

## Investigating the Effect of the Thickness of Gold Nanodisk Arrays on the Performance of Metal-dielectric-metal Multifunctional Sensors Based on Surface Plasmon Resonance and Localized Surface Plasmon Resonance

Davood Shahabi<sup>۱</sup>, Mahdi Sovizi<sup>۲\*</sup>, Maryam Aliannezhadi<sup>۳</sup>, Mohsen Ghahramani Saliانه<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> PhD Student, Semnan University, Semnan, Iran. Email: shahabi.phy@gmail.com

<sup>۲</sup> Associate Professor, Semnan University, Semnan, Iran (\*Correspondence: msovizi@semnan.ac.ir)

<sup>۳</sup> Associate Professor, Semnan University, Semnan, Iran Email: m\_aliannezhadi@semnan.ac.ir

<sup>۴</sup> Researcher, Imam Hussein University, Tehran, Iran. Email: kpmghahramani@ihu.ac.ir

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: ۲۹ January ۲۰۲۰

Revised: ۰۵ April ۲۰۲۰

Accepted: ۳۰ April ۲۰۲۰

Available online: ۲۱ May ۲۰۲۰

• \*Correspondence:  
msovizi@semnan.ac.ir

### ABSTRACT

In this article, a three-dimensional metal-dielectric-metal surface plasmon resonance sensor with nanodisc arrays is designed and the effect of the nanodisks' thickness is investigated on the performance of a multifunctional sensor based on surface plasmon resonance in liquid and gas sensing. The simulations are done using the finite difference time domain method (FDTD) and by applying appropriate boundary conditions. The results confirm the significant effects of the nanodisks' thickness on the performance of the optical sensor, So that the thickness and linewidth of the resonance peak decrease and increase, respectively, with the rise in the thickness of the nanodisks. Also, a red shift in the resonance wavelength is observed with the increase of the nanodisks' thickness. The results indicate the appropriate sensitivities of these proposed optical sensors in gas and liquid sensing. The sensitivities of these three-dimensional array sensors with the studied nanodisk's thickness (۳۰ to ۶۰ nm) are in the range of ۶۰۰ to ۶۴۸ nm/RIU and ۵۸۸ to ۶۷۴ nm/RIU for gas and liquid sensing, demonstrating the proposed sensor is a suitable candidate for optical sensing of materials. Also, the nanodisk thickness of ۵۰ nm is obtained as the optimal thickness for sensing in both specific environments due to its appropriate sensitivity value (~۶۴۰ nm/RIU). In addition, the results demonstrate that the proposed structure can be introduced as a suitable candidate for surface-enhanced Raman spectroscopy due to the formed hot spots and the field distribution in the configuration.

#### Keywords:

Array Sensor

Gold Nanostructures

Localized Surface Plasmon Sensor

Surface-enhanced Raman Sensor

Nanosensor

**Cite this article:** Shahabi, D., Sovizi, M.<sup>©</sup>, Aliannezhadi, M.<sup>©</sup>, Ghahramani Saliانه M. (۲۰۲۰). Investigating the Effect of the Thickness of Gold Nanodisk Arrays on the Performance of Metal-dielectric-metal Multifunctional Sensors Based on Surface Plasmon Resonance and Localized Surface Plasmon Resonance. Journal of Applied Electromagnetics. ۲۰۲۰; ۱۳(۱):۱۰۱-۱۰۹.  
**DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴.۴.۱۳.۱.۷.۲>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

**Publisher:** Imam Hossein Comprehensive University.



## بررسی تأثیر ضخامت آرایه‌های نانو دیسک طلا بر عملکرد حسگر چند کاربردی فلز-دی‌الکتریک-فلز مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی و تشدید پلاسمون سطحی موضعی

داود شهبابی<sup>۱</sup>، مهدی سویزی<sup>۲\*</sup>، مریم علیان نژادی<sup>۳</sup>، محسن قهرمانی سالیانه<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران Shahabi.phy@semnan.ac.ir

<sup>۲\*</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران (نویسنده مسئول: msosvizi@semnan.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران m\_aliannezhadi@semnan.ac.ir

<sup>۴</sup> پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران mohsen.ghahramani@yahoo.com

### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

•

#### کلیدواژه‌ها:

حسگر آرایه‌ای

حسگر پلاسمون سطحی موضعی

حسگر رامان ارتقا یافته سطحی

نانو ساختارهای طلا

نانو حسگر

### چکیده (استایل عنوان چکیده)

در این مقاله، حسگر تشدید پلاسمون سطحی سه‌بعدی فلز-دی‌الکتریک-فلز با آرایه‌های نانو دیسک طلا و تأثیر ضخامت نانو دیسک‌ها بر عملکرد حسگر چند کاربردی در حسگری مایعات و گازها با استفاده از تشدید پلاسمون سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان و با اعمال شرایط مرزی مناسب انجام شده و نتایج مؤید تأثیر قابل توجه ضخامت نانو دیسک‌ها بر عملکرد حسگر نوری است، به طوری که ارتفاع قله‌های تشدید حسگر نوری و پهنای خط قله‌ها با افزایش ضخامت نانو دیسک‌ها به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. همچنین، انتقال به قرمز در طول موج تشدید با افزایش ضخامت نانو دیسک‌ها مشاهده می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشانگر حساسیت مناسب حسگرهای پیشنهادی در حسگری گازها و مواد مایع است. حساسیت این حسگر آرایه‌ای سه‌بعدی در ضخامت نانو دیسک‌های بررسی‌شده (۲۰ تا ۶۰ nm) در بازه ۶۰۰ nm/RIU تا ۶۴۸ nm/RIU و ۵۸۸ nm/RIU تا ۶۷۴ nm/RIU به ترتیب برای محیط‌های گازی و مایع تغییر می‌کند. همچنین، ضخامت نانو دیسک‌های ۵۰ nm به دلیل مقدار حساسیت مناسب ساختار (۶۴۰ nm/RIU) در حسگری محیط‌های مایع و گازی به‌عنوان ضخامت بهینه به دست آمد. علاوه بر این، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی با توجه به نقاط داغ تشکیل‌شده و توزیع میدان در این ساختار می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسب برای بستر حسگر رامان ارتقا یافته سطحی معرفی شود.

