



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

## Design and Optimization of an Adjustable and Dynamic Plasmonic Structure for a Narrow Band Sensor for Optical Refractive Index Detection

Azizmorad Valinasab<sup>1</sup>, PhD Student, Ali Mir<sup>1</sup>, Professor, Abbas Hamouleh-Alipour<sup>1,2</sup>, PhD, Vahid Mehrdad<sup>1</sup>, Associate Professor, Reza Talebzadeh<sup>1</sup>, Assistant Professor, Ali Farmani<sup>1</sup>, Associate Professor

<sup>1</sup> Department of Electrical and Electronics, Lorestan University, Khorramabad, Iran

<sup>2</sup> Engineering and R&D Manager of MIS Petrochemical industry Company, Khuzestan, Masjed-Soleyman, Iran

### Abstract:

In this research work, a plasmonic sensor based on metamaterial has been designed to measure the refractive index of materials. In this structure, a diagnostic resonator medium with rectangular receivers with different dimensions is used alternately and regularly in a ring to trap more of the field at the top and bottom of the metal-insulator-metal layered structure. The structure supports a resonant mode that leads to a sharp peak in the absorption spectrum, resulting in a sensor with a figure of merit of  $1321 (RIU^{-1})$  at a resonant wavelength of 8.35 GHz. All the steps of simulation and optimization of the proposed sensor have been done using commercial software CST Microwave studio and the effect of different parameters of changes in structure dimensions and changes in refractive indices on the absorption spectrum has been investigated. The proposed plasmonic sensor can be used to measure the refractive index and medical diagnosis with an extraordinary level of sensitivity equal to  $6400 (\mu m/RIU)$  and very high-quality index (283.7). This structure has a high degree of protection against manufacturing errors in the dimensions of the receivers as well as the corrosion of the diagnostic environment and for that reason, it is a potential and promising candidate for diagnostic applications and measuring the refractive index of materials.

**Keywords:** Refractive index, Plasmonic sensor, Metamaterials

**Received:** 9 August 2024

**Revised:** 1 November 2024

**Accepted:** 12 December 2024

**Corresponding Author:** Dr. Ali Mir, mir.a@lu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1128646>





## فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

## طراحی و بهینه‌سازی یک ساختار پلاسمونی تنظیم‌پذیر و پویا برای حسگر باند باریک تشخیص ضریب شکست نوری

عزیزمراد ولی نسب<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، علی میر<sup>۱</sup>، استاد، عباس حموله علی پور<sup>۲</sup>، دکتری تخصصی، وحید مهرداد<sup>۱</sup>، دانشیار، رضا طالب‌زاده<sup>۱</sup>، استادیار، علی فرمانی<sup>۱</sup>، دانشیار

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- مهندسی و تحقیق و توسعه شرکت صنایع پتروشیمی مسجدسلیمان، مسجد سلیمان، ایران

**چکیده:** در این مقاله به طراحی یک حسگر پلاسمونی مبتنی بر فرامواد برای سنجش ضریب شکست مواد پرداخته شده است، که در از یک محیط تشدیدگر تشخیصی با گیرنده‌های مستطیلی شکل با ابعاد متفاوت و متناوب درون حلقه‌ای برای جذب بیشتر میدان الکترومغناطیسی در قسمت‌های بالا و پایین ساختار لایه‌ای فلز-عایق-فلز استفاده شده است. ساختار با یک مد تشدید، منجر به یک قله تیز در طیف جذبی را پشتیبانی می‌کند و ضریب شایستگی  $1321 \text{ RIU}^{-1}$  در بسامد تشدید  $8/35$  گیگاهرتز را رقم می‌زند. تمامی مراحل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حسگر پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار تجاری CST Microwave studio انجام شده و تأثیر پارامترهای مختلف با تغییر در ابعاد ساختار و ضریب شکست بر روی طیف جذبی بررسی شده است. حسگر پلاسمونی پیشنهادی می‌تواند برای سنجش ضریب شکست و کاربردهای تشخیصی پزشکی با حساسیت فوق‌العاده  $6400 \text{ nm/RIU}$  و ضریب کیفیت بسیار بالای  $283/7$  مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این ساختار از درجه بالایی از اطمینان در برابر خطاهای حین ساخت در ابعاد گیرنده‌ها و خوردگی محیط تشخیصی برخوردار است و به همین دلیل یک نامزد بالقوه و امیدوارکننده برای کاربردهای تشخیصی و سنجش ضریب شکست مواد و کاربردهای پزشکی است.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب شکست، حسگر پلاسمونی، فرامواد.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی میر، mir.a@lu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1128646>



در سال‌های اخیر، تأکید قابل توجهی بر توسعه فناوری‌های سنجش پیشرفته قرار گرفته است که امکان تشخیص سریع و دقیق آنالیت‌های مختلف شیمیایی و زیستی<sup>۱</sup> را فراهم می‌کنند [۱]. در این بین، سنجش ضریب شکست به دلیل کاربردهای گسترده‌ای که در زمینه‌هایی از جمله پایش محیطی، تشخیص زیست پزشکی، ایمنی مواد غذایی و کنترل فرآیندهای صنعتی دارد، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۲]. ضریب شکست اطلاعات مفیدی درباره خواص نوری، ترکیب مولکولی، غلظت و حتی وضعیت فیزیکی یک ماده ارائه می‌دهد [۳]. در واقع، ضریب شکست پارامتر اساسی است که ویژگی‌های نوری ماده را مشخص می‌کند و به همین دلیل، توسعه حسگرهای حساس و قابل اعتماد برای تشخیص ضریب شکست به عنوان یک حوزه تحقیقاتی حیاتی تبدیل شده است [۴]. حسگرهای ضریب شکست مرسوم اغلب بر روش‌های حجیم و گران قیمت مانند بیضی‌سنجی<sup>۲</sup>، تداخل‌سنجی<sup>۳</sup> یا تزویج منشوری متکی بودند که این روش‌ها اگرچه موثر بوده و هستند، اما با محدودیت‌هایی مانند ساخت پیچیده، هزینه بالا و عدم قابلیت کوچک‌سازی روبه‌رو هستند [۵]. برای مقابله با این چالش‌ها، حسگرهای مبتنی بر پلاسمونیک به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده ظاهر شده‌اند که حساسیت، فشردگی و مقرون به صرفه‌تر بودن را ارائه می‌دهند [۶].

پلاسمونیک یک زمینه در حال تکامل در تقاطع فناوری نانو و فوتونیک است که از خواص نوری منحصر به فرد نانوساختارهای فلزی برای دست‌کاری نور در مقیاس نانو استفاده می‌کند. حسگرهای پلاسمونی از امکانات بالقوه‌ای برای تشخیص ضریب شکست استفاده می‌کنند [۷]. این حسگرها بر اساس تغییرات میدان الکترومغناطیسی پلاسمون‌ها در نزدیکی سطح فلزات مینا تشکیل می‌شوند. هنگامی که نور به ساختار وارد می‌شود، پلاسمون‌ها القا می‌شوند و میدان الکترومغناطیسی آنها تغییر می‌کند [۸]. این تغییرات می‌تواند به عنوان یک سیگنال قابل اندازه‌گیری استفاده شود تا ضریب شکست نمونه مورد نظر را تعیین کند [۹]. از جمله روش‌های مورد استفاده در حسگرهای پلاسمونی برای تشخیص ضریب شکست می‌توان به پلاریتون‌های پلاسمون سطحی (SPPs)<sup>۴</sup> اشاره کرد [۱۰]. در زمینه در حال رشد فوتونیک و فناوری نانو، پلاریتون‌های پلاسمون سطحی به عنوان یک راه امیدوارکننده برای توسعه افزاره‌های نوری بسیار حساس و کارآمد ظاهر شده‌اند [۱۱]. این امواج الکترومغناطیسی منحصر به فرد، که از جفت‌شدن نور با الکترون‌های آزاد در یک رابط فلز-دی‌الکتریک به دست می‌آیند، قابلیت‌های استثنایی برای دست‌کاری و تشخیص نور در مقیاس نانو ارائه می‌دهند [۱۲]. محققان با استفاده از خواص خارق‌العاده SPP، رویکردهای جدیدی را برای بهبود کارایی و حساسیت حسگرهای نوری مختلف، از جمله تشخیص ضریب شکست، بررسی کرده‌اند [۱۳].

یکی از روش‌های استفاده از این پدیده، ساختار جاذب پلاسمونی است [۱۴]. این ساختار شامل یک لایه فلزی نازک است که دارای الگوی نانوساختارهایی مانند نانولوله‌ها یا نانویک‌ها در اشکال مختلف هستند که تحریک SPPها را تسهیل می‌کنند. با تنظیم دقیق پارامترهای هندسی این نانوساختارها، می‌توان شرایط تشدید را دقیقاً کنترل کرد که منجر به افزایش محصورشدگی<sup>۵</sup> میدان و تعامل با محیط اطراف می‌شود [۱۵]. تغییرات حاصل در پاسخ نوری، مانند جذب یا پراکندگی، می‌تواند اندازه‌گیری شده، که با تغییرات ضریب شکست ارتباط داشته و یک ارزیابی کمی از نمونه مورد بررسی را ارائه می‌دهد [۱۶]. در سال ۲۰۱۳ دو ساختار متفاوت تک موجبری و دوکاناله‌ماخ‌زندری برای بررسی ضریب شکست مواد در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بررسی شد [۱۷]. این ساختارها شامل یک لایه طلا بین دو لایه دی‌الکتریک هوا و دی‌الکتریک با ضریب شکست  $n=1/47$  است. در این کار به میزان حساسیت  $300 \text{ RIU}^{-1}$  دست پیدا کردند. در سال ۲۰۲۴ در یک کار پژوهشی به بررسی یک حسگر ضریب شکست فلز-دی‌الکتریک-فلز در ناحیه فروسرخ پرداخته شد [۱۸]. این حسگر از مزیت چند حالت بر خوردار است و برای طراحی از درایه‌ای از بلوک‌های مربعی به عنوان محیط سنجش بهره جستند و حساسیت‌های متفاوتی در مدهای مختلف (۱۲۸۷ - ۵۲۵ nm/RIU) و ضریب شکست نهایی  $375 \text{ RIU}^{-1}$  دست یافتند. برای این حسگر امکان تشخیص غلظت‌های متفاوت گلوکز و هموگلوبین و پاسخ‌دهی سریع را دارد. در این زمینه طرح‌های مختلفی برای تشخیص ضریب شکست‌های متفاوت در زمینه‌های گوناگون بررسی و شبیه‌سازی شده است [۱۹-۲۳]. علی‌رغم پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، تاکنون پژوهشی که به‌طور خاص به بررسی عدم تأثیر خوردگی محیط سنجش حسگر بر درستی جواب‌ها و نیز از بین رفتن بخشی از محیط سنجشی در فرآیندهای آزمون و بررسی نمونه بپردازد انجام نشده است. لذا پژوهش حاضر درصدد بررسی موارد مذکور است. علاوه بر این، ساختار پیشنهادی برای ضریب شکست‌های در محدوده بسیار بزرگ ( $N=1-2/5$ ) و با گام‌های بسیار





ریز تغییرات ضریب شکست در حد  $\Delta n = 0.05$  در طول موج میلی‌متری که در حیطه نظامی، فضایی و پزشکی بسیار کاربردی و مفید است طراحی و ساخته شده و این نوآوری دیگر این پژوهش است.

