

Positioning based on RFID antennas with conductive ink of silver nanoparticles**Received: 13 December 2021****Accepted: 17 January 2022****Article type: Research Article****PP: 85-93****DOI:**[10.22034/pitc.2022.1266108.1105](https://doi.org/10.22034/pitc.2022.1266108.1105)**Neda Attaran**

Department of Medical Nanotechnology,
Applied Biophotonics Research Center,
Science and Research Branch, Islamic Azad
University, Tehran, Iran.

(Corresponding author)

n.attaran.k@gmail.com

Abstract

The purpose of this article is to design and manufacture the desired RFID antenna materials to positioning. Since the shape and size of the antenna limit its use, the design and manufacture of flexible materials with the ability to absorb and radiate properly, especially in the three-dimensional design of the desired antenna is the current article. In this regard, the use of silver nanoparticles in the design of the mentioned materials has been studied and the properties of the resulting material have been evaluated and presented based on laboratory results. The size and morphology of silver nanoparticles in conductive ink, based on electron microscopy and histogram curve, is about 7 nm and is spherical. Using an absorption spectrophotometer, the ultraviolet light absorption spectrum of the ink is obtained at a wavelength of 410 nm, which indicates the presence of silver nanoparticles. Also, the average measured electrical conductivity is 4.400×10^7 s/m.

Keywords: Antenna, radio frequency identification technology, conductive ink, Positioning

موقعیت یابی بر پایه آنتن های RFID مبتنی بر ساخت جوهر رسانای نانوذرات نقره

چکیده

هدف مقاله جاری طراحی و ساخت مواد آنتن های مطلوب RFID جهت موقعیت یابی است. از انجایی که شکل و اندازه آنتن بهره گیری از آن را محدود می کند، طراحی و ساخت مواد انعطاف پذیر با قابلیت جذب و تشعشع مناسب مخصوصا در طراحی سه بعدی آنتن مطلوب پژوهش جاری است. در این امتداد، بهره گیری از نانو ذرات نقره در طراحی مواد یاد شده، مطالعه و ویژگی های ماده حاصل بنا به نتایج آزمایشگاهی ارزیابی و ارایه شده است. بر اساس ارزیابی نتایج آزمایشگاهی اندازه و مورفولوژی نانوذرات نقره در جوهر رسانا مبتنی بر تصویربرداری و نمودارهیستوگرام حدود ۷ نانومتر و به صورت کروی گزارش می شود. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذبی، طیف جذب نور فرابنفش جوهر ساخته شده، در طول موج nm 410 به دست آمده است که این امر نشان دهنده حضور نانوذرات نقره است. همچنین، هدایت الکتریکی متوسط اندازه گیری شده برابر با $4.400 \times 107 \text{ s/m}$ است.

کلیدواژه‌ها: آنتن، فناوری شناسایی فرکانس رادیویی، جوهر رسانا، نانو ذرات نقره، موقعیت یابی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

صص: ۹۳-۸۵

شناسه دیجیتال (doi):

[10.22034/pitc.2022.1266108.1105](https://doi.org/10.22034/pitc.2022.1266108.1105)

ندا عطاران

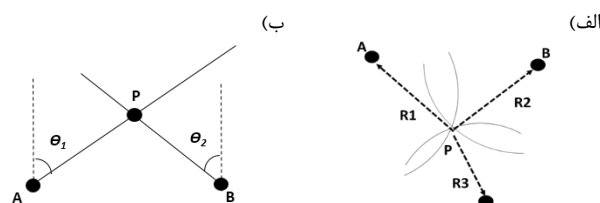
استادیار، گروه نانو تکنولوژی پزشکی،
دانشکده علوم و فناوری های پزشکی،
واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه
آزاد اسلامی، تهران، ایران.
(نویسنده مسئول)

n.attaran.k@gmail.com

۱- مقدمه

برای موقعیت‌یابی اشیاء رویکردهای مختلفی وجود دارد. اهم این رویکردها شامل فناوری‌های شناسایی فرکانس رادیویی (RFID)، مادون‌قرمز (IR) و شبکه‌های محلی بی‌سیم وای‌فای (Wi-Fi)، می‌باشد. به‌عنوان نمونه، رادار مایکروسافت یک سیستم تحلیل صحنه‌ی شناخته‌شده است. رادار یاد شده از قدرت سیگنال فرکانس رادیویی مودم‌های وای‌فای مبتنی بر استاندارد IEEE 802.11 برای تعیین مکان کاربران و تجهیزات در داخل ساختمان‌ها استفاده می‌کند. جهت این امر، قدرت سیگنال وای‌فای مودم‌های مجاور اندازه‌گیری شده و سپس مکان کاربر یا تجهیزات به کمک مثلث‌سازی^۱ تخمین زده می‌شود. در مثلث‌سازی، از خواص هندسی مثلث‌ها برای تخمین مکان هدف استفاده می‌شود. این تکنیک دو رویکرد دارد:

(۱) موقعیت‌یابی بر اساس فاصله سنجی و (۲) موقعیت‌یابی بر اساس زاویه سنجی. در رویکرد فاصله سنجی، موقعیت یک شی با اندازه‌گیری فاصله آن از چندین نقطه مرجع تخمین زده می‌شود؛ بنابراین، به آن تکنیک‌های اندازه‌گیری محدوده نیز می‌گویند. در این رویکرد می‌توان به‌جای اندازه‌گیری مستقیم فاصله از فاکتورهای دیگری نیز بهره برد. به‌عنوان نمونه فاکتورهای قدرت سیگنال‌های دریافتی^۲ (RSS)، زمان رسیدن^۳ (TOA) یا اختلاف زمانی رسیدن^۴ (TDOA) می‌توانند در این امر مورد بهره‌برداری قرار گیرند. در این حالت فاصله با محاسبه میزان تضعیف قدرت سیگنال منتشر شده و با ضرب سرعت سیگنال رادیویی و زمان سفر رفت و برگشت^۵ (RTOF) قابل حصول است. همچنین می‌توان از فاز سیگنال دریافتی نیز برای تخمین برد بهره برد. در رویکرد زاویه‌سازی^۶، مکان یک شی، با محاسبه زوایای مربوط به چندین نقطه مرجع تعیین می‌شود. شکل ۱ الف و ب به ترتیب، موقعیت‌یابی را بر اساس فاصله سنجی و زاویه سنجی نشان می‌دهد.



شکل ۱. روش مثلث‌سازی برای تعیین موقعیت [۱]. الف) فاصله سنجی و ب) زاویه سنجی

در بین راهکارهای یاد شده، تجهیز ادوات یا افراد به گیرنده‌های وای‌فای و تأمین برق آن‌ها از چالش‌های این حوزه است. راه‌حل‌های مبتنی بر RFID

- 1 Triangulation
- 2 Received signal strengths
- 3 Time of arrival
- 4 Time difference of arrival
- 5 Roundtrip time of flight
- 6 Angulation

می‌توانند در این موارد راهگشا باشند. هزینه راه‌اندازی و نگهداری پایین، عدم نیاز به برق باتری، برچسب‌های^۷ سبک با قابلیت بالای پنهان‌سازی، از ویژگی‌های ممتاز راه‌حل‌های مبتنی بر RFID است [۱]. با این حال، چالش مهم این حوزه طراحی و ساخت آنتن با مواد مؤثر جهت تأمین انرژی و پاسخ به درخواست رادیویی است. در این راستا، پژوهش جاری، سنتز نانو ذرات نقره را در طراحی و ساخت مواد انعطاف‌پذیر با قابلیت جذب و تشعشع مناسب مخصوصاً در طراحی سه‌بعدی آنتن برای سامانه‌های فاقد تراشه الکترونیکی را بررسی می‌کند.

