتن شماره ۳

$$G = \frac{1}{L} \quad (2)$$

عبارت  $G$  مربوط به بهره آنتن و  $L$  مربوط به تلفات نسبی پچ آنتن است. برای اندازه گیری تلفات نسبی آنتن، داده‌های مربوط به طیف خروجی هر آنتن از داده‌های طیف ورودی آنتن استاندارد کم و با استفاده از نرم افزار متلب نمودارهای تلفات نسبی در برابر فرکانس آنتن رسم می‌شود. بالاتر بودن تلفات نسبی آنتن طبق معادله (۲) به منزله پایین تر بودن بازده آنتن است. شکل (۱۵) نمودار تلفات نسبی آنتن در برابر فرکانس این سه آنتن را نشان می‌دهد. از طرفی برای اندازه‌گیری پهنای باند به اندازه ۳ دسی بل از قله سیگنال پایین و پهنای طیف در آن نقطه بدست می‌آید که برابر با پهنای باند ۳ دسی بل آنتن است. معادله (۳) رابطه بین تلف نسبی و پیک تلف را نشان می‌دهد.

$$L = \frac{S_x(f)}{S_0(f)} \quad (3)$$

عبارت  $S_x(f)$  مربوط به میزان پیک تلف آنتن‌های چاپ شده  $(x = 1, 2, 3)$  و عبارت  $S_0(f)$  مربوط به آنتن استاندارد است. همان‌طور که از شکل (۱۵) مشخص است اتلاف نسبی آنتن شماره ۳ نسبت به بقیه آنتن‌ها بالاتر است، بنابراین بهره این آنتن نسبت به بقیه کم‌تر است. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش اندازه پچ آنتن به دلیل افزایش تلفات و امواج سطحی، باعث کاهش بهره و بازده آنتن می‌شود. جدول (۳) پیک تلف، اتلاف نسبی، بهره و پهنای باند این سه آنتن را نشان می‌دهد. نمودار بهره آنتن در برابر فرکانس در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) مشخص است که افزایش اندازه پچ رسانا باعث کاهش بهره آنتن و افزایش پهنای باند می‌شود.

#### ۳-۴-۳- بررسی شکل پچ رسانا بر بهره آنتن و پهنای باند

انواع مختلف شکل پچ در آنتن‌ها وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های خاصی را دارا هستند. از جمله این اشکال، پچ مستطیلی و مارپیچ است. انتظار می‌رود پچ مستطیلی به دلیل

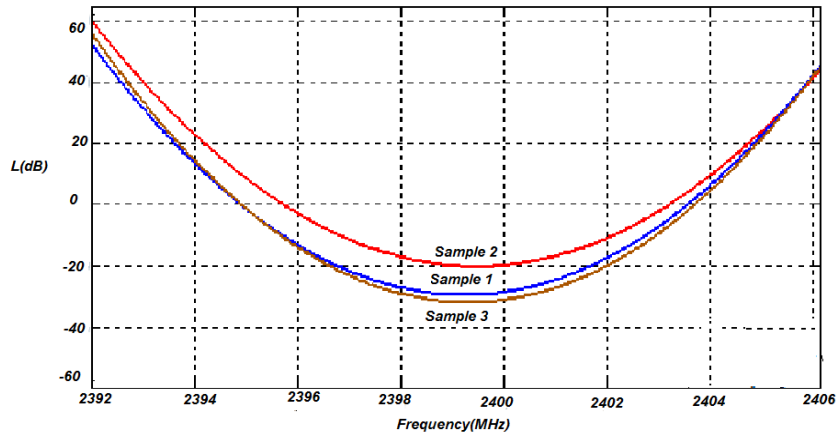
اندازه بزرگ‌تر نسبت به پچ مارپیچ دارای پهنای باند بالاتر و بهره پایین‌تری باشد. شکل (۱۷) پچ‌های چاپ شده بر روی پارچه را نشان می‌دهد.

شکل های (۱۸- الف) و (۱۸- ب) طیف سیگنال بدست آمده از آنتن مارپیچ و مستطیلی را به ترتیب نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل پیداست طیف سیگنال مستطیلی پیک اتلاف کم‌تری را داراست.