در یک حسگر تشخیص ضریب شکست بر اساس ساختار جاذب پلاسمونی، نانوساختارها بر روی یک بستر ساخته شده و با سازوکارهای انتقال مناسب ادغام می‌شوند [۲۴]. هنگامی که نور به حسگر تابیده می‌شود، نانوساختارهای پلاسمونی با میدان الکترومغناطیسی تعامل می‌کنند و در نتیجه نور در طول موج SPP جذب می‌شود [۲۵]. موقعیت و شدت پیک جذب به شدت به ضریب شکست محیط اطراف بستگی دارد [۲۲]. با نظارت بر تغییرات در طیف جذب، چه از نظر تغییر در طول موج قله یا تغییر در شدت قله، می‌توان تغییرات ضریب شکست محیط مورد بررسی را تعیین کرد [۲۶].

بنابراین، طراحی و شبیه‌سازی حسگر تشخیص ضریب شکست بر اساس ساختار جاذب پلاسمونی به عنوان هدف این پژوهش، از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارتی، ضرورت انجام تحقیق در این زمینه از عوامل متعددی ناشی می‌شود. در مرحله اول، توسعه یک ساختار سنجش فشرده و قابل اعتماد با حساسیت و ویژگی بالا برای کاربردهای مختلف در تجزیه و تحلیل شیمیایی و زیستی ضروری است [۲۷]. با بهره‌گیری از خواص منحصر به فرد نانوساختارهای پلاسمونی، می‌توان به قابلیت‌های تشخیص مقیاس زیر طول موج دست یافت که امکان تشخیص تغییرات جزئی در ضریب شکست را فراهم می‌کند [۲۸]. دوم اینکه ساختار جاذب پلاسمونی پیشنهادی مزایای قابل توجهی نسبت به حسگرهای ضریب شکست معمولی از نظر سادگی ساخت، مقرون‌به‌صرفه بودن و سازگاری با افزاره‌های نوری یکپارچه ارائه می‌دهد [۲۹]. استفاده از روش‌های استاندارد نانوساخت، مانند لیتوگرافی پرتو الکترونی یا لیتوگرافی نانواپمپنت، امکان تولید انبوه حسگرهای پلاسمونی را با هزینه نسبتاً کم فراهم می‌کند [۳۰]. علاوه بر این، ترکیب حسگرهای پلاسمونی با موجبرهای نوری، مدارهای فوتونیک یا سامانه‌های میکروسیال، راه را برای توسعه سازه‌های آزمایشگاهی روی تراشه هموار می‌کند و امکان نظارت در محل و زمان واقعی را در محیط‌های مختلف فراهم می‌کند [۳۱]. علاوه بر این، توانایی شبیه‌سازی دقیق رفتار ساختارهای جاذب پلاسمونی برای بهینه‌سازی عملکرد حسگر، درک سازوکارهای فیزیکی زیربنایی و هدایت طراحی آزمایشی بسیار مهم است [۳۲]. از طریق مدل‌سازی محاسباتی و شبیه‌سازی، می‌توان هندسه‌ها، مواد و شرایط عملیاتی مختلف را کشف کرد که منجر به شناسایی پیکربندی‌های حسگر بهینه می‌شود [۳۳]. این تلاش تحقیقاتی به درک اساسی پدیده‌های پلاسمونی کمک می‌کند و راه را برای توسعه نسل بعدی دستگاه‌های سنجش ضریب شکست هموار می‌کند [۳۴]. در نتیجه، ضرورت انجام تحقیقات در مورد طراحی و شبیه‌سازی حسگر تشخیص ضریب شکست بر اساس ساختار جاذب پلاسمونی ناشی از تقاضا برای فناوری‌های سنجش فشرده، حساس و مقرون‌به‌صرفه است [۳۵]. خواص منحصر به فرد ارائه شده توسط نانوساختارهای پلاسمونی، همراه با مزایای ساختار جاذب، راه‌های جدیدی را برای توسعه حسگرهای ضریب شکست پیشرفته باز می‌کند [۳۶]. این تحقیق با بهره‌گیری از قدرت نانوفناوری، مدل‌سازی محاسباتی و حوزه سنجش پلاسمونی، تحقق سکوه‌های تشخیص ضریب شکست برای کاربردهای مختلف را نشان می‌دهد [۳۷].

بنابراین، در این مقاله، ما یک مطالعه در مورد طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر تشخیص ضریب شکست بر اساس ساختار جاذب پلاسمونی با بهره‌برداری از خواص منحصر به فرد SPP ارائه می‌کنیم [۳۸]. هدف طراحی حسگر پیشنهادی ما دستیابی به حساسیت بالا و دامنه پویایی گسترده است که امکان تشخیص دقیق تغییرات جزئی در ضریب شکست محیط اطراف را فراهم می‌کند [۳۹]. درواقع، ادغام SPP با جاذب‌های پلاسمونی پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای افزایش حساسیت و انتخاب حسگرهای نوری دارد و راه‌های جدیدی را برای کاربردها در زمینه‌های مختلف از سنجش زیستی و شناسایی سرطان گرفته [۴۰، ۴۱] تا نظارت بر محیط باز می‌کند [۴۲]. بینش‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه، پایه محکمی برای پیاده‌سازی‌های آزمایشی آینده فراهم می‌کند و راه را برای تحقق حسگرهای ضریب شکست بسیار کارآمد و فشرده هموار می‌کند.



## ۲- طراحی و تجزیه و تحلیل ساختار

### ۱-۲- تحلیل نظری

با تابش امواج الکترومغناطیسی با قطبش طولی<sup>۶</sup> به گونه‌ای که باعث بازتاب داخلی کلی شود تحریک‌های الکترومغناطیسی پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPP) شکل می‌گیرد که با تجمع الکترون‌های آزاد نوسانی در سطح فلزات تزویج شده و می‌توانند به صورت طولی در سطح تقاطع فلز دی‌الکتریک انتشار یابند. تمرکز میدان الکترومغناطیسی، کاهش حد پراش و گسترش و تقویت میدان‌های تا چندین مرتبه فراتر از میدان‌های موضعی باعث محصورسازی مدهای انتشاری الکتریکی و مغناطیسی عرضی (TE و TM) عمود بر جهت انتشار می‌شود. معادله موج میدان الکتریکی با فرض محیط غیرمغناطیسی همه‌سویکسان، همگن و با ثابت دی‌الکتریک  $\epsilon(\omega)$  به صورت زیر بیان می‌شود [۴۳]:

$$\Delta E = \frac{\epsilon(\omega)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (۱)$$

که در آن میدان الکتریکی به صورت زیر است:

$$E(r, t) = E_0 e^{-i\omega t} \exp[i(k_x x + k_z z)] \quad (۲)$$

با اقتباس از تعریف بردار موج معادله پخش<sup>۷</sup> به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$|K(\omega)|^2 = k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \epsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} = \epsilon k_0^2 \quad (۳)$$

با فرض محصورشدگی و انتشار در جهت X-Z و عدم تغییر بردار موج در جهت Y برای بررسی انتشار امواج در دو ساختار فلز دی‌الکتریک-فلز و دی‌الکتریک-فلز دی‌الکتریک با لایه میانی چند ده نانومتری (با در نظر گرفتن طول موج پرتو تحریک‌کننده) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$k_z^2 + k_x^2 = \epsilon k_0^2 \Rightarrow k_z = \sqrt{\epsilon k_0^2 - k_x^2} \quad (۴)$$

با در نظر گرفتن جمع آثار امواج صفحه‌ای پرتو نور رابطه پخش برای یک موج صفحه‌ای با بسامد  $\omega$  در یک محیط دی‌الکتریک با ضریب شکست  $n$  و با فرض رابطه زیر را خواهیم داشت که در تشابه با سطح فرمی یک الکترون در داخل جامد بلورین سطح عدد موج را مشخص می‌کند:

$$K(\omega) = \sqrt{(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)} = \frac{n^2 \omega^2}{c^2} = \epsilon \mu \frac{\omega^2}{c^2} = n^2 k_0^2 \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن سطح عدد موج در فضای  $k$  بعدی و رابطه عدم قطعیت هایزنبرگ، رابطه حد پراش و کمترین مقدار اندازه شعاعی پرتویی که از جمع آثار امواج نوری سه بعدی ایجاد می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda_0 = 4n * \Delta r_{min3D} \quad (۶)$$

با حد پراش به سراغ امواج نوری با ابعاد پایین (مثل امواج دوبعدی، تک‌بعدی یا صفربعدی) می‌رویم. نمونه‌ای از این امواج، میدان ناپایدار ایجاد شده در سطح دی‌الکتریک با بازتاب داخلی کامل یا امواج سطحی انتشار یافته در امتداد سطح مشترک دی‌الکتریک و فلز است که به همان پلاسمون‌های سطحی که بیان شد، تعبیر می‌شوند و از تزویج موج الکترومغناطیسی با پلاسمون‌های سطحی ایجاد می‌شوند. لذا در این کار پژوهشی برای کاهش حد پراش امواج نوری با ابعاد پایین از امواج سطحی منتشره در سطح مشترک فلز دی‌الکتریک که همان پلاسمون‌های سطحی هستند استفاده می‌کنیم.

فلز به کار رفته در اینجا نقره است که می‌توان ضریب گذردهی نسبی آن را با مدل درود توصیف کرد [۴۴].

