



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

### Analytical approach for Sensitivity estimation of absorber-based RI sensor from the frequency shift slope

Bahareh Khodadadi<sup>a</sup>, , Pejman Rezaei<sup>b\*</sup> 

<sup>a</sup> Electrical and Computer Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>b</sup> Electrical and Computer Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran.

#### PAPER INFO

##### **Paper history:**

Received: 2025-04-14

Revised: 2025-04-14

Accepted: 2025-04-14

##### **Keywords:**

perfect absorber;

Biosensor;

Metamaterial;

Graphene;

Refractive Index sensor;

maximum sensitivity

#### ABSTRACT

In this paper, a proposal is outlined for a single-narrow band metamaterial absorber designed to operate within the THz field. The structure comprises a combination of graphene and silver placed on top of  $SiO_2$  in the subsequent layer, and silver at the bottom. Absorption is at its best at a frequency of 9.38, with 99.7% absorbance and a quality factor of 17.67. The symmetrical nature of the structure results in identical frequency and absorption percentages for both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarizations. The frequency of the resonance is influenced by the refractive index of the medium around the absorber, indicating that the presented structure has the potential to serve as a highly sensitive sensor for refractive index measurements. We have effectively analyzed the sensor's performance and obtained a precise estimation of its maximum sensitivity by determining the slope of the resonance frequency change line resulting from variations in the refractive index. The suggestion sensor demonstrates heightened sensitivity and an admirable figure of merit (FOM) which is highly applicable in medical contexts. The refractive index typically ranges from 1.34 to 1.39 for the majority of biological samples. The potential uses of the absorber encompass high-resolution imaging and precise biomedical detecting and sensing, etc.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.( <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address [prezaei@semnan.ac.ir](mailto:prezaei@semnan.ac.ir)

How to cite this article:

## رویکردی تحلیلی جهت تخمین حساسیت زیست حسگر ضریب شکست مبتنی بر جاذب از شیب تغییر فرکانس

بهاره خدادادی<sup>۱</sup> و پژمان رضائی<sup>۲\*</sup>

| اطلاعات مقاله             | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰  | در این مقاله، یک جاذب فراماده با یک باند باریک برای کار در حوزه تراهرتز ارائه شده است. این ساختار شامل ترکیبی از گرافن و نقره است که توسط لایه‌ای از دی اکسید سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ ) از یکدیگر جدا شده‌اند. فرکانس جذب در بهترین حالت با جذب ۹۹.۷ درصد برابر با ۹.۳۸ تراهرتز و مؤلفه کیفیت برابر با ۱۷.۶۷ است. ماهیت متقارن ساختار منجر به فرکانس و درصد جذب یکسان برای قطبش‌های الکتریکی عرضی (TE) و مغناطیسی عرضی (TM) می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فرکانس تشدید بسیار تحت تأثیر ضریب شکست محیط اطراف جاذب است، بنابراین ساختار ارائه شده، این قابلیت را دارد که به عنوان یک حسگر بسیار حساس برای اندازه‌گیری ضریب شکست عمل کند. ما به طور جامع عملکرد حسگر را تجزیه و تحلیل کرده و با تعیین شیب خط تغییر فرکانس تشدید ناشی از تغییرات در ضریب شکست، تخمین دقیقی از حداکثر حساسیت آن به دست آورده‌ایم. حسگر پیشنهادی دارای حساسیت بالایی است که این ویژگی آن را برای کاربردهای پزشکی مناسب می‌سازد. ضریب شکست، معمولاً برای اکثر نمونه‌های زیستی از ۱.۳۴ تا ۱.۳۹ متغیر است. کاربردهای بالقوه جاذب موردنظر شامل تصویربرداری با وضوح بالا و تشخیص و سنجش زیست پزشکی دقیق و غیره است. |
| بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>واژگان کلیدی:</b>      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| جاذب کامل،                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| زیست حسگر،                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| فرامواد،                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| گرافن،                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| حسگر ضریب شکست،           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| حساسیت بیشینه             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### ۱- مقدمه

فرامواد الکترومغناطیسی<sup>۱</sup>، یک دسته از مواد ترکیبی و مهندسی شده با خواص الکترومغناطیسی ویژه هستند، که در مواد طبیعی وجود ندارد [۱]. جاذب‌های فرامواد، متشکل از تشدیدکننده‌های الکتریکی و/یا مغناطیسی است که جذابیت قابل توجهی را در بین محققان به دست آورده است. کاربردهای نوینی از جاذب‌های الکترومغناطیسی مهندسی

شده شامل سنجش غیرمخرب [۲، ۳]، تصویربرداری طیفی [۴]، کنترل امضا [۵] و ارتباطات [۶] و غیره است. ساختار اکثر جاذب‌های کامل شامل پیکربندی‌های فراماده بر روی یک لایه دی‌الکتریک است. این جاذب‌ها دارای پتانسیل قابل توجهی برای طیف متنوعی از کاربردها شامل سیستم‌های نوری [۷]، تصویربرداری حرارتی [۸] و آشکارسازهای طیف‌سنجی [۹، ۱۰] می‌باشد.