سیستم RFID نوعی فناوری تبادل اطلاعات به‌صورت بی‌سیم است که در آن از روشی خودکار برای شناسایی افراد، حیوانات و اشیاء استفاده می‌شود. سیستم‌های RFID در زمینه‌های گوناگونی از جمله شناسایی، کنترل از راه دور، مراکز صنعتی، حمل‌ونقل، پزشکی و غیره کاربرد دارند. سیستم‌های RFID به دلیل نرخ انتقال داده بالا و عدم نیاز به دید مستقیم بر سایر روش‌های شناسایی مبتنی بر دید مستقیم ارجحیت دارند. برچسب‌های RFID در فرکانس‌های مختلفی به شکل‌های متفاوت، با کاربردهای مختلف تولید می‌شوند. سیستم‌های RFID در باندهای فرکانسی 125 KHz تا 135 KHz، 56/13 MHz، 840 MHz، تا 960 MHz، 45/2 GHz و 8/5 GHz موجود هستند. لازم به توضیح است که فرکانس سیستم RFID با توجه به میزان برد مورد نیاز و کاربرد آن تعیین می‌شود [۲].

به‌طور کلی برچسب‌های RFID را می‌توان به دودسته دارای تراشه الکترونیکی و فاقد تراشه الکترونیکی تقسیم‌بندی کرد. اساس کار سیستم RFID فاقد تراشه الکترونیکی بر پایه پراکندگی در خلاف جهت پرتو تابشی استوار است. جریان در آنتن، هنگامی که موج الکترومغناطیس به آن برخورد می‌کند، جریانی را در آنتن القا می‌کند. این جریان باعث به وجود آمدن موج الکترومغناطیس دیگری می‌شود که توسط آنتن مجدد تشعشع می‌کند. هر برچسب RFID فاقد تراشه الکترونیکی با توجه به اندازه و شکل خود، پاسخی متفاوت به موج ارسال شده توسط قرائت گر دارد که به آن اثر الکترومغناطیس گفته می‌شود. از جمله پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی اثر الکترومغناطیسی، سطح مقطع راداری، پارامترهای پراکندگی و ضریب بازتاب می‌باشد. در این بین، بهترین پارامتر برای رسیدن به بیشینه بازدهی، سطح مقطع راداری است.

فناوری RFID غیرفعال به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن و مصرف برق کم، به‌طور گسترده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند ردیابی، کنترل دسترسی، لجستیک و غیره استفاده می‌شود [۳]. با این حال، هنوز محدودیت‌های مهمی برای این فناوری وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، طراحی آنتن است. طراحی آنتن به اندازه کافی باید قوی باشد تا امکان عملکرد مناسب در محیط اطراف با تغییر خواص الکترومغناطیسی را فراهم کند. اگر این نیاز برآورده نشود، تغییرات امپدانس آنتن ممکن است باعث عدم تطابق و در نتیجه کاهش محدوده فعال‌سازی تراشه RFID شود. این در هنگام برخورد با محیط‌های پرتلفات مانند مایعات یا بافت‌های بیولوژیکی بسیار مهم است [۴]. چالش دوم در طراحی آنتن‌ها برای کاربردهای RFID، اطمینان از این است که برچسب RFID نه تنها می‌تواند نزدیک به محیط‌های ناهمگن یا دارای

ارزان، سبکی، قابلیت بازیافت و سازگاری با محیط زیست، کاربردهای منحصربه‌فردی مانند تولید تجهیزات الکترونیکی پوشیدنی و منعطف را به وجود آورده است. برای طراحی و چاپ با جوهر رسانا به اطلاعاتی در مورد خصوصیات جوهر رسانا نیاز داریم.

مولکول‌های رسانای مورد استفاده در جوهرهای رسانا شامل نانو ذرات، ترکیبات آلی-فلزی و پلیمرهای رسانا (برای مثال PEDOT/PSS، PVAm و نانو ذرات Ag، Si، CuO یا TiO_2) می‌باشد. در تهیه جوهرهای رسانا، پایداری مولکول‌های رسانا اهمیت بسیاری دارد. این مولکول‌ها باید در محیط ماده، پخش یکنواختی داشته باشند تا از تراکم جلوگیری کند. پایداری این مولکول‌ها به افزودن مواد افزودنی، بستگی دارد. پلیمرها به‌عنوان مواد افزودنی جهت پایداری مولکول‌ها در محیط استفاده می‌شوند تا از تجمع قطرات جلوگیری شود. همچنین، غلظت پلیمر رسانا نیز باید تنظیم شود تا مانع از تولید مجراهای طولانی مایع شود. بعلاوه، محیطی ساکن برای چاپ مولکول‌های رسانا مورد نیاز است، چرا که این مولکول‌ها مستعد واکنش‌پذیری با رطوبت و اکسیژن محیط هستند. در این پژوهش، سعی بر طراحی و ساخت جوهر رسانای مناسب با ویژگی‌های مطلوب جهت استفاده در چاپ سه‌بعدی آنتن‌های RFID با هدف موقعیت‌یابی شده است. در این راستا بخش ۲ به معرفی و بررسی انواع آنتن‌های RFID می‌پردازد. بخش ۳ طراحی و تولید جوهر رسانا بر پایه نانو ذرات نقره را به‌صورت آزمایشگاهی و تجربی در بر دارد. بخش ۴ پارامترهای ارزیابی مشخصات جوهر رسانای ساخته شده را بررسی می‌کند. بخش ۵ شیوه به‌کارگیری جوهر یاد شده را در طراحی و مدلسازی آنتن مطرح می‌کند و نهایتاً بخش ۶ به نتیجه‌گیری پژوهش یاد شده اختصاص دارد.

۲- آنتن‌های برچسب RFID

آنتن‌های برچسب RFID برای هدف منحصربه‌فردی طراحی شده‌اند و طراحی آن‌ها در واقع می‌تواند اطلاعاتی در مورد خود برچسب نشان دهد. انواع آنتن‌های برچسب RFID را می‌توان بر اساس محدوده فرکانسی آن تقسیم‌بندی کرد: برچسب فرکانس پایین، فرکانس بالا یا فرکانس فوق‌العاده. ارتباط بین طراحی آنتن برچسب و نحوه ارتباط آن با قرائتگر RFID آنتن فرکانس را مشخص می‌کند. در ادامه، سه نوع فرکانس اصلی، همراه با اطلاعات در مورد هر یک و طراحی آنتن آن‌ها مشخص شده است. لازم به توضیح است که آنتن‌های برچسب از سیم فلزی یا ورق فلزی ساخته می‌شوند تا رسانای کافی برای انرژی RF فراهم کنند. سپس بسته به نوع برچسب، از انواع دیگر مواد مانند PET، پلاستیک، کاغذ و پلی‌استر برای تهیه پایه اطراف آنتن برچسب استفاده می‌شود. فناوری جوهر رسانا جایگزین مناسبی برای سیم فلزی یا ورق فلزی است و می‌تواند انعطاف زیادی در طراحی آنتن ایجاد کند.