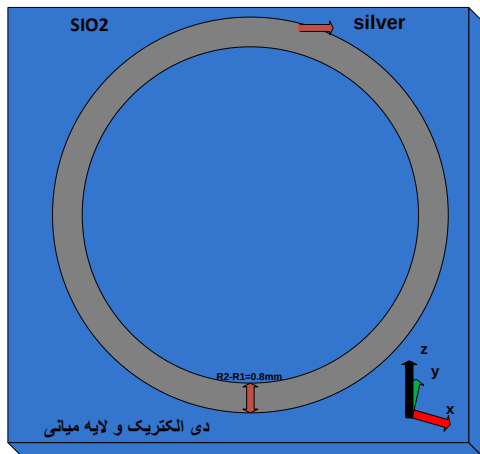
$$\epsilon_m(\omega) = \frac{\epsilon_\infty(\omega^2 - \omega_j \gamma) - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_j \gamma} \quad (۷)$$

که در آن  $\omega_p$ ،  $\omega$ ،  $\epsilon_\infty$  و  $\gamma$  به ترتیب بسامد پلاسما، بسامد زاویه‌ای، ضریب گذردهی دی‌الکتریک در بسامد بی‌نهایت و ضریب میرایی ماده هستند و بسامدهای تشدید ساختار حلقه و پارامترهای الکتریکی مشخص را می‌توان از حل معادلات بالا به دست آورد.

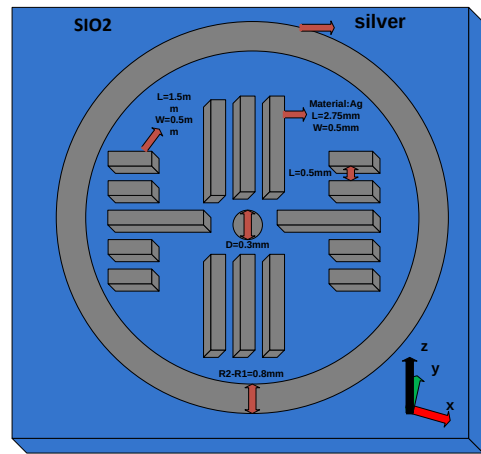
### ۲-۲- ساختار و مشخصات افزاره

شکل (۱) نمای بالایی و زیرین ساختار را نشان می‌دهد. ساختار به طور کلی از سه لایه فلز-دی‌الکتریک-فلز ایجاد شده است. جنس فلز نقره و دی‌الکتریک میانی، شیشه با ضریب گذردهی ۲/۱۳۱۶ است. جنس قسمت‌های مختلف ساختار، در شکل بیان شده است.





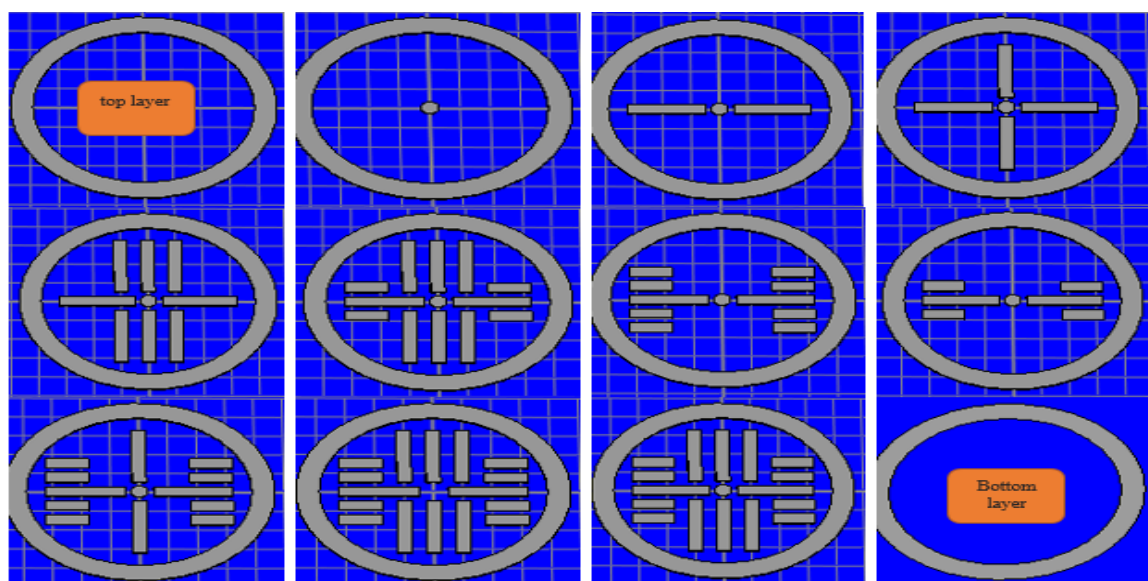
(ب)



(الف)

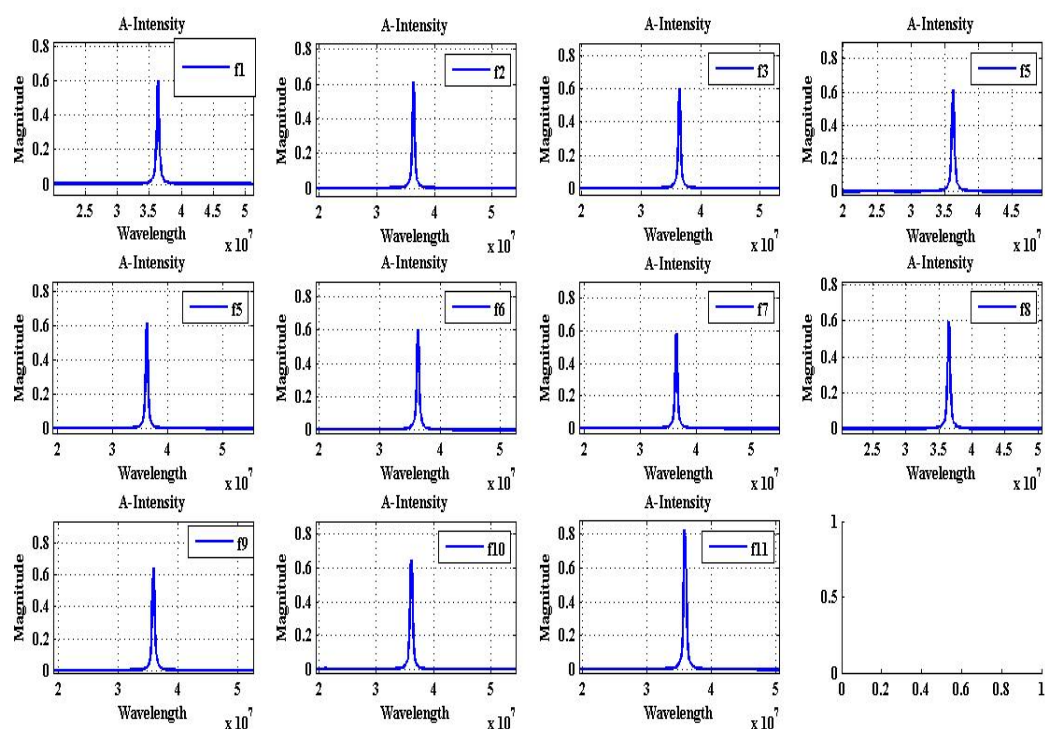
شکل (۱): (الف) لایه‌های ساختار، (ب) نمای بالایی ساختار، (ب) نمای زیرین ساختار

روند شکل‌گیری ساختار در شکل (۲-الف) و طیف جذبی با تاکید بر قله‌های جذب در شکل (۲-ب) نمایش داده شده است. قله جذب در ساختار نهایی، برابر  $0.83/\mu\text{m}$  است. ساختار پیشنهادی بر اساس یک حلقه تشدیدگر ساده که در درون آن یک آرایه متناسب و متناوب از نانو گیرنده‌های فلزی به صورت ۴ بخش که دوه‌دو متقارن هستند و حول یک نانو دیسک که در مرکز حلقه قرار گرفته‌اند ارائه شده است. در این ساختار ما برای ایجاد تشدیدگر از یک ساختار به شکل ساختار آنتن هوایی تلویزیون استفاده کردیم، یک نانو دیسک در وسط ساختار برای ما مفهوم پایه<sup>۱</sup> آنتن را ایجاد کرده است. در بالا و پایین نانو میله دو دسته سه‌تایی نانو گیرنده مستطیلی شکل بلند با طول و عرض به ترتیب  $3/75$  در  $0.5$  میلی‌متر شانه‌مانند ایجاد شده است که بازتابنده‌هایی<sup>۱</sup> بسیار قوی را به همراه نانو میله وسطی ایجاد می‌کنند. در طرفین این محیط بازتابی و بوجود آورنده میدان مغناطیسی، نانو گیرنده‌هایی برای به دام انداختن بیشتر امواج، به کار گرفته شده است. هدایت‌کننده‌ها با ابعاد طول و عرض به ترتیب برابر با  $2/5$  در  $0.5$  میلی‌متر است که به صورت کاملاً متقارن، ۲ عدد در بالا و ۲ عدد در پایین شاخه اصلی که نانو گیرنده‌هایی بازتابی هستند قرار گرفته‌اند. این بخش از تشدیدگر باعث ایجاد مرکز بالای میدان مغناطیسی در این دو ناحیه به صورت متقارن، در دو طرف بخش بازتابی می‌شود. در واقع این بخش مهم با جداسازی میدانی قسمت بازتابنده، به کمک حلقه‌هایی که در بالا و پایین قسمت دی‌الکتریک تعبیه شده، یک دو قطبی بسیار قوی ایجاد می‌کند.