**استناد:** شهبابی، داود، سویزی، مهدی<sup>①</sup>، علیان نژادی، مریم<sup>②</sup>، قهرمانی سالیانه، محسن. بررسی تأثیر ضخامت آرایه‌های نانو دیسک طلا بر عملکرد حسگر چند کاربردی فلز-دی‌الکتریک-فلز مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی و تشدید پلاسمون سطحی موضعی. الکترومغناطیس کاربردی. (۱۴۰۴)؛ ۱۳ (۱): ۱۰۹-۱۰۱.

<https://dor.isc.ac/dor/۲۰۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴۰۴.۱۳.۱.۷.۲>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

OPEN ACCESS

## ۱- مقدمه

تشدید پلاسمون سطحی به کار گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در مورد ویژگی‌های سنجش و عملکرد اشکال مختلف نانو ذرات [۶-۵]، از جمله ساختارهای میله‌ای، کروی، مربع و ساختارهای استوانه‌ای انجام شده است [۷]. در بررسی این ساختارها می‌توان به تفاوت‌های اصلی آن‌ها از جنبه‌های مختلف هندسی و تقارنی، پاسخ نوری و فرکانسی و همچنین کاربرد خاص آن‌ها اشاره کرد.

ساختارهای مربعی معمولاً دارای تقارن بالا و قابلیت دستیابی به مدهای مختلف موضعی پلاسمون می‌باشند. طراحی هندسی آن‌ها می‌تواند واکنش‌های بهتری نسبت به فرکانس‌های خاص نشان دهد. ساختارهای کروی معمولاً عملکرد یکنواخت‌تری در تمام جهات دارند و به دلیل تقارن کامل می‌توانند ویژگی‌های خاصی را در بازتاب و جذب نور از خود نشان دهند. ویژگی‌های نامتقارن ساختارهای استوانه‌ای باعث بروز رفتار منحصر به فردی در تعامل نور با پلاسمون‌ها می‌شوند. امکان تنظیم و نظارت بهتر بر روی سطح و فرکانس‌های پلاسمون در این نوع ساختارها وجود دارد. این تفاوت‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر روی ویژگی‌های نوری و پلاسمونی هر ساختار داشته باشند و بنابراین انتخاب ساختار مناسب به اهداف خاص تحقیق بستگی دارد [۸].

در سال ۲۰۲۲، جیابا و جیانگ<sup>۲</sup> حسگر تشدید پلاسمون سطحی را بر اساس ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز طراحی کردند که شامل توری‌های  $Au$  و  $Al_2O_3$  بود و بیشینه حساسیت  $RIU/nm$  را به دست آوردند [۹]. علاوه بر این، عملکرد حسگر نوری ساختار لایه‌نازک طلا/آرایه نانو سیم‌های طلا در تشخیص حسگری مواد شیمیایی مایع بررسی و طول موج LSPR در بازه ۷۵۰ تا ۱۵۵۰ nm برای تغییر ضریب شکست از آب خالص تا پرو پیل به دست آمد. جنس و ابعاد هندسی نانو ساختار بر عملکرد حسگر نوری تأثیر زیادی دارد. برای نمونه تأثیر ضخامت لایه جذب در حسگر تار نوری نازک شده به صورت نظری توسط واحدی و همکاران گزارش شده است [۱۰]. در پژوهشی دیگر بشیری و همکاران تأثیر جنس حسگر تار نوری مبتنی بر فابری-پرو را برای اندازه‌گیری فشار گازها بررسی کردند و حساسیت  $438 \text{ nm/mbar}$  را برای اکسیژن گزارش کردند [۱۱]. همچنین، منصور سمائی و همکاران حسگر توری براگ تار نوری را به منظور اندازه‌گیری هم‌زمان دما و کرنش، شبیه‌سازی کردند [۱۲].

همان‌طور که بیان شد، ساختار و ریخت‌شناسی نانو ساختارهای پیشنهادی بر روی عملکرد حسگرهای نوری بسیار مؤثر هستند. همچنین، اکثر حسگرهای مبتنی بر پلاسمون سطحی توانایی حسگری با حساسیت بالا را فقط در یک محیط دارند و سازگاری مناسب با چند نوع محیط ندارند. در پاسخ به این مشکل، در این مقاله ساختار آرایه‌های نانو دیسک بر روی لایه‌های اپتیکی مطرح و مورد بررسی قرار می‌گیرد. حسگر ضریب شکست بر اساس

مطالعه برهم‌کنش نور با ماده در دهه‌های گذشته، پایه و اساس بسیاری از پیشرفت‌های فناوری و مباحث فیزیکی بوده است. علم پلاسمونیک به برهم‌کنش نور به عنوان موجی الکترومغناطیسی با ابر الکترونی فلزات می‌پردازد. الکترون‌های آزاد فلز در نتیجه‌ی این برهم‌کنش وادار به نوسان شده و ویژگی‌های منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند [۱].

به‌طور کلی تشدید پلاسمونیک به دودسته کلی پلاسمون سطحی جای‌گزیده<sup>۱</sup> (LSP) و پلاسمون پلاریتون سطحی<sup>۲</sup> (SPP) تقسیم‌بندی می‌شوند. پلاسمونیک در سطوحی که در مقایسه با طول موج نور ورودی نامتناهی هستند، از نوع سطحی منتشر شونده بوده و روی سطوحی با ابعاد کوچک (nm) پلاسمون سطحی جای‌گزیده تحریک می‌شود. میزان جذب و پراکندگی بالای فلزات در محدوده طول موج مشخص از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین ویژگی‌های پدیده‌ی تشدید پلاسمونیک می‌باشد. محل قرارگیری این جذب علاوه بر نوع فلز (قسمت حقیقی ضریب دی‌الکتریک) به ضریب شکست محیط پیرامون، ضخامت فلز، شکل فلز و عوامل دیگر بستگی دارد. از این‌رو تشدید پلاسمونیک با توجه به بالا بودن میزان جذب و تنظیم‌پذیر بودن آن، گزینه‌ی مناسبی برای ادوات اپتیکی پیشرفته و دقیق همانند حسگرها و صافی‌ها است [۲].