تلفات کار کند، بلکه در آن‌ها نیز غوطه‌ور است. در مطالعات گذشته، می‌توانیم مطالعات موردی RFID های کاملاً تعبیه‌شده را برای کاربرد در برخی صنایع مشاهده کنیم [۷-۵]. این مطالعات، محدودیت‌های عملکرد برچسب RFID، عمدتاً به دلیل تأثیر شرایط خارجی را گزارش می‌کنند. مسئله فقط تأثیر تلفات الکتریکی مربوط به محیط خاص نیست، بلکه تغییرات زمانی کل مجموعه خواص الکتریکی نیز مطرح است. آنتنی که در یک محیط خاص غوطه‌ور شده است باید بدون توجه به تغییرات ثابت دی‌الکتریک و رسانایی، بتواند به‌درستی و تا حد اکثر میزان کار کند. این نه تنها به این معنی است که باید تطابق خوبی را در طیف معینی از مقادیر نشان دهد، بلکه باید به اندازه کافی به تغییرات زمانی هم پاسخ دهد.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم که به فرکانس عملیاتی بستگی دارد، توزیع فضای نواحی آنتن است، چرا که توزیع فضای یاد شده رفتار تابشی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد. لازم به توضیح است که میدان-نزدیک راکتیو^۱ تأثیر زیادی بر رفتار قدرت تابشی آنتن دارد. وجود محیط‌هایی با اتلاف به‌طور چشمگیری بازده تشعشعی آنتن را کاهش می‌دهد، زیرا آن‌ها با میدان-نزدیک راکتیو تعامل دارند. بسته‌بندی آنتن‌ها یک راه بالقوه برای حل این مسائل است که در مطالعات قبلی پیشنهاد شده است [۸]. کپسوله سازی دی‌الکتریک برای تضمین امیدانس^۲ آنتن پایداری هنگام غوطه‌ور شدن در یک محیط دی‌الکتریک از طریق شبیه‌سازی‌های عددی تأیید شده است و بسته‌بندی را می‌توان طوری طراحی کرد که تغییرات راکتانس^۳ آنتن را به حداقل برساند. علاوه بر این، نگهداشتن میدان-نزدیک راکتیو در داخل پوشش، تأثیر تلفات متوسط بر راندمان تابشی را به حداقل می‌رساند [۹،۱۰]. استفاده از تکنیک‌های ساخت افزودنی^۴ (AM) برای بهبود عملکرد سیستم‌های آنتن یکپارچه پتانسیل زیادی دارد. مسائل ویژه‌ای که اخیراً در مورد تکنیک‌های تولید و فناوری چاپ سه‌بعدی برای کاربردهای آنتن پیشرفته و جدید منتشر شده است، تأثیر آینده این فناوری را نشان می‌دهد [۱۱،۱۲]. با اتخاذ تکنیک‌های چاپ سه‌بعدی، می‌توانیم از مسطح بودن فرار کنیم و مدل‌هایی تولید کنیم که در عین حفظ عملکرد الکتریکی، فشردگی و ادغام کل سیستم را افزایش می‌دهند. نمونه‌ای از کاربرد آن که در آن فشردگی و بهبود عملکرد سیستم می‌تواند مفید باشد، فناوری شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) است. مطابق با تمام این ملاحظات، طراحی‌های مختلفی برای یک برچسب فشرده UHF-RFID غیرفعال با چاپ سه‌بعدی فشرده ارائه شده است [۱۳-۱۱].

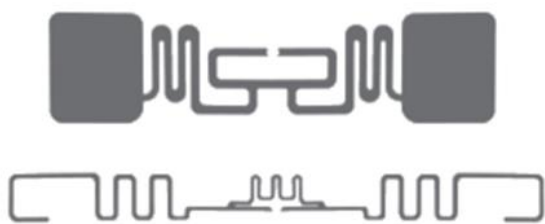
برای رسیدن به هدف چاپ سه‌بعدی آنتن با ویژگی‌های مطلوب، ساخت جوهر رسانا به‌عنوان یک گزینه مطلوب قابل دفاع است. جوهرهای رسانا یکی از جدیدترین موادی هستند که می‌توانند خاصیت رسانایی داشته باشند. کاربردهای متنوعی برای این‌گونه جوهرها از جمله در مدارها و ادوات الکترونیکی و نوری، حسگرها و آنتن‌های چاپی معرفی شده‌اند. امکان چاپ جوهر رسانا بر سطوح انعطاف‌پذیر مانند کاغذ، پلیمر و پارچه، علاوه بر قیمت

1 Reactive near-field

2 Impedance

3 Reactance

4 Additive manufacturing



شکل ۴. آنتن برچسب فرکانس فوق‌العاده بالا

۲-۱- فرکانس پایین (LF)

آنتن‌های فرکانس پایین برای بازه فرکانسی ۱۲۵ - ۱۳۵ کیلوهرتز طراحی می‌شوند. محدوده خواندن آن‌ها در شرایط ایده آل تا ۴۵.۷ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) قابل گسترش است. از تکنیک کوپلینگ القایی بهره می‌برند؛ به عبارت دیگر در آن‌ها آنتن قرائتگر، یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند تا جریان الکتریکی را در آنتن برچسب فعال کند. طراحی عمومی آن‌ها برچسب کوپل دایره‌ای شکل استفاده می‌شود. شکل ۲ شماتیک طراحی آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. آنتن برچسب فرکانس پایین

۳- جوهرهای رسانا

شیمی منحصر بفرد جوهر رسانا جهت استفاده در چاپ سه‌بعدی آنتن‌های RFID حائز اهمیت است. دلیل این مساله آن است که خصوصیات جوهر کیفیت چاپ سه‌بعدی را مشخص می‌کنند. جوهرهای رسانا حاوی ماده‌ی اساسی و رنگین ساز، به همراه چند ماده‌ی افزودنی هستند. ماده‌ی اساسی به‌عنوان حامل مایع رنگین سازها عمل می‌کند که امکان پیوند آن‌ها به ماتریس پس از چاپ را فراهم می‌کند.

۲-۲- فرکانس بالا (HF)

آنتن‌های فرکانس بالا برای بازه فرکانسی ۱۳.۵۵۳ - ۱۳.۵۶۷ مگاهرتز طراحی می‌شوند. محدوده خواندن آن‌ها در شرایط ایده آل تا ۱.۵ متر (۵ فوت) قابل گسترش است. از تکنیک کوپلینگ القایی بهره می‌برند. طراحی عمومی آن‌ها برچسب کوپل دایره‌ای یا مستطیلی شکل استفاده می‌شود. شکل ۳ شماتیک طراحی آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳. آنتن برچسب فرکانس بالا