(الف)

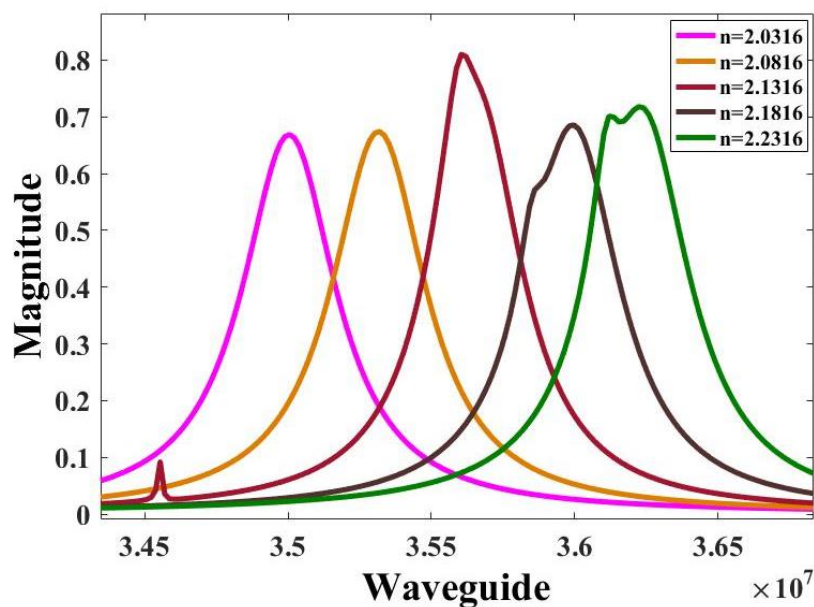




(ب)

شکل (۲): (الف) روند بهینه‌سازی ساختار (ب): شدت قله جذبی برای مراحل مختلف بهینه‌سازی بخش تشدیدگر ساختار

برای ضرایب متفاوت دی‌الکتریک با مقادیر  $\epsilon_r = 1/8316 - 2/3316$  (به ترتیب آلومینای متخلخل -  $Al_2O_3$ ، منیزیم‌فلوراید  $MgF_2$ ، مولیبدن‌دی‌سولفاید  $MoS_2$ ، شیشه  $(SiO_2)$ ، Taconic TLY-5 و تنگستن‌دی‌سولفید -  $WS_2$ ) با گام‌های ۰/۱، بررسی و طیف جذبی در شکل (۳) نشان داده شده است.

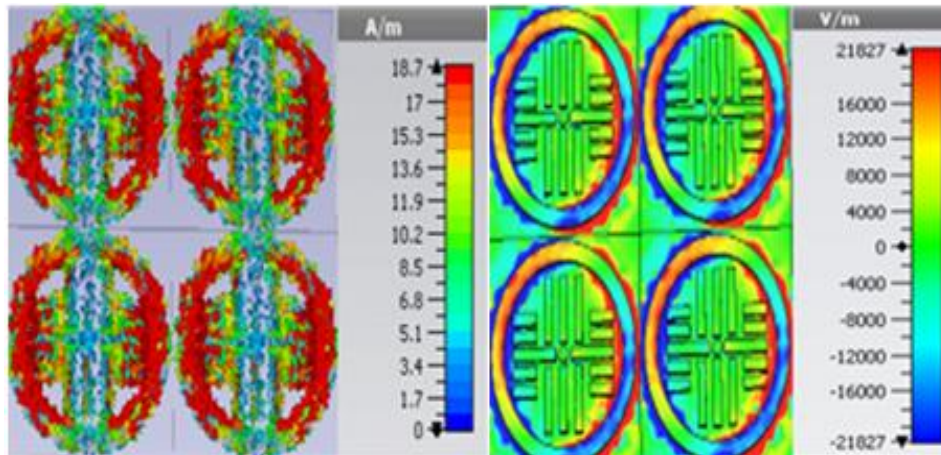


شکل (۳): نمودار شدت جذب در ضرایب شکست‌های متفاوت بر حسب طول موج





شدت میدان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی و دو قطبی‌های ایجاد شده در حلقه و نانو دیسک، در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): دوقطبی ایجاد شده توسط ساختار، شدت میدان مغناطیسی (چپ)، شدت میدان الکتریکی (راست)

این ساختار برای مقادیر متفاوت محیط دی‌الکتریک با در نظر گرفتن تغییرات محیطی کاملاً مناسب بوده و پاسخ بهینه با بالاترین شدت، برای محیط دی‌الکتریک شیشه رقم می‌خورد. برای تحلیل و بررسی بیشتر ساختار محیط دی‌الکتریک با گام‌های کوچک‌تر ۰/۰۵ با تغییرات طول موجی در حدود ۳۰ نانومتر در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): وابستگی مدهای تشدید جذبی به تغییر پارامترهای هندسی ساختار پیشنهادی

| ضریب شایستگی<br>(RIU <sup>-1</sup> ) | میزان حساسیت<br>(nm/RIU) | جابجایی قله<br>تشدید (nm) | بسامد تشدید<br>(GHz) | طول موج تشدید<br>(nm) | بیشینه شدت | ضریب شکست<br>سطح |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|------------|------------------|
| ۱۲۰۸                                 | ۳۴/۴۸                    | ۲۹۰۰۰                     | ۸/۶۸۳۰               | $3/4550 \times 10^7$  | ۰/۶۱۹      | ۱/۸۸۱۶           |
| ۱۲۲۶                                 | ۳۴/۷۲                    | ۲۸۸۰۰                     | ۸/۶۱۰۴               | $3/4840 \times 10^7$  | ۰/۶۴۳      | ۱/۹۳۱۶           |
| ۱۲۷۳                                 | ۳۴/۴۸                    | ۲۹۰۰۰                     | ۸/۵۴۰۰               | $3/51281 \times 10^7$ | ۰/۶۴۴      | ۱/۹۸۱۶           |
| ۱۲۵۶                                 | ۱۱/۳۳                    | ۳۰۲۰۰                     | ۸/۴۷۰۱               | $3/54181 \times 10^7$ | ۰/۶۸۰      | ۱/۰۳۱۶           |
| ۱۲۷۱                                 | ۱۲/۳۴                    | ۲۹۳۰۰                     | ۸/۴۰۰۴               | $3/5712 \times 10^7$  | ۰/۶۵۲      | ۲/۰۸۱۶           |
| ۱۰۴۵                                 | ۳۳/۰۰                    | ۳۰۳۰۰                     | ۸/۳۳۰۳               | $3/6013 \times 10^7$  | ۰/۸۲۰      | ۲/۱۳۱۶           |
| ۱۳۱۶                                 | ۳۲/۲۵                    | ۳۱۰۰۰                     | ۸/۲۶۰۷               | $3/63161 \times 10^7$ | ۰/۶۶۶      | ۲/۱۸۱۶           |
| ۱۳۱۳                                 | ۳۱/۵۴                    | ۳۱۷۰۰                     | ۸/۱۹۰۷               | $3/66261 \times 10^7$ | ۰/۶۸۳      | ۲/۲۳۱۶           |
| ۱۳۲۱                                 | ۳۱/۲۵                    | ۳۲۰۰۰                     | ۸/۱۲۰۵               | $3/69431 \times 10^7$ | ۰/۶۸۵      | ۲/۲۸۱۶           |
| ۱۲۴۶                                 | ۳۲/۷۸                    | ۳۰۵۰۰                     | ۸/۰۵۰۴               | $3/7265 \times 10^7$  | ۰/۶۹۲      | ۲/۳۳۱۶           |

در ادامه نشان خواهیم داد که طول موج تشدید به ضریب شکست ماده در نانو تشدیدگر بستگی دارد و بنابراین، ضریب شکست را می‌توان با استفاده از طول موج تشدید به دست آورده، و ماده را تشخیص داد.

## ۳-۲- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل

پاسخ طیفی حسگر طراحی شده مبتنی بر تشدیدگر حلقه‌ای با اسلات آنتن‌های مستطیلی در اندازه‌های متفاوت و متناوب محاط شده و به مرکزیت یک نانو دیسک با استفاده از روش FDTD و نرم‌افزار CST با شرایط مرزی PML لایه‌های هم‌سو و تطبیق یافته و منبع نور با موج صفحه‌ای تخت با راستای انتشار Z محاسبه شده است. در ادامه برای بررسی چگونگی عملکرد حسگر پیشنهادی میزان حساسیت حسگر (SS)، یعنی میزان تغییرات دامنه به تغییرات ضریب شکست و ارتباط آن با میزان ضریب شایستگی (FOM) به صورت زیر محاسبه گردیده است [۴۵].

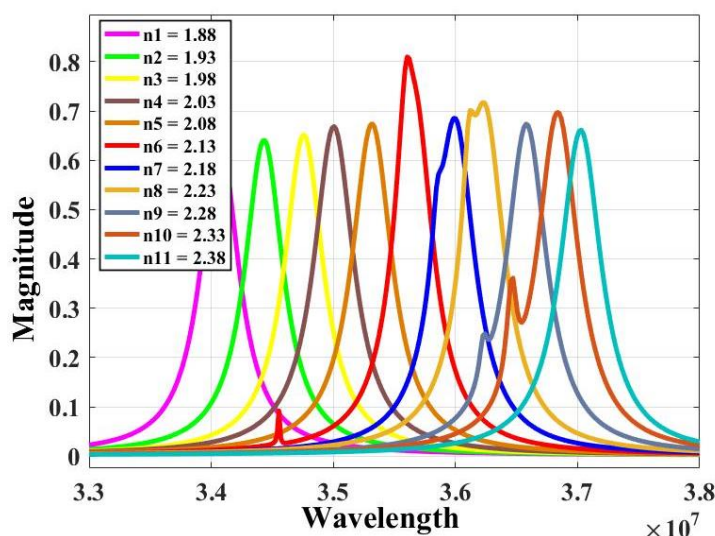
$$ss(mm/RIU) = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = FOM(RIU^{-1}) * FWHM \quad (۸)$$







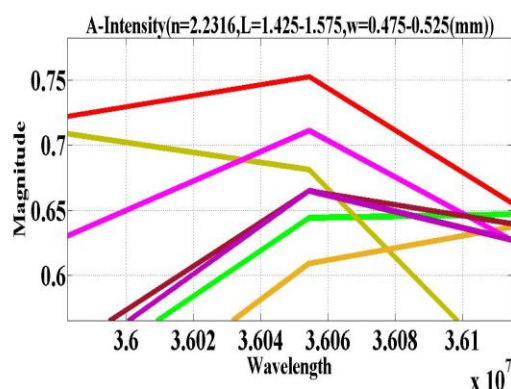
که در آن  $\Delta\lambda$  میزان جابجایی طول موج تشدید در ساختار و  $\Delta n$  میزان تغییرات ناشی از تغییر ضریب شکست محیط سنجش مورد استفاده است. در نهایت  $FWHM$  نیز بیانگر میزان پهنای پیک در نیمه مقدار بیشینه در طیف جذبی ساختار است.