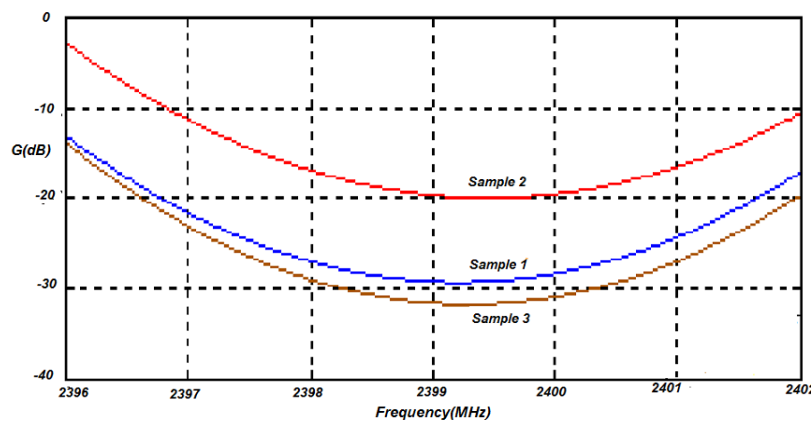
شکل (۱۹) نمودار اتلاف نسبی آنتن در برابر فرکانس این دو نوع آنتن است که نمودار رنگ قرمز مربوط به پچ مارپیچ و نمودار رنگ آبی مربوط به پچ مستطیلی است. شکل (۲۰) نمودار بهره آنتن این دو آنتن را در برابر فرکانس نشان می‌دهد. جدول (۴) تاثیر شکل پچ رسانا را بر روی مشخصات کلی آنتن نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود آنتن مستطیلی پهنای باند بیشتر و بهره کم‌تری نسبت به آنتن مارپیچ دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

چاپ جوهر افشان و لایه نشانی نانوذرات نیکل به دلیل سازگاری با هر نوع زیرلایه و دمای پایین عملیات چاپ نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد. هم‌چنین با ایجاد هدایت الکتریکی بالای  $2632 \pm 50 \text{ S/cm}$  کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های الکترونیک و پزشکی برای آن قابل تصور است. بررسی مورفولوژی پارچه‌های لایه نشانی شده با نانوذرات نیکل نشان دهنده ساختار بسیار یکنواخت با پوشش متراکم از نانوذرات فلز نیکل است. تحلیل عنصری ساختار آنتن ساخته شده به روش چاپ جوهرافشان با لایه نشانی نانوذرات نیکل و درصد بالای نیکل تشکیل شده بر سطح پارچه، تایید کننده هدایت الکتریکی بسیار بالای ایجاد شده است. نتایج آزمون شستشویی نمونه‌ها نشان داد که طرح‌های نیکلی مقاومت الکتریکی تقریباً ثابتی در شستشو داشتند، به طوری که بعد از پنجمین شستشو، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها به اندازه ناچیزی افزایش داشته است. از طرفی بررسی استحکام تا حد پارگی، ازدیاد طول و سختی خمشی نمونه‌های لایه‌نشانی شده نسبت



شکل ۱۵- مقایسه نمودار تلف نسبی آنتن در برابر فرکانس



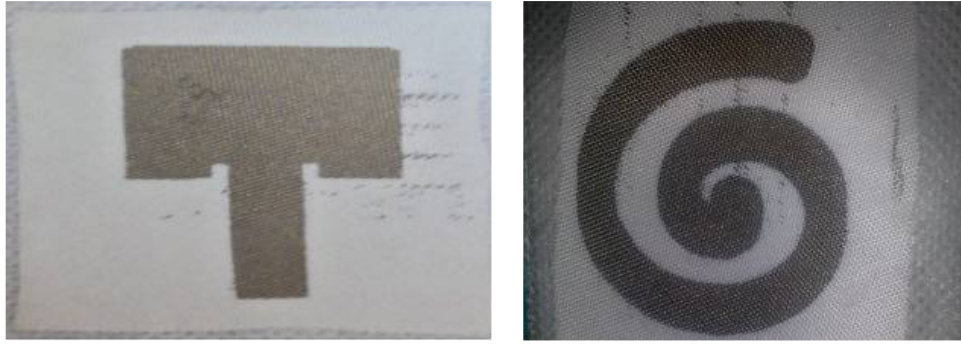
شکل ۱۶- نمودار بهره آنتن در برابر فرکانس