۳-۱- ماده‌ی اساسی

ماده‌ی اساسی معمولاً به چهار دسته تقسیم می‌شود: مبتنی بر آب^۲، غیر مبتنی بر آب^۳، تغییر فاز^۴ و واکنشی^۵ [۱۵،۱۶]. جزء اصلی مایع در ماده‌ی مبتنی بر آب، جوهر است. ماده‌ی غیر مبتنی بر آب حاوی چند حلال آلی و جوهر می‌باشد. مکانیسم خشک شدن در هر دو ماده‌ی اساسی آبی و غیر آبی این است که جوهر بخار می‌شود و به‌طور همزمان در منافذ ماتریس نفوذ می‌کند. با این حال، کیفیت تصویر چاپی می‌تواند ضعیف باشد، چرا که جوهر تمایل به انتشار دارد. ماده‌ی تغییر فاز به جای مایع بودن در دمای محیط، در دمای اتاق جامد است اما هنگام جریان یافتن ذوب می‌شود و به محض این‌که به ماتریس می‌رسد تبدیل به جامد می‌شود (نمونه‌ای از جوهر شبه موم). این خصوصیت می‌تواند بر کیفیت تصویر چاپی، ایجاد اشکال کند، چرا که ماده‌ی تغییر فاز روی ماتریس پخش نمی‌شود. مواد اساسی آبی، غیر آبی و تغییر فاز می‌توانند هنگام خارج شدن از ماتریس پر منفذ یا دارای پوشش، تصویر چاپی قابل قبولی بسازند. با این حال، در ماتریس‌های بدون منفذ به دلیل چسبندگی کم خوب عمل نمی‌کنند. ماده‌ی واکنشی با ماندن به‌عنوان مایعی پایدار تا زمانی که با تابش UV پخته شود، این مشکل را حل می‌کند. فرآیند پخت، مایع را تحریک می‌کند که تحت پلیمریزاسیون قرار بگیرد که منجر به چسبندگی فشرده‌تر به ماتریس می‌شود؛ بنابراین همانند ماده‌ی تغییر فاز، ماده‌ی واکنشی پخش‌شدگی جوهر کمتری دارد. با این حال، پوشش جوهر روی ماتریس نسبتاً کم است که باعث اتلاف جوهر بیشتری می‌شود. برخلاف آن، ماده‌ی واکنشی غیرفرار است و حاوی حلال‌های آلی نیست که میزان سمی بودن آن برای محیط کمتر است [۱۷،۱۸].

۲-۳- فرکانس فوق‌بالا (UHF)

آنتن‌های فرکانس فوق‌بالا برای بازه فرکانسی ۴۰۰ - ۱۰۰۰ مگاهرتز طراحی می‌شوند. محدوده خواندن آن‌ها در شرایط ایده آل تا ۳۵ متر (۱۱۵ فوت) قابل گسترش است. از تکنیک کوپلینگ پراش بازگشتی^۱ بهره می‌برند؛ به عبارت دیگر در آن‌ها آنتن قرائتگر، انرژی RF را برای فعال کردن برچسب RFID تولید می‌کند. برچسب اطلاعات را مادوله می‌کند و انرژی باقی مانده را به آنتن قرائتگر بازتاب می‌دهد. طراحی عمومی آن‌ها به‌صورت آنتن دوقطبی است. در طراحی آن‌ها اگر یک حلقه کوچک در وسط وجود داشته باشد، آنتن دارای قابلیت‌های میدان نزدیک خواهد بود. شکل ۴ شماتیک طراحی آن‌ها را نشان می‌دهد.

2 Aqueous-based
3 Non-aqueous-based
4 Phase-change
5 Reactive

1 Backscatter

۲-۳- رنگین سازها

رنگ‌های تولید شده در چاپ جوهر به دلیل افزودن رنگین سازها می‌باشند. رنگین سازها در واقع رنگینه‌ها^۱ (آلی یا پلیمری) یا رنگدانه‌ها^۲ هستند. رنگینه‌ها قابل حل هستند و به‌عنوان مولکول‌های منفرد در جوهر وجود دارند، درحالی‌که رنگدانه‌ها غیرقابل حل بوده و تمایل دارند خوشه‌هایی شکل دهند. این ویژگی شیمیایی، رنگینه‌ها و رنگدانه‌ها را در عملکرد رنگ متمایز می‌کند. جوهر حاوی رنگینه پایدارتر از جوهر حاوی رنگدانه است، چرا که رنگدانه‌ها گاهی روی هم متراکم می‌شوند. از آنجاکه این تراکم روی جریان جوهر تأثیر می‌گذارد، به‌منظور بررسی و رفع این مشکل، مواد افزودنی (مانند روکشگرها^۳، پراکنده‌سازها^۴، پلیمرها) برای پایداری رنگدانه‌ها از طریق مکانیسم‌های الکترواستاتیک و فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، آنیون سدیم دودسیل سولفات^۵ (SDS) معمولاً با دوده‌ی کربن (آب‌گریز) ترکیب می‌شود. بار منفی انتقال یافته از SDS مانع تراکم رنگدانه‌ی دوده‌ی کربن می‌شود، بنابراین جوهر را پایدار می‌کند. دلیل این مساله آن است که ویژگی‌های خوشه‌ای رنگدانه‌ها مقاومت بیشتری در برابر این اثرات محیطی ایجاد می‌کنند [۱۵،۱۶].

۳-۳- مواد افزودنی

به غیر از مواد اساسی و رنگین‌سازها، مواد افزودنی نیز یکی از اجزای مهم جوهر هستند. مواد افزودنی ویژگی‌های جوهر را برای چاپ و ذخیره‌سازی پایدار یا تنظیم می‌کند. انواع اصلی مواد افزودنی: روکشگرها، تعدیل‌کننده‌ی چسبندگی^۶، پراکنده‌سازها، رطوبت‌گیرها^۷ و عوامل کی‌لیت‌ساز^۸ را در بر می‌گیرند.

به‌منظور دستیابی به کیفیت چاپ مناسب، چسبندگی و کشش سطح جوهر دو پارامتر رئولوژیک بسیار مهم می‌باشند [۱۹]. جوهر دارای چسبندگی کم به‌سرعت روی ماتریس پخش می‌شود که منجر به کیفیت ضعیف تصویر می‌شود. تعدیل‌کننده‌های چسبندگی، از جمله گلیسرول^۹، اتیلن گلیکول^{۱۰}، پلی (وینیل الکل)^{۱۱} و سدیم کربوکسی‌متیل سلولز^{۱۲}، می‌توانند برای تنظیم چسبندگی به کار روند [۲۰،۲۱]. کشش سطح بالا می‌تواند مانع جریان خروجی جوهر شود، درحالی‌که کشش سطح پایین منجر به رهاسازی بیش‌ازحد جوهر می‌شود، یا قطرات ناپایداری تشکیل می‌دهد. به همین دلیل، روکشگرها معمولاً برای تنظیم کشش سطح (برای مثال سدیم دودسیل

- 1 Dyes
- 2 Pigments
- 3 Surfactants
- 4 Dispersants
- 5 Sodium dodecyl sulfate
- 6 Viscosity modifiers
- 7 Humectants
- 8 Chelating agents
- 9 Glycerol
- 10 Ethylene glycol
- 11 Poly(vinyl alcohol)
- 12 Sodium carboxymethyl cellulose

سولفات، روکشگرهای کاتیونی از قبیل ستیل تری‌متیل آمونیوم برومید^{۱۳}، یا روکشگرهای غیر یونی از جمله تریتون^{۱۴} X-100، روکشگر یون دوقطبی^{۱۵}، بتائین^{۱۶} به کار گرفته می‌شوند [۲۲]. معرف‌های دیگر نیز می‌توانند برخی ویژگی‌های جوهر را تغییر دهند، برای مثال، اتانول (کمک حلال) می‌تواند کشش سطح را کاهش دهد و رطوبت‌پذیری محلول نمونه را تسهیل می‌کند و همچنین رنگدانه‌های غیرقابل حل را حل کند [۲۳-۲۵].