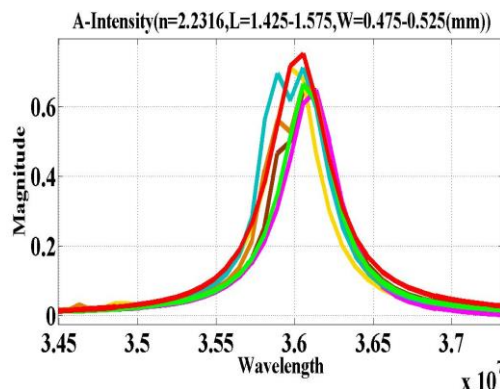
شکل (۵): نمودار جذب در ضریب شکست‌های متفاوت بر حسب طول موج با در نظر گرفتن فضای بین دو بخش فلزی در بالا و پایین ساختار به عنوان محیط سنجش.

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شد ساختار از یک نانو تشدیدگر حلقوی در بالا و پایین ساختار در دو حالت متفاوت استفاده شده است. حالت اول اینکه محیط دی‌الکتریک قرار گرفته بین محیط تشدیدگر بالا و پایین، یعنی محیط سنجش با بررسی ضرایب دی‌الکتریک  $\epsilon_r = 1/8316$  تا  $\epsilon_r = 2/2316$  با مرکزیت شیشه ( $SiO_2$ ) با ضریب شکست  $n = 1/46$  ( $\epsilon_r = 2/1316$ ) و اختلاف گام  $\Delta n = 0/1$  مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از نکات قابل توجه ساختار این است که با تغییر حدود ۵ درصدی در ابعاد اسلات‌های داخلی حلقه تشدیدگر و حلقه محاط‌کننده ناحیه تشدیدگر در بالا و پایین ساختار، پاسخ‌های ساختار ثابت باقی مانده و فقط شدت ساختار به میزان ۰/۲ کاهش می‌یابد. شکل ۶ (الف و ب) شدت طیف جذبی را برای ابعاد مختلف گیرنده‌های تعبیه شده در محیط تشدیدگر برای طول‌های  $L = 2/5 - 2/95$  میلی‌متر را با فاصله گام ۵۰ میکرومتر نشان می‌دهد. در این شکل‌ها مشخص است با افزایش طول گیرنده‌ها، موقعیت حالت‌های تشدید به مرکزیت طول موج ۳۶ میلی‌متر برای ضریب شکست  $\Delta n = 1/46$  با فاصله حداکثر ۳ میکرومتر تغییر پیدا می‌کند اما این تغییر طول موجی برای تغییر ابعاد تا ۵ درصد مقدار طول گیرنده (۱۳۷ میکرومتر) به قدری کوچک است (کمتر از ۳ میکرومتر) که می‌توان نتیجه گرفت پاسخ‌های ساختار با توجه به محدودیت‌ها و خطاهای ساخت قطعه از اعتبار بالایی برخوردار هستند.

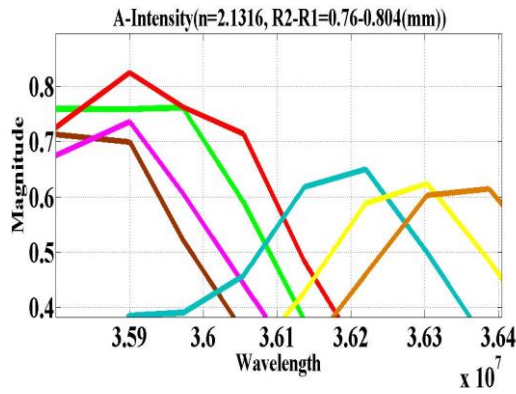


(ب)

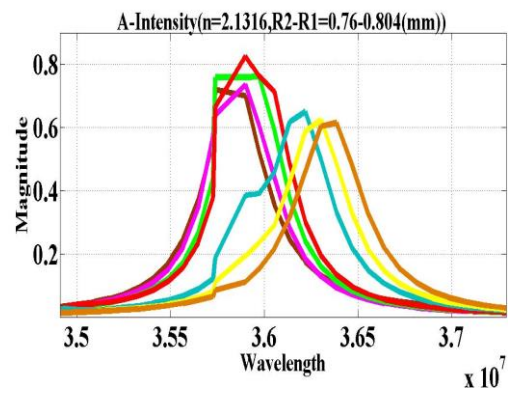


(الف)





(د)



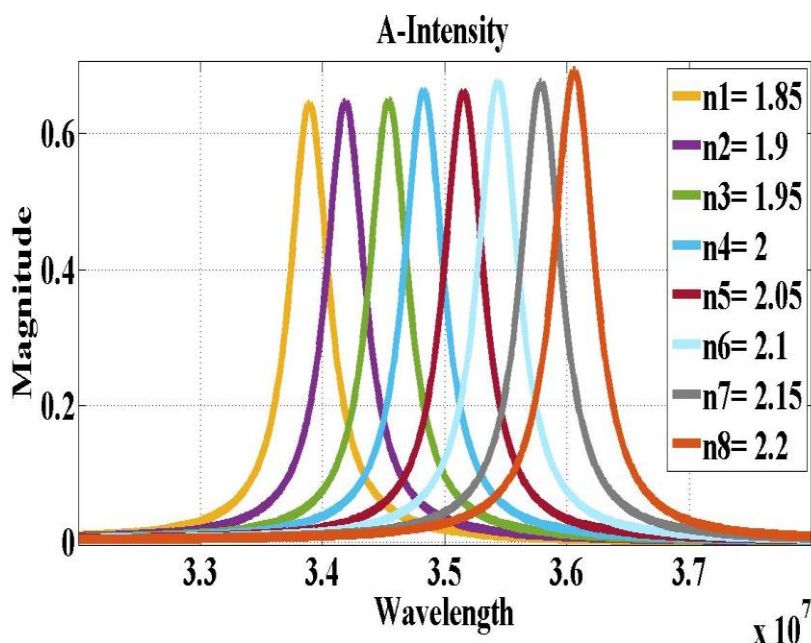
(ج)

شکل (۶): تأثیر تغییر ابعاد گیرنده‌های مستطیلی شکل (الف و ب) برای محیط سنجش و (ج و د) برای پهنای حلقه محاط‌کننده فضای سنجش

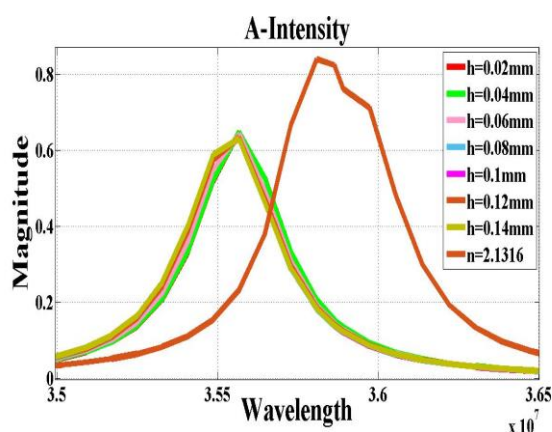
در ادامه بررسی تغییر ابعاد در جواب‌های ساختار همان‌طور که در شکل (۶-ج و د) نشان داده شده است با تغییر ابعاد و پهنای حلقه محیطی بخش سنجش دو بازه جابجایی بسامدی به‌وجود می‌آید. در بخش اول، تغییر ابعاد کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است و این تغییر نسبت به ۵ درصد تغییر ابعاد حلقه بسیار بیشتر است و نسبت آن دو و نیم (۲/۵) برابر است. در بخش دوم، تغییر ابعاد بیشتر از این مقدار است و تا ۱۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. در نتیجه اگر بیشینه تغییر ۵ درصد در ساخت ابعاد (یعنی ۴۰ میکرومتر) را در نظر بگیریم میزان شدت ساختار و جابجایی بسامدی بسیار ناچیز بوده و تأثیر محسوسی بر عملکرد حسگر پیشنهادی نداشته و این مزیت بسیار خوبی برای درستی عملکرد قطعه با در نظر گرفتن خطاهای احتمالی ساخت قطعه است.

خاطر نشان می‌شود فواصل اسلات آنتن‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده که جفت‌شدگی مؤثر و بهینه‌ای را فراهم می‌سازد و منجر به تیز شدن شدت جذبی ساختار و بهنجار شدن پاسخ می‌گردد.

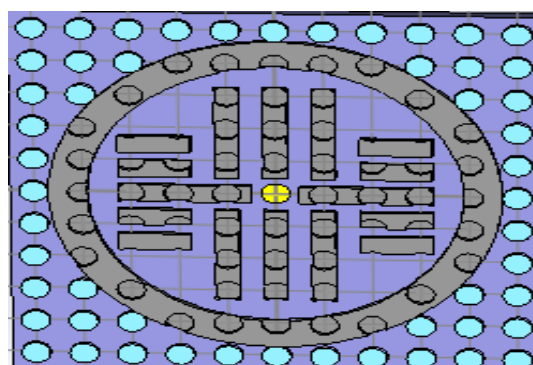
از مزایای دیگر ساختار، پایداری پاسخ‌های ساختار با در نظر گرفتن خوردگی گیرنده‌های محیط سنجش است. در حالت دیگر محیط سنجش را متفاوت و محیط بر منطقه تشدیدگر ساختار از جنس خلأ با ضریب شکست  $n=1$  با تأثیر پارامترهای مختلف هندسی در طیف جذبی در شکل (۷) مورد بررسی قرار گرفته است. این بار محیط سنجش لایه با ابعاد  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  و ضخامت  $100 \text{ }\mu\text{m}$  میکرومتر در اطراف محیط سنجش در نظر گرفته شده است. در این حالت محیط دی‌الکتریک را از جنس پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) با فرمول شیمیایی  $(C_4H_6O_2)_n$  و نام اختصاری PMMA، با ضریب گذردهی  $\epsilon_r = 2.1609$  ( $n = 1/47$ ) در نظر گرفتیم که نهایت تشابه با شیشه بکارگرفته شده در لایه دی‌الکتریک ساختار را دارد. PMMA، یک رزین مصنوعی است که از پلی‌مریزاسیون متیل متاکریلات تولید می‌شود. این ماده یک پلاستیک شفاف و محکم است که اغلب به عنوان جایگزینی برای شیشه در محصولات مانند پنجره‌های نشکن، نورگیرها، تابلوهای نورانی و سایبان‌های هواپیما استفاده می‌شود. از مزایای بسیار خوبی برخوردار است و یکی از سخت‌ترین و محکم‌ترین پلیمرها با شفافیتی بالاتر از شیشه و سطحی صیقلی و براق و مقاوم در برابر عوامل جوی است. صفحات پلی‌متیل متاکریلات مقاومت قابل توجهی در برابر عوامل جوی و پرتو نور خورشید دارند و از خواص نوری و سطح شفاف فوق‌العاده‌ای برخوردارند و در عین حال از نظر استحکام در برابر ضربه از شیشه مقاوم‌تر هستند. علاوه بر آن درصد جذب رطوبت بسیار کم و مقاومت کششی و الکتریکی خوبی دارند. با توجه به مزایای ذکر شده و نزدیکی ضرایب شکست دو ماده مذکور می‌توان هرکدام از این دو ماده را در این ساختار بکار گرفت. قابل ذکر است بالاترین شدت طیف جذبی را با اختلاف ناچیزی، محیط دی‌الکتریک شیشه رقم می‌زند که ما هم در ادامه روند تحلیل و بررسی ساختار همان محیط شیشه را در نظر گرفتیم. در ادامه و در این قسمت با افزایش ضریب شکست محیط طول موجی جذبی ساختار به سمت طول موج‌های بالاتر همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده تغییر پیدا می‌کند و مقوله تغییر ضریب شکست همراه با تغییر طول موج تشدیدی ساختار پلاسمونی به وضوح نشان داده شده است.