جدول ۲- جنس و ابعاد آنتن‌های ساخته شده

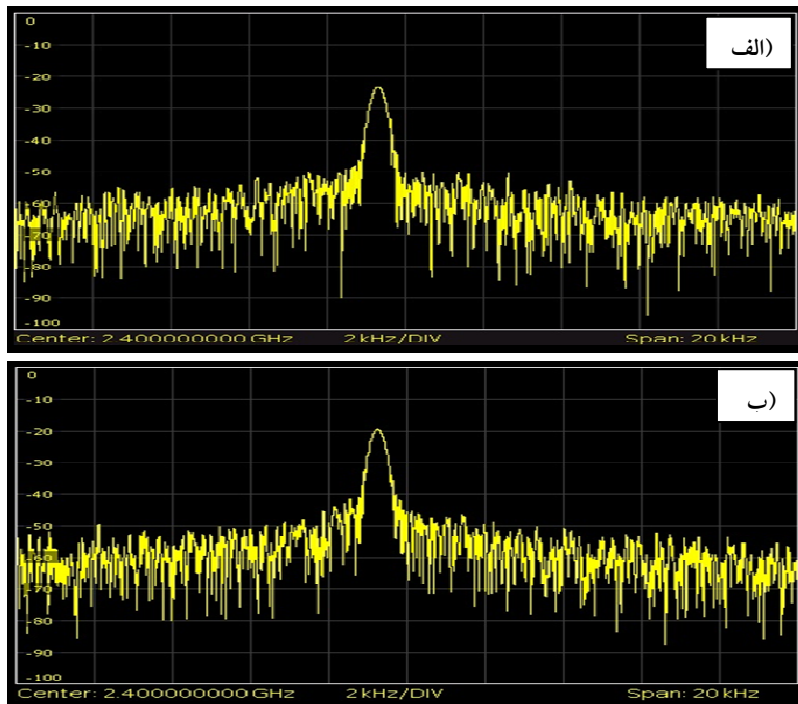
| طرح آنتن   | جنس پارچه | ابعاد نمونه ۱ (mm)     | ابعاد نمونه ۲ (mm)     | ابعاد نمونه ۳ (mm)     |
|------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| پیچ مارپیچ | نیکل      | طول $L=40$             | طول $L=31$             | طول $L=60$             |
|            |           | عرض $W=34$             | عرض $W=25$             | عرض $W=50$             |
|            |           | پهنای خطوط رسانا $h=5$ | پهنای خطوط رسانا $h=4$ | پهنای خطوط رسانا $h=7$ |
| زیرلایه    | پلی استر  | طول $L=60$             | طول $L=63$             | طول $L=60$             |
|            |           | عرض $W=60$             | عرض $W=50$             | عرض $W=55$             |
|            |           | طول $L=60$             | طول $L=63$             | طول $L=60$             |
| صفحه زمین  | نیکل      | عرض $W=60$             | عرض $W=50$             | عرض $W=55$             |