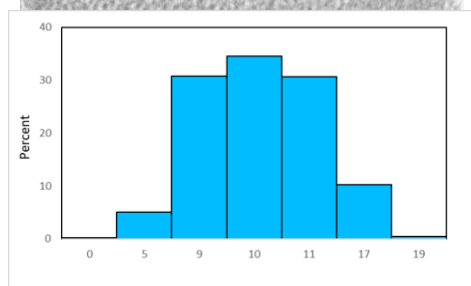
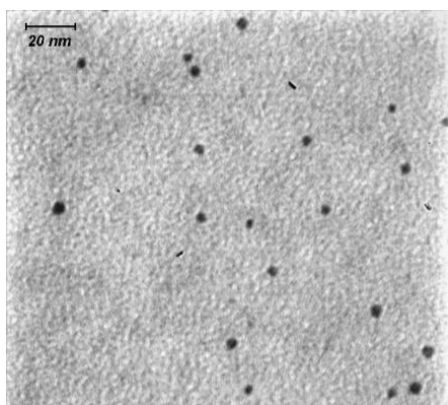
جدول ۱. پارامترهای معمول سیال رسانا (۲)

ثابت‌های فیزیکی	معادلات	پارامترها و واحدها	محدوده
عدد رینولدز	$Re = \frac{\rho v L}{\eta}$	ρ = چگالی سیال (kg/m ³)	50- 500
عدد وبر	$We = \frac{v^2 \rho L}{\gamma}$	v = سرعت (m/s)	20- 300
عدد اونسورگ	$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{\sqrt{\gamma \rho L}}$	L = بعد خطی مشخصه (طول پیموده شده‌ی سیال) (m) η = چسبندگی دینامیک سیال (Pa.s) یا N.s/m ² یا (kg/(m.s))	NA
Z	$Z = \frac{1}{oh}$	γ = کشش سطح (N/m)	برای تشکیل قطره‌ی پایدار $10 > Z > 1$

NA = در دسترس نمی‌باشد.

پراکنده‌سازها به دودسته تقسیم می‌شوند: روکشگرها و پلیمرها. این مواد، رنگدانه‌ها را توسط بارهای انتقالی از طریق برهمکنش‌های الکترواستاتیک یا فضایی پایدار می‌کنند. فرمول‌بندی جوهر با پایداری پخش مناسب برای جوهرهای رسانا مهم است و بر عملکرد جوهر حاصل تأثیر می‌گذارد. وو و همکارانش نشان داده‌اند که جوهر نقره با پخش پایدار به دلیل پیوند بین ذره‌ای کمتر، مقاومت الکتریکی کمی از خود نشان می‌دهد. رطوبت‌گیرها (برای مثال گلیسرول یا گلیسرین) اساساً برای کنترل یا محدود کردن تبخیر جوهر به کار می‌روند. آن‌ها در طول چاپ مانند عوامل جذب رطوبت عمل می‌کنند. به‌طور مشابه، عوامل کی‌لیت‌ساز (برای مثال اتیلن دی‌آمین تترا استیک اسید^{۱۷}، ADTA) نیز خصوصیات رشد ضد میکروبی دارند و می‌توانند فلزات کمیاب ناخواسته را از ترکیبات رنگی در فرمول جوهر حذف کنند [۲۶-۲۹].

- 13 Cetyl trimethyl ammonium bromide
- 14 Triton X-100
- 15 Zwitterionic surfactant
- 16 Betaine
- 17 Ethylenediaminetetraacetic acid



شکل ۵. تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری از جوهر رسانای حاوی نانو ذرات نقره و هیستوگرام سایز ذرات

در این پژوهش ابتدا نانو ذرات نقره در حضور پلیمر پلی آکرلیک اسید سنتز می‌شوند، سپس در مرحله‌ی بعدی، برای افزایش ویسکوزیته محلول، از هیدروکسی اتیل سلولز استفاده می‌شود. سپس خصوصیات ساختاری و نوری و الکتریکی ترکیب سنتز شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین تأثیر عوامل مختلف در خصوصیات جوهر رسانای سنتز شده از جمله غلظت نانو ذرات نقره و شرایط واکنش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴- طراحی و تولید جوهر رسانا بر پایه نانو ذرات نقره

تاکنون روش‌های مختلفی برای تولید جوهر رسانا معرفی شده است که از این بین، تولید جوهر با ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی منحصربه‌فرد و پایدار اهمیت بسزایی دارد. نانومواد رسانا، مانند نانو ذرات فلزی و نانوسیم‌ها، نانولوله‌های کربنی و گرافن، مواد امیدوارکننده‌ای برای الکترونیک چاپی هستند. در سال‌های اخیر، فناوری‌های چاپ مبتنی بر نانومواد، فرمول‌بندی جوهرهای قابل چاپ، پردازش پس از چاپ و ادغام دستگاه‌های کاربردی پیشرفت قابل‌توجهی داشته‌اند. گزارش‌های مختلفی به بررسی اصول اولیه و توسعه فناوری‌های چاپ، فرمول‌بندی جوهرهای قابل چاپ بر اساس نانومواد رسانا، رسوب جوهرهای رسانا از طریق تکنیک‌های مختلف چاپ و بهبود عملکرد با استفاده از روش‌های مختلف نف جوشی می‌پردازد [۳۵-۳۰].

در این پژوهش، تولید جوهر رسانا جهت استفاده در چاپ سه‌بعدی آنتن‌های RFID با هدف موقعیت‌یابی، طی مراحل زیر انجام گرفت.

۴-۱- تولید نانو ذرات نقره در حضور پلی (آکرلیک اسید)

جوهر نقره با مخلوط کردن ۱.۹۱۵ گرم پلی (آکرلیک اسید) (PAA) (وزن مولکولی = ۱۸۰۰ گرم در مول، محلول آبی ۶۵ درصد وزنی) با ۵۰ گرم آب و ۴۰ گرم دی اتانول آمین (DEA) سنتز می‌شود. این مخلوط، به مدت ۲ ساعت در حمام آب در دمای اتاق هم زده می‌شود. سپس محلول نیترات نقره (۲۰ گرم $AgNO_3$ در ۱۵ میلی‌لیتر H_2O) درحالی‌که به شدت هم زده می‌شود به این محلول تزریق می‌شود. محلول شفاف اولیه به آرامی به مدت ۲۲ ساعت در دمای اتاق هم زده می‌شود. محلول به تدریج سیاه می‌شود که همزمان با تشکیل نانو ذرات نقره خالص (حدود ۵ نانومتر قطر) است. سپس این محلول نانو ذرات نقره در یک حمام آب گرم شده تا دمای ۶۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱.۵ ساعت سونیکیت می‌شوند. این مرحله منجر به تشکیل ذرات با اندازه متوسط ۷ نانومتر می‌شود (شکل ۵). میانگین اندازه ذرات و توزیع اندازه برای هر نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (JEOL 2100 Cryo TEM) همراه با تجزیه‌وتحلیل تصویر تعیین می‌شود.