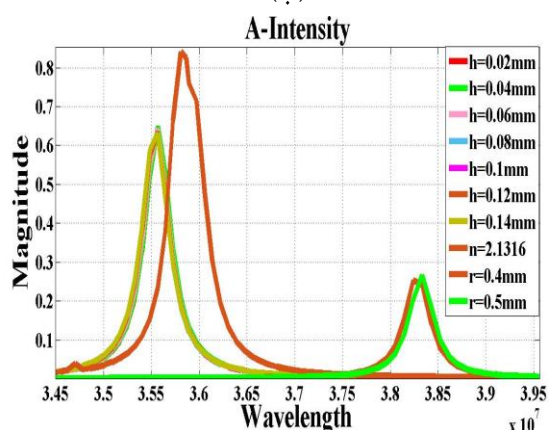
شکل (۷): نمودار جذب در ضرایب شکست متفاوت بر حسب طول موج با در نظر گرفتن محیط سنجش در برگرفته بخش تشخیصی ساختار



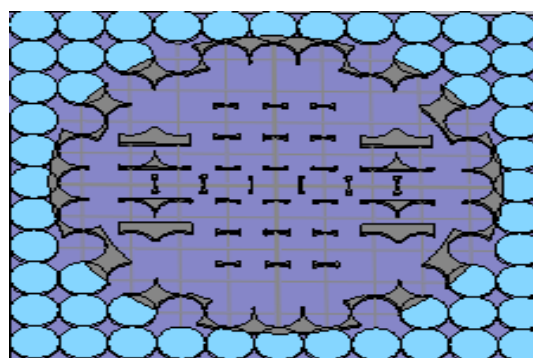
(ب)



(الف)

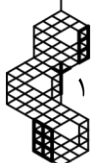


(د)



(ج)

شکل (۸): نتایج شبیه سازی در برابر خوردگی های متفاوت سطح بالایی ساختار و محیط سنجش (الف). خوردگی سطح با اعمال نانودیسک های با شعاع خوردگی ۰/۲ میلی متر (ب). طیف جذبی ساختار به ازای سطح ارتفاع متفاوت خوردگی و متناسب با شکل الف. (ج). سطح با اعمال نانودیسک های نشانگر خوردگی با شعاع ۰/۴ میلی متر (د). طیف جذبی ساختار به ازای سطح ارتفاع متفاوت خوردگی و متناسب با شکل ج





همان‌طور که در بخش تحلیلی مقاله ذکر شد، جابه‌جایی طول موج تشدیدی حالت‌های پلاسمونی با تغییر ضریب شکست و ثابت گذردهی الکتریکی محیط اطراف قابل انتظار است و حالت جذبی تشدیدی با تغییر ضریب شکست محیط اطراف جابه‌جا می‌شود. لذا می‌توان با تعیین و مقیاس‌بندی محدوده‌های خاصی از میزان آلودگی بر اساس عوامل زیست‌شناختی در محیط مورد نظر و مکان‌های نیازمند مراقبت ویژه همچون ایجاد اتاق‌های تمیز، میزان آلودگی را تشخیص داد و مراقبت ویژه را به بهترین نحو انجام داد. البته لازم به ذکر است مزیت اصلی ساختار، یعنی دارا بودن درجه بالای اطمینان جواب‌دهی در برابر خطاهای عدم دقت در ابعاد ساختار حین ساخت و مقاومت بسیار بالای عدم تغییر محسوس جواب در برابر خوردگی ناحیه سنجش در هیچ منبعی تا به حال ذکر نشده است.

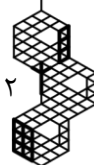
### ۳- بررسی درستی و اطمینان پاسخ‌های ساختار در برابر خوردگی محیط سنجش

محیط سنجش ساختار با توجه به دارا بودن یک حلقه بیرونی برای به دام انداختن میدان از مقاومت خوبی در برابر خطاهای ناشی از ساخت قطعه و ساییدگی و یا از بین رفتن محیط سنجش در اثر عوامل مختلف جهت پاسخ‌دهی مطمئن به تغییرات ضریب شکست محیط برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی در برابر خوردگی‌های متفاوت سطح بالایی ساختار و محیط سنجش در شکل (۸) نشان داده شده است. برای اعمال خوردگی سطح، یک آرایه متناوب از نانو دیسک‌هایی با عمق‌های متفاوت از ۰/۲ میلی‌متر تا ۰/۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که نتایج تا عمق ۰/۱۴ میلی‌متر یعنی تقریباً برابر با ارتفاع گیرنده‌های محیط سنجش (همان‌طور که در شکل ۸(ب) نشان داده شده است) طیف جذبی تشدیدی محیط خورده شده با عمق‌های متفاوت در برابر جواب اصلی ساختار بدون خوردگی انحراف بسیار اندکی دارد چرا که جواب‌های ساختار به ضرایب متفاوت ضریب شکست در فواصل طول موجی بسیار بیشتری از همدیگر قرار می‌گیرند و از طرفی پیک‌های جذبی محیط‌های با خوردگی متفاوت با توجه به نتایج به‌دست آمده کاملاً بر همدیگر منطبق بوده و تنها در میزان شدت جذبی اختلاف ناچیزی دارند اما با افزایش محیط خوردگی بیش از ارتفاع محیط سنجش (شکل ۸(ج)) طیف جذبی ساختار هم با افت شدید شدت جذب و با جابجایی بسیار فاحش بسامدی همراه است به صورتی که نمی‌توان آن را مرتبط به طیف جذبی مرتبط با همان ضریب شکست در نظر گرفت. این موضوع در شکل ۸(د) نشان داده شده است که دو قله جذبی در طول موج‌های خیلی بالاتر و با افت بسیار شدید شدت جذبی نشان داده شده است.

جدول (۲): مقایسه عملکرد حسگر پیشنهادی با کارهای مشابه

| محدوده ضریب شکست | بیشینه ضریب کیفیت ( $RIU^{-1}$ ) | بیشینه حساسیت (nm/RIU) | منبع          |
|------------------|----------------------------------|------------------------|---------------|
| -                | ۹۶۴                              | ۸۸۰                    | [۴۴]          |
| ۱/۱ - ۱/۴۵       | ۱۲۰                              | ۲۴۳۰۰                  | [۴۵]          |
| ۱/۲۹ - ۱/۳۹      | ۲۳۲۰                             | ۱۱۶۰۰۰                 | [۴۶]          |
| ۱/۱۴ - ۱/۳۶      | ۱۰۵                              | ۵۳۸۰۰                  | [۴۷]          |
| ۱/۰۰ - ۱/۲۰      | ۲۲۰۳                             | ۱۳۶۷                   | [۴۸]          |
| ۱/۰۰ - ۱/۳۸      | ۵۷/۰۶                            | ۱۰۸۴                   | [۴۹]          |
| ۱/۲۲ - ۱/۳۷      | ۵۶۶                              | ۵۱۰۰۰                  | [۵۰]          |
| ۱/۰۰ - ۲/۵۰      | ۱۳۴۰                             | ۶۴۰۰۰۰                 | حسگر پیشنهادی |

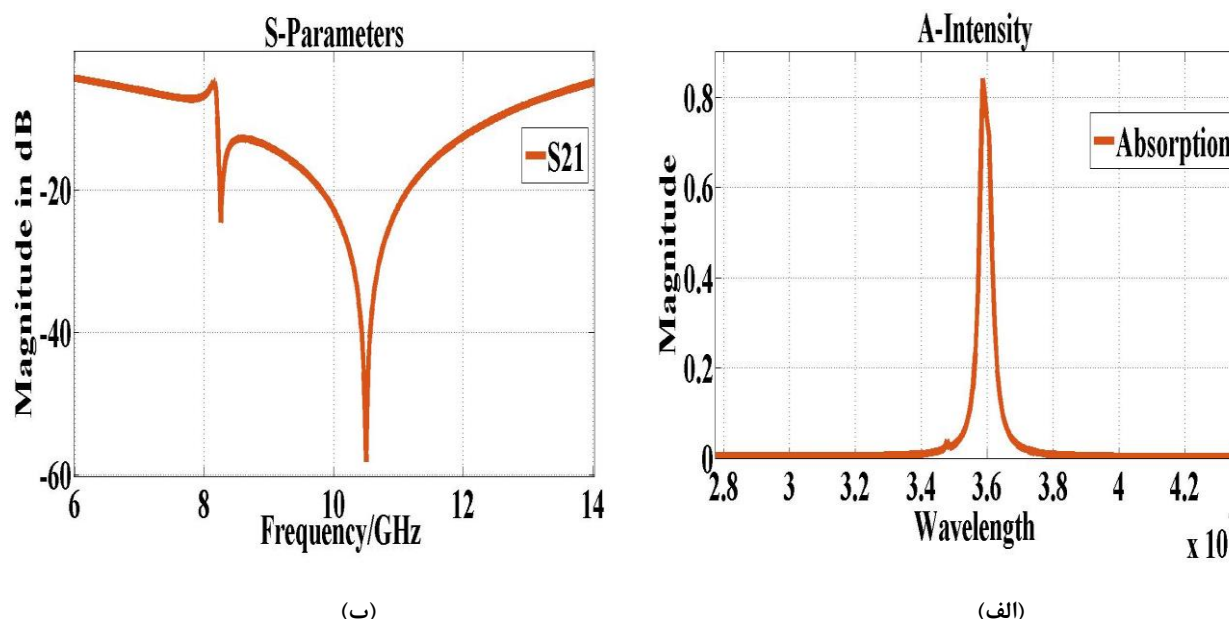
مقایسه عملکرد حسگر پیشنهادی با در نظر گرفتن بعضی پارامترهای اثرگذار کیفیت حسگرها که اخیراً در پژوهش‌های مرتبط با این زمینه ارائه می‌گردد در جدول (۲) فهرست شده است. همان‌طور که مشخص است طرح پیشنهادی بالاترین میزان حساسیت در میان حسگرهای ضریب شکست ارائه شده را دارا می‌باشد. این طرح علاوه بر این وسیع‌ترین محدوده سنجش را در بین تمام حسگرهای در این زمینه به خود اختصاص می‌دهد و توانایی تشخیص انالیت‌های با ضریب شکست پایین را دارد و آن را به یک نامزد بسیار عالی برای موارد با ضریب شکست ذکر شده در مرجع [۴۴] شامل تشخیص بیهوشی، اتر هالوژنه، آئروژل‌های مختلف، آلودگی هوای محیطی و عوامل خنک‌کننده را دارا می‌باشد. همچنین خاطر نشان می‌شود ساختار از ضریب شایستگی مطلوبی در حیطه خود برخوردار است.