تشدید پلاسمونیک یکی از به‌روزترین فناوری‌های حال حاضر دنیا محسوب می‌شود که در ۲۰ سال اخیر با ورود به حوزه‌ی نانو فوتونیک جهش بزرگی در آن رخ داده است. البته که این پیشرفت چشم‌گیر مدیون پیشرفت در روش‌های جدید ساخت و لایه نشانی نانو ساختارها است. امروزه علم پلاسمونیک به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن مانند میزان جذب و پراکندگی زیاد، در حال گسترش به حوزه‌های مختلف فناوری از جمله مدارهای مجتمع فوتونیک، تصویربرداری و حوزه‌های مختلف پزشکی به‌خصوص تشخیص بیماری‌ها است.

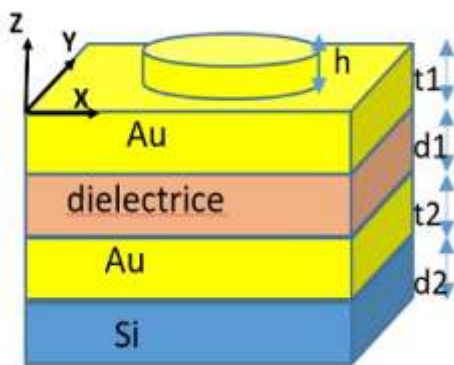
در بین نانو ساختارهای پلاسمونی مختلف، ساختارهای پلاسمونی مبتنی بر فلزات نقره و طلا به دلیل خواص منحصر به فرد اپتیکی و الکترونیک که مربوط به تشدید پلاسمون‌های سطحی است، بسیار مورد توجه قرار دارند. برای نمونه، رسولی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ ساختار حسگری مبتنی بر طلا و گرافن با حساسیت زاویه‌ای  $75 \text{ deg/RIU}$  را ارائه دادند [۳].

ساختار کلاسیک تشدید پلاسمون فلز-دی‌الکتریک-فلز ارتباط نزدیکی با ریخت‌شناسی سطح، اندازه ذرات فلز، شکل، ضریب شکست محیط و غیره دارد [۴]. با توسعه مداوم فناوری ساخت نانو مواد و نانو ساختارهای فلزی که می‌توانند پدیده تشدید پلاسمون سطحی را تحریک کنند، به‌طور گسترده در حسگر

<sup>۲</sup> Jiabao Jiang<sup>۱</sup> Localized Surface Plasmon<sup>۲</sup> Surface Plasmon Polariton

محاسبه شده و ردیابی می شود. سپس تأثیر عوامل ذاتی و محیطی بر تشدید پلاسمون سطحی بررسی می شود.

یک سلول واحد از ساختار طراحی شده برای حسگر نوری مبتنی بر پلاسمون سطحی در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل ساختاری سه بعدی با لایه رویی از آرایه های از نانو دیسک ها است که قادر به ایجاد پدیده تشدید پلاسمون سطحی در سطح آن است. همچنین، یک لایه دی الکتریک در وسط قرار دارد و لایه زیرین از جنس سیلیکون است که یک ساختار چندلایه فلز-دی الکتریک-فلز تشکیل شود. فرض شده است این ساختار به صورت دوره ای در جهت X و Y تکرار می گردد. ضخامت لایه دی الکتریک ۶۰ nm، ضخامت لایه طلای پایینی ۲۰۰ nm و ضخامت زیر لایه سیلیکونی ۲ μm است. ضخامت لایه طلای بالایی ۵۰ nm است و ضخامت نانو دیسک های طلای واقع بر روی این لایه برابر با h و شعاع این دیسک ها با R در نظر گرفته شده است. دوره تناوب ساختار (ثابت شبکه) نیز در جهت X و Y برابر ۶۲۰ nm است.



شکل (۱): نمایی از سلول واحد ساختار حسگر نوری فلز-دی الکتریک-فلز طراحی شده با آرایه های نانو دیسک های طلا بر روی زیر لایه سیلیکون.

نسبت دامنه میدان افزایش یافته روی سطح به دامنه میدان فرودی یکی از کمیت های بسیار مهم در پراکندگی رامان ارتقا یافته سطحی است. از آنجاکه شدت موج پراکنده شده با توان چهارم این کمیت متناسب است این کمیت نیز در بررسی ها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

### ۳- نتایج و بحث

ساختار پیشنهادی شکل ۱ با استفاده از نرم افزار لومریکال شبیه سازی شد و برای حسگری محیط های گازی و مایع مورد بهره برداری قرار گرفت. شکل ۲-الف طیف بازتاب تشدید پلاسمونی را برای ساختار آرایه ای از نانو دیسک های به شعاع ۱۷۵ nm و ضخامت ۳۰ nm نشان می دهد. با توجه به طیف بازتاب موج الکترومغناطیسی، تشدید پلاسمون سطحی در طول موج ۶۵۰ nm رخ می دهد و دره تشدید در طیف ایجاد می شود که به عنوان طول موج LSPR ساختار در محیط هوا شناخته می شود. عمق دره

ساختار چندلایه و آرایه ای از نانو دیسک های طلا پیشنهاد می شود که بر اساس ساختار کلاسیک<sup>۱</sup> MDM پایه ریزی شده است. ساختار پیشنهادی با استفاده از روش FDTD شبیه سازی و عملکرد حسگر مورد ارزیابی قرار می گیرد. همچنین، این ساختار نسبت به ضخامت آرایه های نانو دیسک بهینه سازی می شود تا ضخامت مناسب برای نانو دیسک های فلزی مشخص شود. در ادامه، عملکرد حسگر در محیط های حسگری مایع و گازی مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج مؤید قابلیت حسگری این ساختار در هر دو محیط گازی و مایع با حساسیت و ضریب کیفیت بالا است.

### ۲- روش شبیه سازی

در شبیه سازی نوسانات پلاسمون سطحی موضعی از مدل های مختلفی مانند تقریب دوقطبی استفاده می شود [۱۳]. اما در این پژوهش مستقیماً معادلات ماکسول به روش تفاضل محدود حوزه زمان حل شده است. طبق مدل درود، فلزات حاوی تعداد زیادی الکترون آزاد هستند که ممکن است تحت تأثیر میدان های الکترومغناطیسی خارجی به شدت نوسان کنند. این نوسانات همان پلاسمون های سطحی هستند. با اعمال شرایط مرزی مناسب روی معادلات ماکسول، می توان شرایط تشدید پلاسمون سطحی را به دست آورد. تبادل انرژی بین امواج الکترومغناطیسی و پلاسمون های سطحی تحت این شرایط به شدت افزایش می یابد و با توجه به شکل و ابعاد فلز، اثرات مهمی مشاهده می شود. برای مثال سطح مقطع پراکندگی در پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی افزایش می یابد یا اینکه ضریب انعکاس سطوح فلزی کاهش می یابد. در صورتی که عبور موج از لایه های بسیار نازک بررسی شود، ضریب عبور در هنگام برقراری شرایط تشدید، کاهش می یابد. در چیدمان های مختلف با بررسی این پدیده ها می توان طول موج تشدید پلاسمون سطحی را ردیابی کرد.