۴-۲- افزایش ویسکوزیته جوهر رسانا با استفاده از هیدروکسی اتیل سلولز

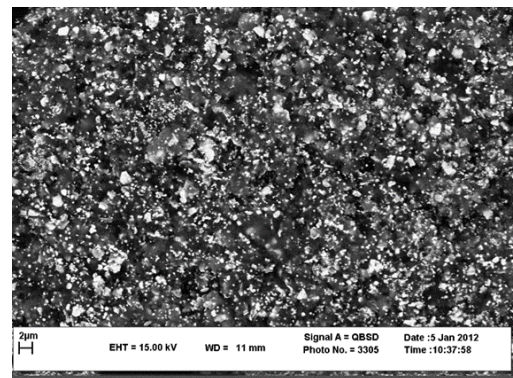
پس از خنک شدن، ۳۰۰ میلی‌لیتر اتانول، در ۱۰ میلی‌لیتر در دقیقه به‌منظور القا یا افزایش ویسکوزیته تیترا می‌شود. پس از تخلیه مایع رویی، رسوب جمع‌آوری می‌شود. برای تغلیظ بیشتر نمونه در ۹۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ می‌شود. سپس نمونه در ۲۵ میلی‌لیتر آب توسط فراصوت در دمای اتاق همگن می‌شود. محلول دوباره در ۹۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ می‌شود تا PAA اضافی حذف شود. این مرحله شستشو، در مجموع سه بار انجام می‌شود. محصول نهایی شسته شده در ۱۵ میلی‌لیتر آب پراکنده شده و از طریق فیلتر پلی کربنات ۱۰ میکرومتری فیلتر می‌شود. هیدروکسی اتیل سلولز (HEC) در مخلوط ۱:۱ آب و متانول و هم زدن در ۷۰ درجه سانتیگراد تا زمانی که مایع شفاف تشکیل شود، اضافه می‌شود. محلول تا دمای اتاق خنک شده و از طریق فیلتر تفلون ۵ میکرومتری فیلتر می‌شود. محلول HEC به جوهر نقره اضافه می‌شود تا نسبت وزنی HEC به نقره ۳:۱۰۰ موردنظر حاصل شود. این مخلوط با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳ دقیقه توسط مخلوط کننده‌ها هموزنیزه می‌شود و اجازه داده می‌شود تا در هوا خشک شود تا زمانی که یک ماده جامد بین ۳۵-۶۵ درصد وزنی نقره به دست آید.

۵- پارامترهای ارزیابی مشخصات جوهر رسانا

در ادامه برخی از پارامترهای ارزیابی مشخصات جوهر رسانا بر پایه نانو ذرات نقره و روش‌های اندازه‌گیری این پارامترها بررسی می‌شوند.

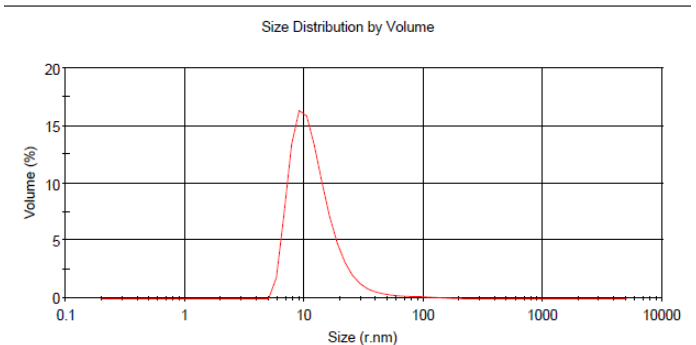
۵-۱- اندازه و مورفولوژی نانو ذرات نقره

یکی از پارامترهای مهم ارزیابی جوهر رسانا، اندازه ذرات نقره موجود در آن است. هر چه اندازه ذرات کوچک‌تر باشد پایداری جوهر بیشتر محقق می‌شود. برای ارزیابی اندازه ذرات نقره از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده می‌شود. همچنین توزیع سایز نانو ذرات از روی تصاویر به دست آمده توسط نرم‌افزار imageJ ارزیابی می‌شود (شکل ۱). اندازه نانو ذرات نقره کرووی تولید شده در جوهر رسانا حدود ۷ نانومتر است. مورفولوژی نانو ذرات سنتز شده توسط دستگاه تصویربرداری الکترونی روبشی SEM انجام می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶. تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی از بافت جوهر رسانای حاوی نانو ذرات نقره

همانند نتایج حاصل از TEM، مورفولوژی ذرات را به صورت کرووی نشان می‌دهد. علاوه بر این، با استفاده از دستگاه آنالیز سایز با روش پراکندگی نوری دینامیکی (DLS) توزیع سایز نانو ذرات مورد تأیید قرار می‌گیرد که همخوانی خوبی با نتایج حاصل از تصویربرداری‌ها دارد (شکل ۷).



شکل ۷. آنالیز پراکندگی نوری دینامیکی از جوهر رسانای حاوی نانو ذرات نقره

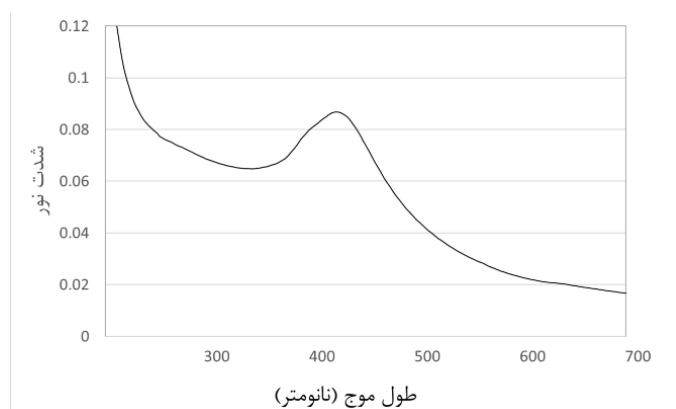
نانومتر است [۳۶]. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، از طیف جذبی مشخص است که حداکثر طول موج جذب از ۴۳۰ نانومتر به ۴۰۷ نانومتر کاهش داشته است. این جابه‌جایی آبی به دلیل اندازه کوچک نانو ذرات نقره است؛ که تطبیق خوبی با نتایج حاصل از آنالیزهای مرتبط با تعیین اندازه ذرات (DLS و TEM) دارد. طبق نظریه کوانتومی نانو ذرات فلزی، حداکثر طول موج جذب با انرژی نوار رسانایی مرتبط است. با دریافت انرژی فوتون نور فرابنفش با حداکثر طول موج جذب، الکترون‌های رسانا تحریک‌های کوانتومی درون باندهای فراتر از سطح انرژی فرمی (Fermi) را تجربه می‌کنند که از آن نوار رسانایی نانو ذرات فلزی تعریف می‌شود. برای اندازه ذرات کوچک‌تر، تعداد اتم‌های کمتری ذره را تشکیل می‌دهند و بنابراین جاذبه پتانسیل بین الکترون‌های رسانا و یون‌های فلزی ذره را کاهش می‌دهند. به این ترتیب انرژی نوار رسانایی برای ذره کوچک‌تر افزایش می‌یابد. برعکس، برای اندازه ذرات بزرگ‌تر، تعداد زیادی اتم ذره را تشکیل می‌دهند، بنابراین جاذبه بالقوه بین الکترون‌های رسانا و یون‌های فلزی افزایش می‌یابد و بنابراین انرژی نوار رسانایی نانوذره فلزی کاهش می‌یابد.

انرژی نوار رسانایی، E_{cb} برحسب الکترون-ولت را می‌توان مستقیماً از طیف جذب مرئی UV با استفاده از معادله انرژی فوتون انیشتین محاسبه کرد:

$$E_{cb} = hc/\lambda_{max}$$

که در آن λ_{max} ، حداکثر طول موج جذب است، h ثابت پلانک و c سرعت نور است.

به همان نسبت که فرکانس و عرض جذب وابسته به شکل و اندازه‌ی نانو ذرات فلزی است، به ثابت دی‌الکتریک محیط هم وابسته است. ثابت دی‌الکتریک محیط به شدت بر جابجایی قله جذب پلاسمایی نانو ذرات نقره تأثیر گذارند؛ بنابراین، اختلاف در طول موج جذب جوهر ساخته شده به لایه پلیمری پوشش داده شده در جوهر رسانا نیز مربوط می‌شود (شکل ۸).