#### ۴- بررسی پارامتر پراکندگی ساختار و چشم‌انداز بیشتر ساختار

از مزایای دیگر ساختار همان‌طور که در شکل ۹(الف) نشان داده شده، ایجاد حالت جذبی دوم در ساختار است که در اطمینان بخشی و درستی عملکرد ساختار و همچنین بررسی دقیق‌تر آزمایشات مورد نظر را ممکن می‌سازد. باید خاطر نشان شد که بررسی پارامتر پراکندگی ساختار یک معیار بسیار ارزشمند در بررسی کیفیت ساختارها است؛ به همین جهت پارامتر پراکندگی ساختار مورد نظر در شکل ۹(ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است این پارامتر از دو مد مجزا و با فاصله خیلی خوبی از همدیگر جهت سنجش هر چه بهتر پارامترهای مورد نظر پشتیبانی می‌کند. لذا این ساختار علاوه بر میزان حساسیت و ضریب شایستگی مطلوب از ضریب کیفیت بسیار بالایی نسبت به حسگرهای ارائه شده در قبل برخوردار است. میزان ضریب کیفیت ساختار برابر با  $283/7$  است که یکی از مزیت‌های بسیار خوب ساختار پیشنهادی به عمل می‌آید. مزیت پشتیبانی ساختار از دو حالت مجزا و دارا بودن ضریب کیفیت و ضریب شایستگی بسیار بالا قابلیت اطمینان ساختار را برای بررسی کاربردهای پزشکی بیشتر و دقیق‌تر را نشان می‌دهد.



شکل (۹): (الف) نمودار جذب بر حسب طول موج (ب) پارامتر پراکندگی ساختار بر حسب بسامد

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی یک حسگر پلاسمونی مبتنی بر فرامواد برای سنجش ضریب شکست مواد در ناحیه موج میلی‌متری طراحی شده است. ساختار مورد نظر شامل یک محیط سنجش با آرایه منظمی از گیرنده‌های آنتن مانند که توسط یک استوانه توخالی یا به عبارتی یک حلقه در دو حالت متفاوت محیط سنجشی محاط شده است. در حالت اول خود محیط دی‌الکتریک در بین دو بخش فلزی ساختار در بالا و پایین به عنوان پارامتری با ضریب شکست متغیر و قابل تشخیص توسط ساختار جهت بهینه‌یابی شکل طیف جذبی و با کیفیت بالا قرار گرفته است و در حالت دوم محیط سنجش مجزا و لایه‌ای نشسته بر روی محیط دی‌الکتریک با ضریب شکست  $1/46$  در نظر گرفته شده است. میزان حساسیت و ضریب شایستگی حسگر پیشنهادی در حالت سنجشی اول بررسی شده است و مقادیر بسیار خوبی در محدوده امواج میلی‌متری از خود نشان می‌دهد که با توجه به کاربرد موج میلی‌متری در حیطه نظامی و فضایی، این ساختار بسیار ارزشمند خواهد بود. علاوه بر این مزیت می‌توان بیان داشت که ساختار از مزیت بسیار خوبی در برابر خطاهای حین ساخت و عدم دقت در ابعاد و همچنین پایداری بسیار مطلوبی در برابر خوردگی محیط سنجش برخوردار است. از طرفی با توجه به اینکه ساختار از ۲ حالت جذبی و همچنین پارامتر پراکندگی با ضریب کیفیت بسیار خوبی برخوردار است، لذا با دارا بودن میزان حساسیت فوق‌العاده و ضریب کیفیت بالا با قاطعیت می‌توان ادعا کرد که ساختار مورد نظر توانایی بسیار خوبی در سنجش و شناسایی آلودگی‌های محیطی و جو و

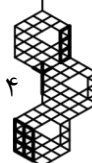




همچنین سنجش مواد زیست شیمیایی و مواد با ضرایب شکست پایین در حیطه پزشکی را داراست که در حالت دوم به خوبی بررسی شده است.

## مراجع

- [1] R. Aldo, M. Mirasoli, B. Roda, F. Bonvicini, C. Colliva, and P. Reschiglian, "Recent developments in rapid multiplexed bioanalytical methods for foodborne pathogenic bacteria detection," *Microchimica Acta*, vol. 178, pp. 7–28, 2012. doi: 10.1007/s00604-012-0824-3.
- [2] Y. Ming-jie, B. Gu, Q. An, Ch. Yang, Y. L. Guan, and K. Yong, "Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications," *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 376, pp. 348-392, 2018. doi: 10.1016/j.ccr.2018.08.001.
- [3] C. Cai, R. E. Miles, M. I. Cotterell, A. Marsh, G. Rovelli, A. M. Rickards, Y. Zhang, and J. P. Reid, "Comparison of methods for predicting the compositional dependence of the density and refractive index of organic-aqueous aerosols," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 120, no. 33, pp. 6604-6617, 2016. doi: 10.1021/acs.jpca.6b05986.
- [4] I. M. Rakibul, A. N. M. Iftekh, K. R. Hasan, M. J. Nayen, S. B. Islam, A. Hossain, Z. Mustafa, and T. Tahsin, "Design and numerical analysis of a gold-coated photonic crystal fiber based refractive index sensor," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, no. 112, pp. 1-18, 2021. doi: 10.1007/s11082-021-02748-8.
- [5] H. Zhaochen, Y. Li, B. Chen, W. Zhang, X. Yang, and X. Yang, "Recent advances in surface plasmon resonance imaging and biological applications," *Talanta*, vol. 255, 124213, 2023. doi: 10.1016/j.talanta.2022.124213.
- [6] Sh. Anand, U. Cvelbar, and I. Abdulhalim, "A comprehensive review on plasmonic-based biosensors used in viral diagnostics," *Communications biology*, vol. 4, no. 1, pp. 70, 2021. doi: 10.1038/s42003-020-01615-8.
- [7] J. W. Kyung, and K. M. Byun, "Fabrication of nanoscale plasmonic structures and their applications to photonic devices and biosensors," *Biomedical Engineering Letters*, vol. 1, pp. 153-162, 2011. doi: 10.1007/s13534-011-0026-7.
- [8] P. Abin, and A. R. Kumar, "The performance enhancement of surface plasmon resonance optical sensors using nanomaterials: A review," *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 458, 214424, 2022. doi: 10.1016/j.ccr.2022.214424.
- [9] S. Cheon, K. D. Kihm, H. G. Kim, G. Lim, J. S. Park, and J. S. Lee, "How to reliably determine the complex refractive index (RI) of graphene by using two independent measurement constraints," *Scientific reports*, vol. 4, no. 1, 2014, 6364. doi: 10.1038/srep06364.
- [10] M. Heydari, A. Habibzadeh-Sharif, and F. Jabbarzadeh, "Design of a compact refractive-index sensor based on surface plasmon polariton slot waveguide," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. 38, 2020. doi: 10.1016/j.photonics.2019.100755.
- [11] R. S. Anwar, H. Ning, and L. Mao, "Recent advancements in surface plasmon polaritons-plasmonics in subwavelength structures in microwave and terahertz regimes," *Digital Communications and Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 244-257, 2018. doi: 10.1016/j.dcan.2017.08.004.
- [12] D. K. Gramotnev, and S. I. Bozhevolnyi, "Nanofocusing of electromagnetic radiation," *Nature Photonics*, vol. 8, no. 1, pp. 13-22, 2014. doi: 10.1038/nphoton.2013.232.
- [13] J. Li, "A review: Development of novel fiber-optic platforms for bulk and surface refractive index sensing applications," *Sensors and Actuators Reports*, vol. 2, no. 1, 2020, 100018, doi: 10.1016/j.snr.2020.100018.
- [14] D. Wu, R. Li, Y. Liu, Zh. Yu, L. Yu, L. Chen, Ch. Liu, R. Ma, and H. Ye, "Ultra-narrow band perfect absorber and its application as plasmonic sensor in the visible region," *Nanoscale research letters*, vol. 12, pp. 1-11, 2017. doi: 10.1186/s11671-017-2203-9.
- [15] E. D. Tommasi, E. Esposito, S. Romano, A. Crescitelli, V. Di Meo, V. Mocella, G. Zito, and I. Rendina, "Frontiers of light manipulation in natural, metallic, and dielectric nanostructures," *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 44, pp. 1-68, 2021. doi: 10.1007/s40766-021-00015-w.