در این پژوهش موج الکترومغناطیسی به ساختار مورد نظر تابیده شده و طیف انعکاسی بررسی می شود. ضریب انعکاس در صورت برقراری شرایط تشدید به شدت کاهش می یابد و با توجه به این پدیده طول موج تشدید ردیابی خواهد شد. سپس تأثیر عوامل ذاتی و محیطی بر تشدید پلاسمون سطحی بررسی خواهد شد.

به طور کلی تحلیل عملکرد نوری ساختار های فلزی در حوزه فیزیک کلاسیک قرار می گیرد. بر این اساس، نانو ساختار فلزی با ابعادی در حد چند نانومتر را نیز می توان بدون نیاز به استفاده از مکانیک کوانتومی و تنها با استفاده از معادلات ماکسول بررسی کرد. در این کار فرض می شود که ساختار پیشنهادی تحت تابش نور قرار گرفته است. سپس معادلات ماکسول در حوزه زمان با استفاده از شرایط مرزی مناسب به معادلات تفاضل های متناهی تبدیل شده و مطابق مرجع [۱۴] حل شدند. در انتها طیف ضریب بازتاب محاسبه و بررسی شده و طول موج تشدید پلاسمون سطحی موضعی

<sup>۱</sup> Metal-Dielectric-Metal

تشدیدی برابر با اختلاف بین حداکثر بازتاب و بازتاب در طول موج تشدید است و می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بازده جفت‌شدگی بین نور فرودی و موج پلاسمون سطحی محسوب شود. هر چه عمق دره بیشتر باشد، جفت‌شدگی بهتر انجام شده است.

۶۰۰ nm تا ۹۰۰ nm نشان می‌دهد. نتایج مؤید این مطلب است که افزایش ضخامت نانو دیسک طلا از ۲۰ nm به ۶۰ nm منجر به انتقال به قرمز در طول موج LSPR ساختار می‌شود و علاوه بر این، عمق دره تشدید نیز به تدریج کاهش یافته و FWHM کمی افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۴-الف و ب، نمودار این کمیت‌های عملکردی مهم در حسگر پیشنهادی و توابع برازش شده به آن‌ها ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، طول موج تشدید پلاسمون و نیز FWHM را می‌توان به خوبی با تابع چندجمله‌ای (سه‌موی) برازش و رفتار ساختارهای پیشنهادی با ضخامت‌های مختلف آرایه‌های نانو دیسک را تخمین زد. همچنین، عمق دره تشدید پلاسمون سطحی در شکل ۴-ب نیز از تابع نمایی تبعیت می‌کند که پارامترهای تابع برازش شده در شکل مشخص شده است.

طول موج LSPR نانو دیسک‌ها تحت تأثیر ابعاد طولی و عرضی دیسک قرار دارد. دو پارامتر کلیدی ضخامت  $h$  و قطر  $2R$  در نانو دیسک‌ها بر مقدار طول موج تشدید تأثیر مستقیم دارد. وابستگی طول موج تشدید به ضخامت دیسک به صورت زیر است:

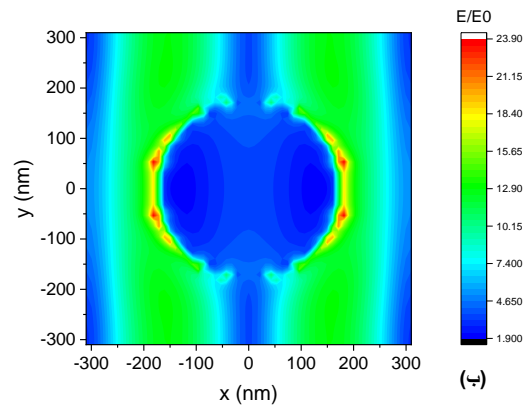
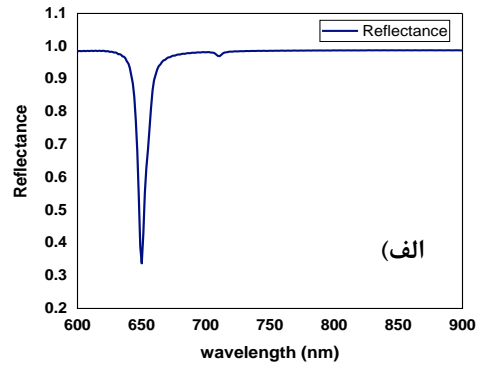
$$\lambda_{LSPR} = \lambda_0 + kh \quad (1)$$

که در این رابطه  $\lambda_0$  طول موج استاتیک یا مرجع و  $k$  ثابت تناسب است که وابسته به جنس مواد و شکل نانو دیسک است. این رابطه نشان می‌دهد که طول موج LSPR با افزایش ضخامت نانو دیسک، افزایش می‌یابد و به سمت طول موج‌های بلندتر (در ناحیه مادون قرمز) جابجا شده و این تغییر باعث کاهش میزان جذب در ناحیه مورد بررسی می‌شود [۱۵].

پدیده مشاهده شده را به این شکل می‌توان توجیه کرد که مد تشدید اصلی موج الکترومغناطیسی برای نانو دیسک، عرضی است و فرکانس تشدید آن به ضخامت دیسک‌ها وابسته است. هنگامی که ضخامت دیسک کوچک است، فرکانس تشدید زیاد است. در حالی که وقتی ضخامت دیسک زیاد است، فرکانس تشدید کم است. بنابراین، ضخامت دیسک‌ها بر مد تشدید تأثیر می‌گذارد. در همان زمان، ضخامت دیسک‌ها بر شدت میدان الکتریکی موضعی و بازدهی عبور انرژی تشدید پلاسمون نیز تأثیر می‌گذارد. هنگامی که ضخامت دیسک‌ها از یک مقدار آستانه فراتر می‌رود، بازده انتقال انرژی کاهش می‌یابد و در نتیجه شدت تشدید پلاسمونیک ضعیف می‌شود [۱۶].