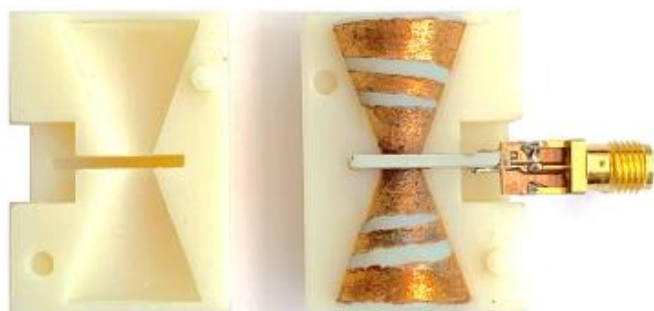


شکل ۸. اسپکتروفوتومتر جذبی از جوهر رسانای حاوی نانو ذرات نقره

۵-۲- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی جوهر رسانا

هدایت الکتریکی عکس مقاومت ویژه بوده و نشان‌دهنده‌ی توانایی ماده در عبور جریان الکتریکی است. معمولاً این کمیت را با σ نشان داده و با واحد Sm اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در حالت مایع و به‌وسیله‌ی هدایت سنج انجام می‌شود. از آنجاکه جوهر رسانا ویسکوزیته بالایی

طیف جذب نوری معمولاً توسط اسپکتروفوتومتر مرئی UV تعیین می‌شود. عملکرد جذب مرئی- ماوراء بنفش بر اساس اندازه‌گیری شدت دو پرتو ارسالی است که یک پرتو از نمونه و دیگری از مرجع منتقل می‌شود. به منظور بررسی حضور نانو ذرات نقره، طیف جذب در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. حداکثر طول موج جذب برای نانو ذرات نقره حدود ۴۳۰



شکل ۹. پروتوتایپ نمونه سه‌بعدی با بهره‌گیری از چاپ جوهر رسانا روی کاغذ چسب‌دار [۳۷].

دارد، باید هدایت الکتریکی آن را پس از چاپ روی لایه اندازه گرفت. برای این منظور، ابتدا مقاومت ویژه را اندازه‌گیری کرده و سپس مقدار به‌دست‌آمده را معکوس می‌کنند. برای این منظور، جوهر رسانا با قطره‌چکان بر روی کاغذی مستطیل شکل با طول ۲cm و عرض ۱cm بر روی کاغذ کشیده شد. ضخامت لایه جوهر رسانا توسط میکروسکپ نوری اندازه‌گیری و برابر با μm ۳.۳۴ به دست آمد. سپس طرح چاپ شده پس از خشک شدن در دمای اتاق، به مدت ۱۵ دقیقه، در اجاق خلأ قرار گرفت. هدایت الکتریکی متوسط اندازه‌گیری شده برابر با $4.4 \times 10^7 \text{ s/m}$ است.

جدول ۲. مقادیر مقاومت ویژه و هدایت الکتریکی سیال رسانا

هدایت الکتریکی s/m	مقاومت ویژه (Ωm)
4.423×10^7	2.2609×10^{-10}
4.481×10^7	2.2316×10^{-10}
4.301×10^7	2.3250×10^{-10}
4.348×10^7	2.2999×10^{-10}
4.444×10^7	2.2502×10^{-10}
4.410×10^7	2.2675×10^{-10}
4.399×10^7	2.2732×10^{-10}

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، هدف طراحی و ساخت مواد آنتن‌های مطلوب RFID جهت موقعیت‌یابی است. موقعیت‌یابی یکی از اصول امنیت و نظم در یک سازمان است. هرچند کنترل نیروهای حفاظت در سازمان برای همین امر است، لیکن کنترل مکانیزه اهمیت و کاربرد خاص خود را دارد. طراحی و ساخت جوهر رسانا بر پایه نانو ذرات نقره به‌عنوان ماده انعطاف‌پذیر با قابلیت جذب و تشعشع مناسب در طراحی سه‌بعدی آنتن و ارزیابی ویژگی‌های جوهر رسانای ساخته شده در این پژوهش، انجام شده است. در این امتداد بهره‌گیری از نانو ذرات نقره در طراحی ماده یاد شده مطالعه و ویژگی‌های ماده حاصل بنا به نتایج آزمایشگاهی ارزیابی و ارائه شده است. اندازه و مورفولوژی نانو ذرات نقره در جوهر رسانا حدود ۷ نانومتر و به‌صورت کروی است. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذبی، طیف جذب نور فرابنفش جوهر ساخته شده، در طول موج 410 nm به دست می‌آید که این امر نشان دهنده حضور نانو ذرات نقره است. همچنین، هدایت الکتریکی متوسط اندازه‌گیری شده برابر با 10^7 s/m است. 4.4×10^7 است.

مراجع

- [1] Liu, H. Darabi, H. Banerjee, P. Liu, J. *Survey of wireless indoor positioning techniques and systems*, IEEE Trans Sys Man Cybern, Vol. 37, no. 6, pp 1067–1080, 2007.
- [2] Li, J. Rossignol, F. Macdonald, J. *Inkjet printing for biosensor fabrication: combining chemistry and technology for advanced manufacturing*, J. Name. Vol. 00, pp 1-3, 2013.
- [3] Jung, K. Lee, S. *A systematic review of RFID applications and diffusion: Key areas and public policy issues*, J. Open Innov. Technol. Market, Complex. Vol. 1, no. 1, pp. 1-19, 2015.
- [4] Deschamps, G. *Impedance of an antenna in a conducting medium*, IRE Trans. Antennas Propag. Vol. 10, no. 5, pp. 648-650, 1962.
- [5] Basat, S. Tentzeris, M.M. Laskar, J. *Design and development of a miniaturized embedded UHF RFID tag for automotive tire applications*, in Proc. IEEE Int. Workshop Antenna Technol. Small Antennas Novel Metamater. Lake Buena Vista, FL, USA, Vol. 1, pp. 867-870, 2005.

۶- طراحی و مدلسازی آنتن

آنتن‌های سه‌بعدی با استفاده از فرآیند قلم روی کاغذ ساخته می‌شوند [۳۷]. به‌طور خاص، هشت بازوی پریچ‌وخم مخروطی (وزن = ۶۵۰ میلی‌متر، فاصله از مرکز به مرکز = ۱ میلی‌متر) توسط چاپگر رومیزی روی کاغذ چسب‌دار چاپ می‌شود و سپس نقره رسانا با قطره‌چکان روی خطوط راهنما با استفاده از جوهر نقره کشیده می‌شوند. سپس کاغذ برش داده می‌شود تا یک ساختار چرخ مانند شکل بگیرد که به‌طور مشابه روی سطح یک نیمکره شیشه‌ای توخالی (شعاع = ۱۲.۷ میلی‌متر) نصب می‌شود. آنتن سه‌بعدی با قرار دادن نیمکره طرح‌دار روی یک لایه لمینت با خطوط تغذیه مسی تکمیل می‌شود. آنتن نقره‌ای چاپ شده با اپوکسی رسانا به خطوط تغذیه متصل می‌شود (شکل ۹).

اندازه‌گیری ضریب بازتاب با استفاده از تحلیلگر شبکه برداری (E8363B, Agilent Technologies) انجام می‌شود. پس از ثبت مشخصات تشعشع آنتن، یک کلاهک ویلر روی آنتن قرار می‌گیرد و اتصال الکتریکی به صفحه زمین تضمین می‌شود. کلاهک ویلر یک جعبه فلزی است که تابش میدان دور آنتن را کوتاه می‌کند و امکان اندازه‌گیری جداگانه مکانیسم‌های تابش و تلفات را فراهم می‌کند. در این کار از انواع اندازه‌های کلاهک ویلر برای جلوگیری از تشدید حفره‌ای که منجر به اندازه‌گیری‌های اشتباه در محدوده‌های فرکانسی خاص می‌شود، استفاده می‌گردد. با استفاده از اندازه‌گیری‌های درپوش ویلر و فضای آزاد، بازده با استفاده از روش‌های موجود در مطالعات پیشین محاسبه می‌شود.