- [16] B. Gul, S. Ashraf, Sh. Khan, H. Nisar, and I. Ahmad, "Cell refractive index: Models, insights, applications and future perspectives," *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 33, 2021. doi: 10.1016/j.pdpdt.2020.102096.
- [17] Y. Li, A. Ma, L. Yang, and X. Zhang, "Highly sensitive refractive index sensing with surface plasmon polariton waveguides," *Plasmonics*, vol. 9, 71-78, 2014. doi: 10.1007/s11468-013-9599-6.
- [18] G. A. Khan, Y. Lu, and P. Wang, "Plasmon-Enhanced Refractive Index Sensing of Biomolecules Based on Metal–Dielectric–Metal Metasurface in the Infrared Regime," *ACS omega*, vol. 9, no. 1, pp. 1416-1423, 2023. doi: 10.1021/acsomega.3c07809.
- [19] R. Horchani, "Refractive index sensing using a linear graded plasmonic chain of metal nano-particles," *Chinese journal of physics*, vol. 56, no. 3, pp. 1247-1251, 2018. doi: 10.1016/j.cjph.2018.03.038.
- [20] J. Yao, J. Ou, V. Savinov, M. K. Chen, H. Y. Kuo, N. I. Zheludev, and D. P. Tsai, "Plasmonic anapole metamaterial for refractive index sensing," *Photonix*, vol. 3, no. 1, 2022. doi: 10.1186/s43074-022-00069-x.
- [21] Y. Esfahani Monfared, "Refractive index sensor based on surface plasmon resonance excitation in a D-shaped photonic crystal fiber coated by titanium nitride," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 535-542, 2020. doi: 10.1007/s11468-019-01072-y.
- [22] Y. Shen, J. Zhou, T. Liu, Y. Tao, R. Jiang, M. Liu, G. Xiao et al, "Plasmonic gold mushroom arrays with refractive index sensing figures of merit approaching the theoretical limit," *Nature communications*, vol. 4, no. 1, 2381, 2013. doi: 10.1038/ncomms3381.
- [23] M. Danaie, L. Hajshahvaladi, and E. Ghaderpanah, "A single-mode tunable plasmonic sensor based on an 8-shaped resonator for cancer cell detection," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 13976, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-41193-3.
- [24] H. Zhang, Y. Cheng, and F. Chen, "Quad-band plasmonic perfect absorber using all-metal nanostructure metasurface for refractive index sensing," *Optik*, vol. 229, 166300, 2021. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166300.
- [25] X. Chong, Y. Zhang, E. Li, K. Kim, P. R. Ohodnicki, Ch. Chang, and A. X. Wang, "Surface-enhanced infrared absorption: pushing the frontier for on-chip gas sensing," *ACS sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 230-238, 2018. doi: 10.1021/acssensors.7b00891.
- [26] H. P. Pasanen, R. Khan, J. A. Odutola, and N. V. Tkachenko, "Transient Absorption Spectroscopy of Films: Impact of Refractive Index," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 128, no. 15, pp. 6167-6179, 2024. doi: 10.1021/acs.jpcc.4c00981.
- [27] H. Sohrabi, A. Hemmati, M. R. Majidi, Sh. Eyvazi, A. Jahanban-Esfahan, B. Baradaran, R. Adlpour-Azar, A. Mokhtarzadeh, and M. de la Guardia, "Recent advances on portable sensing and biosensing assays applied for detection of main chemical and biological pollutant agents in water samples: A critical review," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 143, 2021. doi: 10.1016/j.trac.2021.116344.
- [28] S. Barizuddin, S. Bok, and S. Gangopadhyay, "Plasmonic sensors for disease detection-a review," *J. Nanomed. Nanotechnol*, vol. 7, no. 3, 2016. doi: 10.4172/2157-7439.1000373.
- [29] R. Rahad, S. Shahriar Sharar, and M. A. Haque, "Exploring the Diverse Applications of Plasmonic Refractive Index Sensors: Unveiling a New Realm of Possibilities," *A Thesis submitted in Electrical and Electronic Engineering, Islamic University of Technology, Board Bazar, Gazipur-1704, Bangladesh, Department of Electrical and Electronic Engineering*, April, 2023.
- [30] M. T. Sohail, M. Wang, M. Shareef, and P. Yan, "A Review of Ultrafast Photonics Enabled by Metal-Based Nanomaterials: Fabrication, Integration, Applications and Future Perspective," *Infrared Physics & Technology*, 2024. doi: 10.1016/j.infrared.2024.105127.
- [31] D. S. Dkhar, R. Kumari, Sh. J. Malode, N. P. Shetti, and P. Chandra, "Integrated lab-on-a-chip devices: Fabrication methodologies, transduction system for sensing purposes," *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, vol. 223, 2023. doi: 10.1016/j.jpba.2022.115120.
- [32] L. Escoubas, M. Carlberg, J. L. Rouzo, F. Pourcin, J. Ackermann, O. Margeat, C. Reynaud et al, "Design and realization of light absorbers using plasmonic nanoparticles," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 63, pp. 1-22, 2019. doi: 10.1016/j.pquantelec.2018.12.001.
- [33] C. M. Das, F. Yang, Zh. Yang, X. Liu, Q. Th. Hoang, Zh. Xu, Sh. Neermunda et al, "Computational Modeling for Intelligent Surface Plasmon Resonance Sensor Design and Experimental Schemes for Real-Time Plasmonic Biosensing: A Review," *Advanced Theory and Simulations*, vol. 6, no. 9, 2023. doi: 10.1002/adts.202200886.

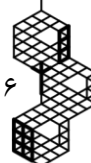




- [34] L. De Sio, T. Placido, R. Comparelli, M. L. Curri, M. Striccoli, N. Tabiryan, and T. J. Bunning, "Next-generation thermo-plasmonic technologies and plasmonic nanoparticles in optoelectronics," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 41, pp. 23-70, 2015. doi: 10.1016/j.pquantelec.2015.03.001.
- [35] M. R. Rakhshani, "Narrowband plasmonic absorber using gold nanoparticle arrays for refractive index sensing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 5, pp. 4043-4050, 2022. doi: 10.1109/JSEN.2022.3142655.
- [36] B. Špačková, P. Wrobel, M. Bocková, and J. Homola, "Optical biosensors based on plasmonic nanostructures: a review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 12, pp. 2380-2408, 2016. doi: 10.1109/JPROC.2016.2624340.
- [37] M. Chauhan, and V. K. Singh, "Fiber optic plasmonic sensors based on theoretical analysis: a review," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, no. 7, 2021, 409, doi: 10.1007/s11082-021-03034-3.
- [38] R. Zafar, and M. Salim, "Enhanced figure of merit in Fano resonance-based plasmonic refractive index sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 11, pp. 6313-6317, 2015. doi: 10.1109/JSEN.2015.2455534.
- [39] Y. Chen, J. Liu, Zh. Yang, J. S. Wilkinson, and X. Zhou, "Optical biosensors based on refractometric sensing schemes: A review," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 144, 2019. doi: 10.1016/j.bios.2019.111693.
- [40] A. Farmani, S. Mohammad, H. M. Mohammad, and T. Daghooghi. "Optical nanosensors for cancer and virus detections." In *Nanosensors for smart cities*, pp. 419-432, 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-819870-4.00024-4.
- [41] Z. Salehnezhad, S. Mohammad, and A. Farmani. "Design and numerical simulation of a sensitive plasmonic-based nanosensor utilizing MoS<sub>2</sub> monolayer and graphene." *Diamond and Related Materials* 131 (2023). doi: 10.1016/j.diamond.2022.109594
- [42] Y. Yuan, X. Peng, X. Weng, J. He, Ch. Liao, Y. Wang, L. Liu, Sh. Zeng, J. Song, and J. Qu, "Two-dimensional nanomaterials as enhanced surface plasmon resonance sensing platforms: Design perspectives and illustrative applications," *Biosensors and Bioelectronics*, 2023. doi: 10.1016/j.bios.2023.115672.
- [43] K. Sakoda, "Electromagnetic Metamaterials," Springer: Singapore, 2019.
- [44] M. Isti, I. Ahmad, M. H. K. Anik, S. Nuzhat, R. C. Talukder, S. Sultana, S. K. Biswas, and H. Talukder, "Highly sensitive double D-shaped channel photonic crystal fiber based plasmonic refractive index sensor," *Optics Continuum*, vol. 1, no. 3, pp. 575-590, 2022. doi: 10.1364/OPTCON.452020.
- [45] N. Hussain, M. R. Masuk, M. F. Hossain, and A. Z. Kouzani, "Dual core photonic crystal fiber based plasmonic refractive index sensor with ultra-wide detection range," *Optics Express*, vol. 31, no. 16, pp. 26910-26922, 2023. doi: 10.1364/OE.487600.
- [46] E. Haque, S. Mahmuda, M. A. Hossain, N. H. Hai, Y. Namihira, and F. Ahmed, "Highly sensitive dual-core PCF based plasmonic refractive index sensor for low refractive index detection," *IEEE photonics journal*, vol. 11, no. 5, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1109/JPHOT.2019.2931713.
- [47] M. H. K. Anik, M. A. Isti, S. R. Islam, S. Mahmud, H. Talukder, M. J. Piran, S. K. Biswas, and K. Kwak, "Milled microchannel-assisted open D-channel photonic crystal fiber plasmonic biosensor," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 2924-2933, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047509.
- [48] M. A. Butt, S. N. Khonina, and N. L. Kazanskiy, "Plasmonic refractive index sensor based on metal-insulator-metal waveguides with high sensitivity," *Journal of Modern Optics*, vol. 66, no. 9, pp. 1038-1043, 2019. doi: 10.1080/09500340.2019.1601272.
- [49] N. L. Kazanskiy, M. A. Butt, and S. N. Khonina, "Nanodots decorated MIM semi-ring resonator cavity for biochemical sensing applications," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. 42, 2020, 100836. doi: 10.1016/j.photonics.2020.100836.
- [50] E. Haque, M. A. Hossain, Y. Namihira, and F. Ahmed, "Microchannel-based plasmonic refractive index sensor for low refractive index detection," *Applied optics*, vol. 58, no. 6, pp. 1547-1554, 2019. doi: 10.1364/AO.58.001547.

زیر نویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Biologic
  - <sup>2</sup> Ellipsometry
  - <sup>3</sup> Interferometer
  - <sup>4</sup> Surface Plasmon Polaritons





- <sup>5</sup> Confinement
- <sup>6</sup> P-Polarized
- <sup>7</sup> Dispersion Relation
- <sup>8</sup> stand
- <sup>9</sup> reflectors
- <sup>10</sup> Poly methyl methacrylate (PMMA)