پراکندگی رامان ارتقا یافته سطحی<sup>۱</sup> (SERS) یک پدیده کلیدی است که به دلیل وجود میدان‌های الکتریکی موضعی بسیار قوی در نزدیکی نانو ذرات فلزی یا سطوح پلاسمونیک اتفاق می‌افتد. این رابطه معمولاً به صورت نسبت بین میدان الکتریکی موضعی (E) و میدان الکتریکی ورودی (E<sub>۰</sub>) بیان می‌شود. تقویت سیگنال SERS به‌طور تقریبی به توان چهارم نسبت این میدان الکتریکی تقویت شده به میدان ورودی نسبت داده می‌شود [۱۷].

تشدیدی برابر با اختلاف بین حداکثر بازتاب و بازتاب در طول موج تشدید است و می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بازده جفت‌شدگی بین نور فرودی و موج پلاسمون سطحی محسوب شود. هر چه عمق دره بیشتر باشد، جفت‌شدگی بهتر انجام شده است.



شکل (۲). الف) طیف بازتاب ساختار (ب) توزیع میدان الکتریکی در محل یکی از نانو دیسک‌ها با مقطع دایره‌ای، شعاع ۱۷۵ nm، ضخامت ۳۰ nm و نواحی اطراف آن.

در شکل ۲-ب، توزیع میدان الکتریکی نانو ساختار طلا در طول موج LSPR ساختار (۶۵۰ nm) ارائه شده است که نشانگر افزایش شدت میدان الکتریکی به دلیل حضور نانو ساختارهای طلا و نیز جفت‌شدگی حاصل از آرایه‌های فلزی است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میدان الکتریکی در دو طرف دیسک بزرگ‌تر است و تشدید در سطح مشترک بین فلز و دی‌الکتریک رخ می‌دهد، که نشانگر وقوع تشدید پلاسمونیک در سطح فلز است.

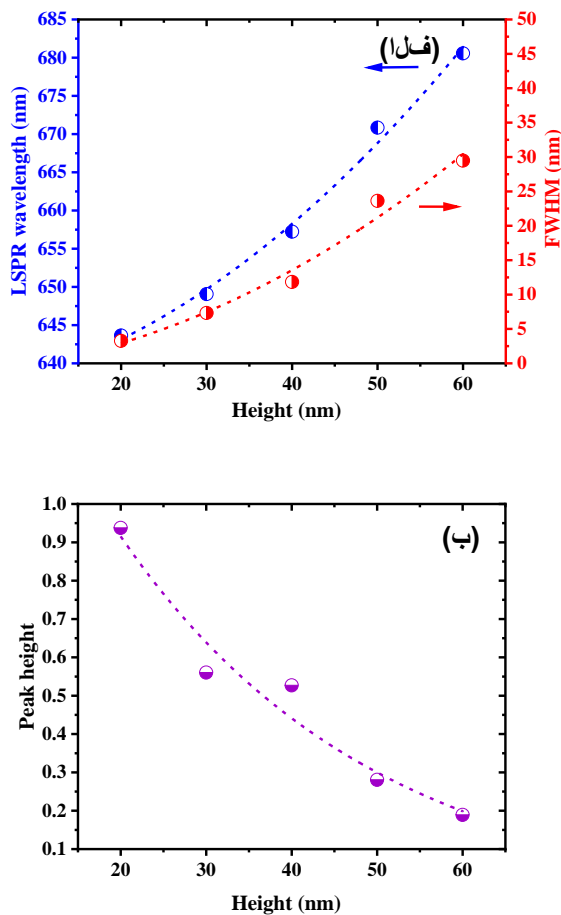
مؤلفه‌های ساختاری بر عملکرد حسگر تشدید پلاسمونیک تأثیر می‌گذارند. برای دستیابی به عملکرد بهینه حسگر لازم است که پارامترهای ساختاری حسگر بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل شود. به همین دلیل تأثیر ضخامت دیسک‌ها بر حسگر نوری پیشنهادی در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- تأثیر ضخامت نانو دیسک‌ها

شکل ۳ تغییرات طیف بازتاب ساختار مورد بررسی را به ازای ضخامت‌های مختلف نانو دیسک‌های طلا در محدوده طول موج

<sup>۱</sup> Surface-enhanced Raman Scattering

عددی و محاسبه شیب خط نمودارهای موجود در شکل‌های ۷-۷-۷ و ۷-۷-۷ استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که حساسیت ساختار پیشنهادی در حسگری محیط گازی و مایع با افزایش ضخامت نانو دیسک‌ها از ۲۰ تا ۶۰ nm به ترتیب در بازه ۶۰۰ تا ۶۴۸ nm/RIU و ۵۸۸ تا ۶۷۴ nm/RIU تغییر می‌کند. بیشترین حساسیت حسگر پیشنهادی در حسگری محیط‌های گازی و مایع به ترتیب در ضخامت نانو دیسک‌های ۴۰ nm و ۶۰ nm به دست می‌آید. همچنین، حساسیت این حسگر برای محیط گازی و مایع در ضخامت نانو دیسک‌های طلا برابر ۵۰ nm بسیار نزدیک به هم و تقریباً برابر ۶۴۰ nm/RIU است. به منظور مقایسه در جدول ۱، حساسیت برخی ساختارهای تشدید پلاسمون سطحی گزارش شده در مقالات معتبر جهانی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، حساسیت ساختارهای پیشنهادی در هر دو محیط گازی و مایع بسیار مناسب است و این ساختار گزینه مناسبی برای حسگری حسگر اپتیکی چند کاربردی در محیط‌های مایع و گازی است.