- [23] Allain, L.R. Askari, M. Stokes D.L. Vo-Dinh, T. Fresen. J. *Microarray sampling-platform fabrication using bubble-jet technology for a biochip system*, Anal. Chem. Vol. 371, 146-150, 2001.
- [24] Allain, L.R. Stratis-Cullum D.N. Vo-Dinh, T. *Investigation of microfabrication of biological sample arrays using piezoelectric and bubble-jet printing technologies*, Anal. Chim. Acta. Vol. 518, pp. 77-85, 2004.
- [25] Abe, K. Suzuki K. Citterio, D. *Inkjet-Printed Microfluidic Multianalyte Chemical Sensing Paper*, Anal. Chem. Vol. 80, pp. 6928-6934, 2008.
- [26] Woo, K. Jang, D. Kim Y. Moon, *Good ink-jet printability and particle-dispersion stability of inks are necessary for ink-jet printing in a particle-included dispersion*, J. Ceram. Int. Vol. 39, pp. 7015-7021, 2013.
- [27] MacBeath G. Schreiber, S.L. *Printing Proteins as Microarrays for High-Throughput Function Determination*, Science. Vol. 289, pp. 1760-1763, 2000.
- [28] Pond, S.F. Wnek, W.J. Doll P.F. Andreottola, M.A. *Inkjet Technology and Product Development Strategies*, ed. S. F. Pond, Torrey Pines Research, Carlsbad, CA, pp. 153-204, 2000.
- [29] Croucher M.D. Hair, M.L. *Design Criteria and Future. Directions in Inkjet Ink Technology*, Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 28, pp. 1712-1718, 1989.
- [30] Huang, Q. Zhu, Y. *Printing Conductive Nanomaterials for Flexible and Stretchable Electronics: A Review of Materials, Processes, and Applications*. Advanced Materials Technologies, Vol. 4 (5), pp. 1-41, 2019.
- [31] Ibrahim, N. Akindoyo, J. O. Mariatti, M. Recent development in silver-based ink for flexible electronics, Journal of Science: Advanced Materials and Devices, doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.09.002, 2021.
- [32] Dzisah, P. Ravindra, N. M. Modeling of Rheological Properties of Metal Nanoparticle Conductive Inks for Printed Electronics, 150th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, pp. 964-979, 2021.
- [33] Bouafia, A. Laouini, S. E. Ahmed, A. S. A. Soldatov, A. V. Algarni, H. Chong, K. F. Ali, G. A. M. The Recent Progress on Silver Nanoparticles: Synthesis and Electronic Applications, Nanomaterials, Vol. 11(9), pp. 2318, 2021.
- [34] Rezaga, B. F. Y. Balela, M. D. L. Chemical sintering of Ag nanoparticle conductive inks at room temperature for printable electronics, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 32, pp. 17764-17779, 2021.
- [35] Jang, S. Rahman, M. Effect of sintering atmospheres on printed silver nanoparticle patterns for flexible electronics application, Applied Physics A. Vol. 127, pp. 769, 2021.
- [36] Das, R. Nath, S.S. Chakdar, D. Gope, G. Bhattacharjee, R. *Synthesis of silver nanoparticles and their optical properties*, Journal of Experimental Nanoscience, Vol. 5, no. 4, pp. 357-362, 2010.
- [37] Vidal, N. Lopez-Villegas J. M. Romeu, J. Barenys, A.S. Garcia-Miquell, A. González-lópez, G. Jofre, L. *3D-Printed UHF-RFID Tag for Embedded Applications*, IEEE Access, Vol 8, pp. 146640-146647, 2020.
- [6] Jeong, S.H. Son, H.W. *UHF RFID tag antenna for embedded use in a concrete door*, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. Vol. 10, pp. 1158-1161, 2011.
- [7] Laheurte, J.M. Kabalan, A. Retima, H. Piedallu, E. Michelis, F. Lebental, B. *Embedded UHF RFID tag for durability monitoring in concrete*, Wireless Sensor Netw. Vol. 8, no. 7, pp. 137-144, 2016.
- [8] Romeu, J. Gonzalez-Lopez, G. Blanch, S. Jofre, L. *Antenna packaging for in-body applications*, in Proc. 14th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Copenhagen, Denmark, pp. 1-5, 2020.
- [9] Skrivervik, A.K. *Implantable antennas: The challenge of efficiency*, in Proc. 7th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), pp. 3627-3631, 2013.
- [10] Skrivervik, A.K. Merli, F. *Design strategies for implantable antennas*, in Proc. Loughborough Antennas Propag. Conf. pp. 1-5, 2011.
- [11] *Guest Editorial: Microwave components and antennas based on advanced manufacturing techniques*, IET Microw. Antennas Propag. Vol. 11, no. 14, pp. 1919-1920, 2017.
- [12] Sharma, S.K. Xin, H. Wu, B.I. Vardaxoglou, J. C. Chan, C.H. *Guest editorial special cluster on three-dimensional printed antennas and electromagnetic structures*, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. Vol. 17, no. 11, pp. 1998-2002, 2018.
- [13] Bjorgaard, J. Hoyack, M. Huber, E. Mirzaee, M. Chang, Y.H. Noghmanian, S. *Design and fabrication of antennas using 3D printing*, Prog. Electromagn. Res. C, Vol. 84, pp. 119-134, 2018.
- [14] Liang, M. Wu, J. Yu, X. Xin, H. *3D printing technology for RF and THz antennas*, in Proc. Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP), Okinawa, Japan, pp. 536-537, 2016.
- [15] Hue, P.L. *Progress and trends in ink-jet printing technology*, J. Imaging Sci. Technol. Vol. 42, pp. 49-62, 1998.
- [16] Magdassi, S. *The Chemistry of Inkjet Inks*, ed. S. Magdassi, World Scientific, Singapore, Ch. 2, pp. 19-42, 2009.
- [17] Chovancova, V. Pekarovicova A. Fleming, P.D. presented in part at the NIP & Digital Fabrication Conference, Digital Fabrication 2005 Final Program and Proceedings, Baltimore, MD, 2005.
- [18] Clay, K. Gardner, I. Bresler, E. Seal M. Speakman, S. *Direct legend printing (DLP) on printed circuit boards using piezoelectric inkjet technology*, Circuit World. Vol. 28, pp. 24-31, 2002.
- [19] Yun, Y.H. Kim, J.D. Lee, B.K. Yoo, B. Lee J.H. Cho, Y.W. Polym. Plast. Technol. Eng. Vol. 48, pp. 1318-1323, 2009.
- [20] Setti, L. Fraleoni-Morgera, A. Ballarin, B. Filippini, A. Frascaro D. Piana, C. *Biosens. Bioelectron. An amperometric glucose biosensor prototype fabricated by thermal inkjet printing*, Vol. 20, pp. 2019-2026, 2005.
- [21] Di Risio S. Yan, N. *Piezoelectric ink-jet printing of horseradish peroxidase: effect of ink viscosity modifiers on activity*, Macromol. Rapid. Commun. Vol. 28, pp. 1934-1940, 2005.
- [22] Zhmud B. Tiberg, F. *Surfactants in Polymers, Coatings, Inks and Adhesives*, ed. D. R. Karsa, Blackwell Publishing, England, Vol. 1, Ch. 8, pp. 1-31, 2003.