جدول ۳- تاثیر سایز پیچ آنتن بر روی مشخصات کلی آنتن

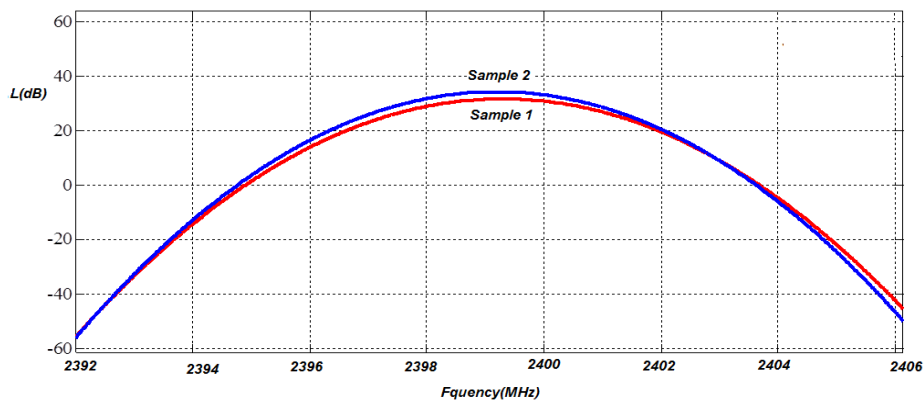
| نمونه | پهنای باند (KHz) | بهره آنتن (dB) | اتلاف نسبی (dB) | پیک تلف (dB) |
|-------|------------------|----------------|-----------------|--------------|
| ۱     | ۳/۸              | -۲۹            | ۳۰              | -۲۱          |
| ۲     | ۳                | -۲۰            | ۲۶              | -۱۸          |
| ۳     | ۴                | -۳۱            | ۳۴              | -۲۳          |



شکل ۱۷- اشکال مختلف پیچ رسانا چاپ شده بر روی پارچه

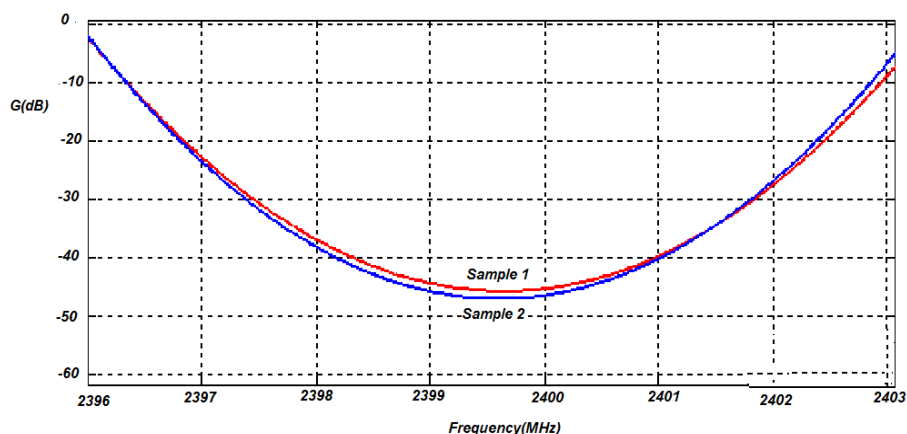


شکل ۱۸- طیف سیگنال پیچ (الف) مارپیچ و (ب) مستطیلی



شکل ۱۹- نمودار اتلاف نسبی آنتن در برابر فرکانس





شکل ۲۰- نمودار بهره آنتن در برابر فرکانس

جدول ۴- تاثیر شکل پیچ رسانا بر روی مشخصات کلی آنتن

| نمونه   | پهنای باند (KHz) | بهره آنتن (dB) | اتلاف نسبی آنتن (dB) | پیک تلف (dB) |
|---------|------------------|----------------|----------------------|--------------|
| ماریپیچ | ۴                | -۳۰/۵          | ۳۴                   | -۲۳          |
| مسططیلی | ۴/۲              | -۳۳            | ۳۸                   | -۱۹          |

و مستطیلی پیچ دو پارامتر ارزیابی شده است. با استفاده از دستگاه تحلیلگر اسپکتروم به بررسی طیف سیگنال، بهره و پهنای باند آنتن‌های مختلف پرداخته شد و مشخص شد که با افزایش اندازه پیچ رسانا، بهره آنتن کم و پهنای باند آن افزایش می‌یابد.