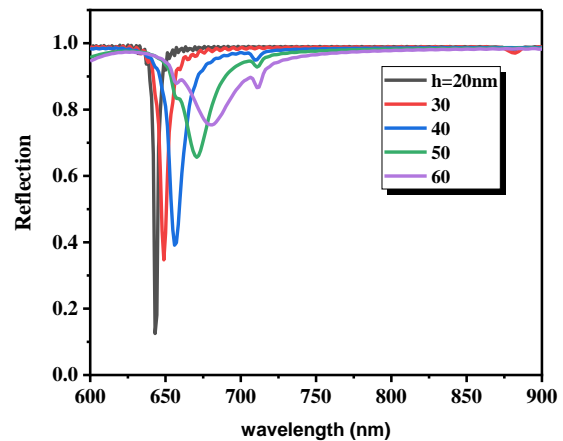


شکل (۴). نمودار الف) طول موج LSPR و FWHM و ب) ضخامت قله‌های LSPR بر حسب ضخامت آرایه‌های نانو دیسک‌های طلا در ساختار پیشنهادی.

$$SERS_{Enhancement} \propto (E/E_0)^4 \quad (2)$$

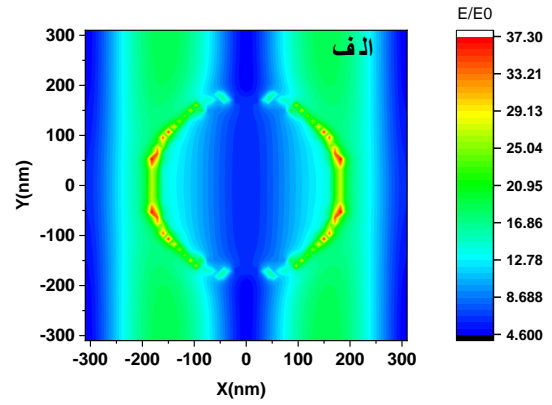
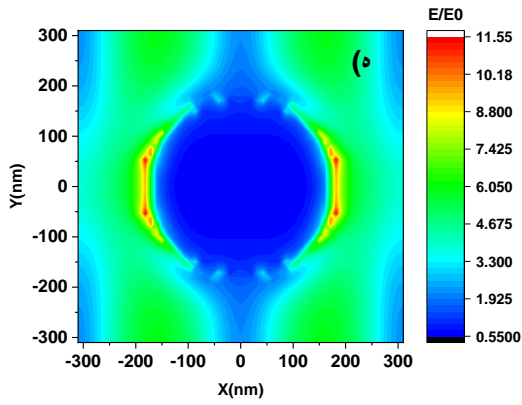
به منظور بررسی کارایی ساختار حسگر پیشنهادی در طیف‌سنجی مبتنی بر پراکندگی رامان ارتقا یافته سطحی (SERS)، نمودار توزیع دامنه میدان الکتریکی بهنجار در شکل‌های ۵-الف تا ۵-ه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، نقاط داغ به دلیل جفت‌شدگی نانو دیسک‌ها در ساختار آرایه‌ای ایجاد شده بر روی فلز-دی‌الکترونیک-فلز ایجاد شده است و این پدیده به ازای ضخامت‌های مختلف نانو دیسک‌ها مشاهده می‌شود. بیشینه مقدار افزایش دامنه میدان تا ۳۲ برابر به ازای ضخامت نانو دیسک ۲۰ nm مشاهده می‌شود. از طرفی شدت رامان با توان چهارم این دامنه متناسب است که افزایش  $10^6 \times 1/0.48$  برابری در شدت رامان نمونه مورد سنجش با به کار بردن این ساختار نسبت به طیف‌سنجی رامان متداول را امکان‌پذیر می‌سازد.

در شکل ۶ نمودار بیشینه مقدار  $(E/E_0)$  بر حسب ضخامت نانو دیسک‌ها در ساختار پیشنهادی ارائه شده است. نتایج مؤید افزایش قابل توجه شدت تابش رامان با به کارگیری ساختار آرایه‌ای پیشنهادی است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش شدت رامان نسبت به طیف‌سنجی رامان متداول و سنتی تابعی از ضخامت نانو دیسک‌ها است و این مقدار با افزایش ضخامت نانو دیسک‌ها، کاهش می‌یابد و تابع‌نمایی کاهنده با ثوابت موجود در شکل ۶ به خوبی به نتایج عددی برازش می‌شود.

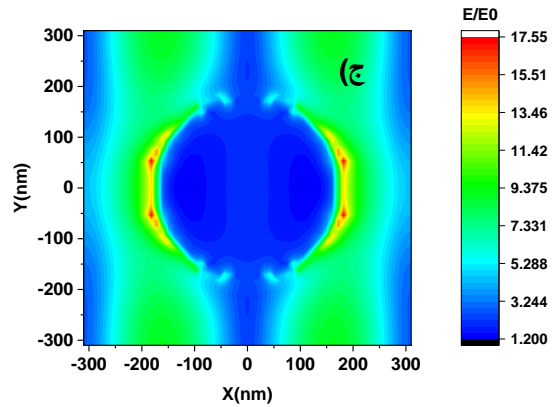
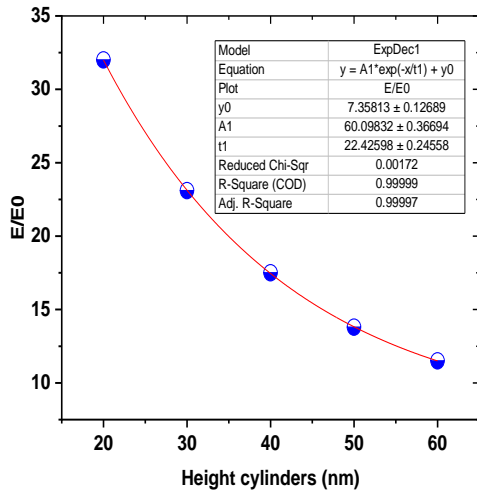
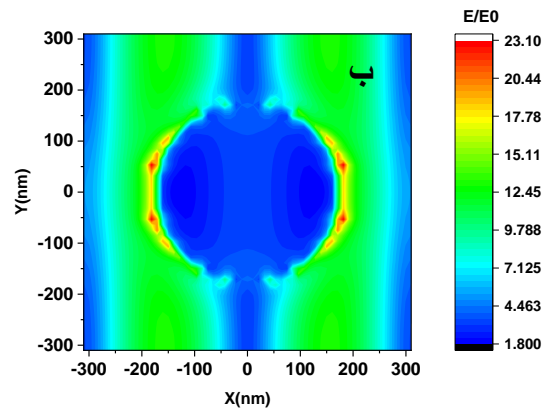


شکل (۳): طیف بازتاب آرایه‌های نانو دیسک‌های طلا بر روی MDM به ازای ضخامت‌های مختلف نانو دیسک‌ها و به ازای شعاع ثابت ۱۷۵ nm در محیط هوا.

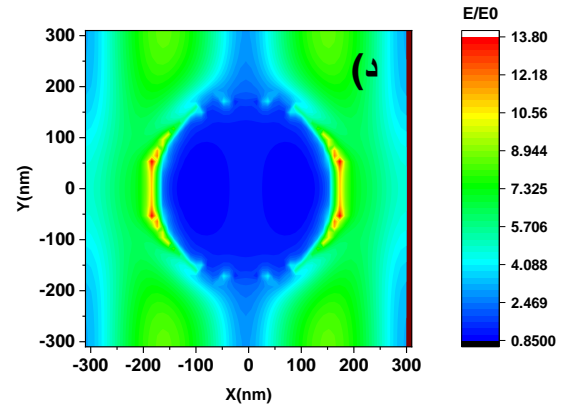
در ادامه این نانو ساختارهای پیشنهادی با ضخامت‌های مختلف نانو دیسک‌های برای حسگری گازی و مایع به کار گرفته شده و نتایج بررسی‌ها به ترتیب در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب ارائه شده است. حساسیت ساختارهای پیشنهادی در حسگری را می‌توان با نسبت جابجایی طول موج تشدید به تغییرات ضریب شکست به دست آورد. به این منظور، از روش برازش خط راست به داده‌های



شکل (۵). نمودار توزیع میدان الکتریکی به هنجار شده در طول موج LSPR برای ساختار پیشنهادی به ازای ضخامت‌های مختلف نانو دیسک‌های طلا، الف) ۲۰ nm، ب) ۳۰ nm، ج) ۴۰ nm، د) ۵۰ nm و ه) ۶۰ nm.



شکل (۶). بیشینه افزایش E/E0 در اطراف ساختار پیشنهادی و تابع برازش شده به نتایج.

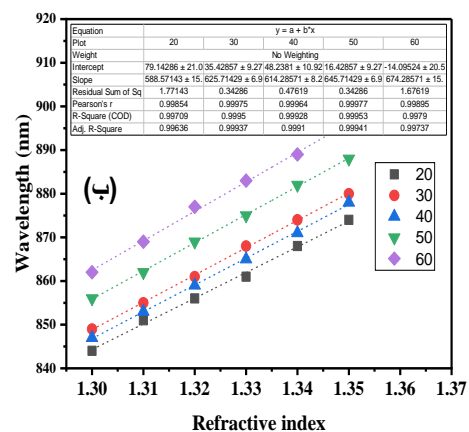
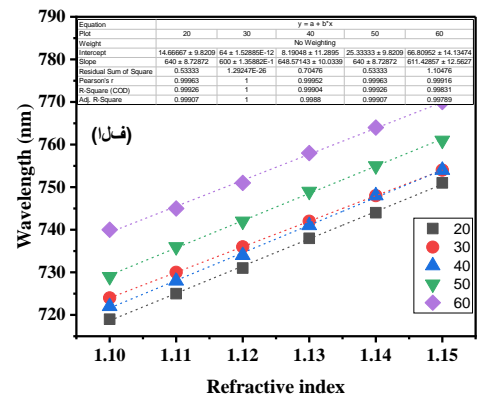


جدول (۱). مقایسه حساسیت ساختار حسگر پیشنهادی با سایر حسگرهای گزارش شده در مقالات علمی.

مرجع	حساسیت $nm/RIU$	ارتفاع (nm)	ساختار
[۱۸]	۵۴۲	۵۰	نانو میله‌های نقره
[۱۹]	۳۶۲	۱۰۰	نانو میله‌های $Al_2O_3$ - طلا
[۲۰]	۴۵۶	۵۰-۲۰	آرایه چندلایه نقره-دی‌الکتریک - نقره
[۲۱]	۵۷۷	-	آرایه‌ای از نانو حلقه‌های طلا

### ۵- مراجع

- [۱] L. Jauffred, A. Samadi, H. Klingberg, P. M. Bendix, and L. B. Oddershede, "Plasmonic heating of nanostructures," *Chemical Reviews*, vol. ۱۱۹, no. ۱۳, pp. ۸۰۸۷-۸۱۳۰, ۲۰۱۹  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00738>
- [۲] H. Mehrzad and E. Mohajerani, "Liquid crystal mediated active nano-plasmonic based on the formation of hybrid plasmonic-photonic modes," *Applied Physics Letters*, vol. ۱۱۲, no. ۶, p. ۰۶۱۱۰۱, ۲۰۱۸.  
<https://doi.org/10.1063/1.5004076>
- [۳] H. Rasouli Noori, J. Khalilzadeh, M. Shahamat, and A. Riahi, "Design and Simulation of a Novel Surface Plasmon Based Bio-Nanosensor for Detection of DNA Hybridization," *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, vol. ۱۱, no. ۳, pp. ۲۷۵-۲۷۸, ۲۰۲۰ (In Persian).  
 DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762930.139.11.3.5.8>
- [۴] S. Dutta Choudhury, R. Badugu, K. Ray, and J. R. Lakowicz, "Steering fluorescence emission with metal-dielectric-metal structures of Au, Ag, and Al," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. ۱۱۷, no. ۳۰, pp. ۱۵۷۹۸-۱۵۸۰۷, ۲۰۱۳.  
<https://doi.org/10.1021/jp4051066>
- [۵] Y.-F.C. Chau, C.-T.C. Chao, H.-J Huang et al., "Perfect dual-band absorber based on plasmonic effect with the cross-hair/nanorod combination," *Nanomaterials*, vol. ۱۰, no. ۳, p. ۴۹۳, ۲۰۲۰.  
<https://doi.org/10.3390/nano10030493>
- [۶] C.-T.C Chao et al., "Visible-range multiple-channel metal-shell rod-shaped narrowband plasmonic metamaterial absorber for refractive index and temperature sensing," *Micromachines*, vol. ۱۴, p. ۳۴۰, ۲۰۲۳.  
<https://doi.org/10.3390/mi14020340>
- [۷] D.-D Zhu et al., "Research on surface plasmon resonance sensing of metal nano hollow elliptic cylinder," *Plasmonics*, vol. ۱۸, no. ۶, pp. ۲۴۰۵-۲۴۱۳, ۲۰۲۳.  
<https://doi.org/10.1007/s11468-023-01930-w>
- [۸] W. Yi, W. Bing, and Z.-P. Zhang, "Tunable omnidirectional surface plasmon resonance in cylindrical plasmonic structure," *Chinese Physics Letters*, vol. ۲۵, no. ۱۲, pp. ۴۳۸۸-۴۳۹۰, ۲۰۰۸.  
<https://doi.org/10.1088/0256-307X/25/12/057>
- [۹] J. Jiang, Y. Xu, Y. Li, et al., "Triple-band perfect absorber based on the gold-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-grating structure in visible and near-infrared wavelength range," *Optics and Quantum Electronics*, vol. ۵۴, no. ۱, pp. ۱-۱۵, ۲۰۲۲.  
 DOI:[10.1007/s11082-021-03422-9](https://doi.org/10.1007/s11082-021-03422-9)
- [۱۰] M Vahedi ., A Riahi, "Theoretical study of the effect of the layer thickness on the sensitivity of tapered fiber optic sensors," *Applied Electromagnetics*, vol. ۱۱, no. ۱, pp. ۸۷-۹۳, ۲۰۲۳. (In Persian).  
 DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26450153.140.2.11.1.9.0>