به نمونه خام افزایش و زاویه برگشت از چروک به دلیل افزایش اصطکاک لابه‌لای الیاف دیگر کاهش یافته است. از بهترین نمونه‌ای که به روش چاپ جوهر افشان و لایه نشانی نانوذرات نیکل تهیه شده بود؛ به عنوان پیچ رسانا برای آنتن میکرواستریپ استفاده شد. اندازه پیچ رسانا و شکل‌های ماریپیچ

## مراجع

۱. چنگ، د، قوامی، م، مالارانی، پ، "الکترومغناطیس میدان و موج"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
2. Deschamps., G. and Sichak., W., "Microstrip Microwave Antennas", *Proceedings of the Third Symposium on USAF Antenna Research and Development Program*, Illinois, USA, pp. 18-22, 1953.
3. Munson, R.E., "Microstrip Phased Array Antennas", *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Symposium on USAF Antenna Research and Development Program*, 1972.
4. Sebastian, P., Amin, R., Sangkil, K., Symeon, N., Samuel, E. and Manos, M. T., "Towards a Smart Wireless Integrated Module (SWIM) on Flexible Organic Substrates Using Inkjet Printing Technology for Wireless Sensor Networks", *IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, pp. 20-23, 2012.
5. Kennedy, T.F., Chu, A.W., Champagne, N.J., Lin, G.Y. and Khayat, M.A., "Body-worn E-textile Antennas: The Good, the Low-Mass and the Conformal" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 57, pp. 910- 918, 2009.
6. Tero, K., Juha, L. and Pekka. S., "Exposing Textile Antennas for Harsh Environment", *IEEE Military Communications Conference*, pp 737- 742, 2012.
7. Zhu, S., "Dual-Band Wearable Textile Antenna on an EBG Substrate." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(4), pp. 926- 935, 2009.
8. Salonen.P., Keskilammi, M., "Softwear Antenna," *IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-6, 2008.
9. Coosemans, J., Hermans, B. and Puers, R., "Integrating Wireless ECG Monitoring in Textiles," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 130, pp. 48-53, 2006.

10. Hertleer, C., Tronquo, A., Rogier, H. and Langenhove, L. V., "The Use of Textile Materials to Design Wearable Microstrip Patch Antennas", *Journal of Textile Research*, Vol. 78, pp. 651-658, 2008.
11. Curtis, C.J., Kaydanova, T., Van Hest, M.F.A.M., Miedaner, A., Garnett, E., Ginley, D.S., Smith, L., Leenheer, A. and Collins, R.T., "Ink Jet Printed Metals and Conducting Polymers", *Proceedings of Digital Fabrication 2005*, Baltimore, MD, pp. 160-163, 2005.
12. Hu, B., Li, D., Ala, O., Manandhar, P., Fan, Q., Kasilingam, D. and Calvert, P.D., "Textile-Based Flexible Electroluminescent Devices", *Advanced Functional Materials*, Vol. 21(2), pp. 311-305, 2011.
13. Jeong, S., Kim, D., and Moon, J., "Fabrication of Organic Transistor Based on Ink-Jet Printed Copper Electrodes", *Proceedings of Digital Fabrication 2005*, Baltimore, MD, pp. 130-138, 2005.
14. Kang, J.S., Kim, H.S., Ryu, J., Thomas Hahn, H., Jang, S. and Joung, J.W., "Inkjet Printed Electronics Using Copper Nanoparticle Ink", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 21(11), pp. 1220-1213, 2010.
15. Kim, D., Park, J., Jeong, S. and Moon, J., "Ink-Jet Printing of Silver Conductive Patterns for Flexible Electronics", *Proceedings of Digital Fabrication 2005*, Baltimore, MD, pp. 68-75, 2005.
16. Magdassi, S., Bassa, A., Vinetsky, Y. and Kamyshny, A., "Silver Nanoparticles as Pigments for Water-Based Ink-Jet Inks" *Chemistry of Materials*, Vol. 15(11), p p. 2217-2208, 2003.
17. Chen, W. D., Lin, Y. H., Chang, Ch. P., Sung, Y., Liu, Y. and Ger, M., "Fabrication of High-Resolution Conductive Line via Inkjet Printing of Nano-Palladium Catalyst onto Pet Substrate", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205(20), pp. 4750-4756, 2011.
18. Afzali, A., Mottaghitalab, V., Motlagh, M.S. and Haghi, A.K., "The Electroless Plating of Cu-Ni-P Alloy onto Cotton Fabrics", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 27(4), pp. 1149-1145, 2010.