شکل (۷). نمودار تغییرات طول موج تشدید بر حسب تغییرات ضریب شکست در محیط الف (گازی و ب) مایع به ازای ضخامت‌های مختلف نانو دیسک‌ها در ساختار آرایه‌ای پیشنهادی.

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار حسگر نوری مبتنی بر ساختار سه‌بعدی فلز-دی‌الکترونیک-فلز با آرایه‌هایی از نانو دیسک‌های طلا برای حسگری هم‌زمان محیط‌های گازی، مایع و نیز SERS پیشنهاد و شبیه‌سازی شده است. این نانو ساختار سه‌بعدی بر اساس تشدید پلاسمون عمل می‌کند. در ادامه، تأثیر ضخامت نانو دیسک‌ها بر کمیت‌های عملکردی ساختار مثل طول موج تشدید پلاسمون، ارتفاع و پهنای قله جذب مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، تأثیر ضخامت نانو دیسک‌ها بر قابلیت به‌کارگیری ساختار در طیف‌سنجی مبتنی بر SERS در مقایسه با طیف‌سنجی رامان متداول ارائه شد. نتایج بررسی هم‌زمان ساختار حسگر نوری پیشنهادی در حسگری مایعات و گازها نشان داد که این ساختار با حساسیت بالا می‌تواند در حسگری این دو محیط به کار گرفته شود و بنابراین، گزینه مناسبی برای حسگری نوری مایعات، گازها و نیز تشخیص پیوندهای مولکولی با روش SERS است.

- [۱۶] C.-T.C Chou et al., "Biosensing on a plasmonic dual-band perfect absorber using intersection nanostructure," *ACS Omega*, vol., no., pp., ۱۱۳۹-۱۱۴۹, ۲۰۲۲.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05714>
- [۱۷] P. Li, Y. Zhang, C. Liu, and J. Wang, "Fundamentals and applications of surface-enhanced Raman spectroscopy-based biosensors," *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. ۱۳, pp. ۵۱-۵۹, ۲۰۲۰.  
<https://doi.org/10.1016/j.cobme.2020.05.005>
- [۱۸] S. Jiao, Y. Li, and K. Ma, "Design of infrared plasma absorber with high refractive index sensitivity," *Plasmonics*, vol. ۱۶, no. ۵, pp. ۱۰۹۹-۱۱۰۶, ۲۰۲۱.  
<https://doi.org/10.1007/s11468-021-01372-2>
- [۱۹] J. Jiang et al., "Triple-band perfect absorber based on the gold-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-grating structure in visible and near-infrared wavelength range," *Optical and Quantum Electronics*, vol. ۵۴, no. ۱, p. ۴۳, ۲۰۲۲.  
<https://doi.org/10.1007/s11082-021-03422-9>
- [۲۰] C. Liang, Z. Yi, X. Chen, et al., "Dual-band infrared perfect absorber based on a Ag-dielectric-Ag multilayer films with nanoring grooves arrays," *Plasmonics*, vol. ۱۵, pp. ۹۳-۱۰۰, ۲۰۲۰.  
<https://doi.org/10.1007/s11468-019-01018-4>
- [۲۱] S. Wang et al., "The investigation of an LSPR refractive index sensor based on periodic gold nanorings array," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. ۵۱, no. ۴, p. ۰۴۵۱۰۱, ۲۰۱۸.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6462/aa9d30>
- [۲۲] F. Bashiri., A. Riahi., H. Moradi., "Designing and manufacturing of the laboratory optical fiber sensor for detection of the gas pressure by Fabry-Perot method and the investigation of the effect of the polymer material on its sensitivity," *Applied Electromagnetics*, vol., no., pp., ۱۱۹-۱۲۵, ۲۰۲۳ (In Persian).  
DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26450103.14.2.11.2.11.4>
- [۲۳] M. Mansoursamaei., A. Malakzadeh., "A new simulation method for calculating temperature and strain at the same time by fiber Bragg grating sensor," *Applied Electromagnetics*, vol., no., pp., ۱-۸, ۲۰۲۳ (In Persian).  
DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26450103.14.2.11.1.1.2>
- [۲۴] V. Amendola, "Surface plasmon resonance of silver and gold nanoparticles in the proximity of graphene studied using the discrete dipole approximation method," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. ۱۸, no. ۳, pp. ۲۲۳۰-۲۲۴۱, ۲۰۱۶.  
<https://doi.org/10.1039/C6CP06121K>
- [۲۵] J. B. Schneider, "Understanding the finite-difference time-domain method," *School of Electrical Engineering and Computer Science, Washington State University*, ۲۰۱۰.
- [۲۶] P. K. Jain, W. Huang, I. H. El-Sayed, and M. A. El-Sayed, "Noble Metal Nanoparticles for the Enhanced Optical Detection of Biological Species," *The Journal of Chemical Physics*, vol. ۱۱۷, no. ۲۱, pp. ۲۴۹۷-۲۵۰۲, ۲۰۰۷.  
<https://doi.org/10.1006/jcpa.2000.9031>