<sup>1</sup> Electromagnetic Metamaterial

در این مقاله با توجه به مطالعات قبلی، یک جاذب کامل فراسطوحی در حوزه تراهرتز با استفاده از گرافن ارائه شده است که دارای قابلیت تنظیم بوده و به قطبش بستگی ندارد. این طرح شامل چهار حلقه در بین دو خط متقاطع از جنس گرافن قرار گرفته است. ساختار جاذب با نوارهای نقره‌ای در طرفین تکمیل می‌شود. این عناصر همگی روی لایه‌ای از دی اکسید سیلیکون (سیلیکا) قرار گرفته‌اند. یک نوار نازک از جنس نقره در لایه پایینی جاذب به کار رفته است. اوج جذب به بیش از ۹۹ درصد در فرکانس ۹.۳۸ تراهرتز می‌رسد. با تنظیم متغیرها، از جمله ابعاد ساختار طراحی شده، می‌توانیم فرکانس اوج جذب را متناسب با کاربرد موردنظر به دلخواه تغییر دهیم. استفاده از گرافن در لایه بالایی این قابلیت را فراهم می‌کند تا فرکانس تشدید بدون نیاز به تغییر در ابعاد جاذب، تنظیم شود [۲۷].

ساختار طراحی شده تحت تأثیر قطبش نیست و عملکرد پایدار را بدون توجه به زاویه نور ورودی تضمین می‌کند. همچنین، این مقاله یک روش تحلیلی برای تعیین حداکثر حساسیت حسگر ضریب شکست مبتنی بر جاذب‌های فراماده معرفی کرده است. برخلاف روش‌های کلاسیک، که به محاسبات گسترده برای تعیین و مقایسه همه حساسیت‌ها برای یافتن تقریب حداکثر حساسیت حسگر نیاز دارند، رویکرد ما دستورالعمل ساده‌تری برای دستیابی به حداکثر حساسیت ارائه می‌دهد.

این حسگر برای مصارف زیست‌پزشکی مناسب است. به طور خاص، سلول‌های جورکات<sup>۲</sup> و پستان دارای ضریب شکست بین ۱.۳۵ و ۱.۳۹ هستند [۲۸]. حساسیت سازه، رقم شایستگی<sup>۳</sup> و مؤلفه کیفیت<sup>۴</sup> به عنوان عوامل سنجش عملکرد حسگر زیست‌پزشکی می‌تواند به ترتیب به ۳.۲۱ THz/RIU، ۵.۳۴ RIU/1 و ۲۰.۴۵ برسد. ارائه حسگری در حوزه تراهرتز با حساسیت عالی و وضوح بالا، می‌تواند برای طیف وسیعی از کاربردها در حوزه پزشکی، از جمله تشخیص انواع سرطان و سلول‌های بدخیم در مراحل اولیه و سایر بیماری‌ها بسیار ارزشمند باشد [۲۹-۳۱].

در حوزه تراهرتز، محققان به طور فزاینده‌ای به جاذب‌های کامل علاقه‌مند شده‌اند. شکاف تراهرتز که عموماً از ۰.۱ تا ۱۰ تراهرتز را شامل می‌شود، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۱، ۱۲]. لندی و همکاران، در سال ۲۰۰۸ بحث گسترده‌ای را در مورد آن آغاز کردند [۱۳]. متعاقباً، تائو و همکاران، جاذب کامل فراماده را برای اولین بار معرفی کردند که در محدوده فرکانس تراهرتز کار می‌کرد و نرخ جذب ۹۸٪ را در ۱.۱۲ تراهرتز ارائه داده است [۱۴].

گرافن به دلیل خواص منحصربه‌فرد و ساختار لانه زنبوری‌اش به عنوان یک ماده امیدوارکننده برای توسعه جاذب‌های تراهرتز شناخته شده است. این ماده در فن‌آوری‌های تراهرتز محبوبیت بسیاری پیدا کرده، زیرا می‌تواند پلاریتون‌های پلاسمون سطحی (SPP<sup>۱</sup>) را در فرکانس‌های بالا منتشر کند [۱۵] و همچنین فرکانس تشدید آن را می‌توان با افزودن مواد ناخالص یا با اعمال یک ولتاژ جریان مستقیم خارجی تغییر داد [۱۶]. علاوه بر این، رسانایی با اتلاف گرافن در حوزه تراهرتز، آن را در طراحی جاذب، مؤثر می‌کند [۱۷، ۱۸].

انواع مختلفی از جاذب‌های کامل از جمله جاذب‌های باند باریک تک‌باند [۱۱، ۱۹]، دوباند و چندباند [۲۰، ۲۱] و نیز جاذب‌های پهن‌باند [۲۲، ۲۳] در تحقیقات اخیر معرفی شده‌اند. در یک مطالعه در سال ۲۰۲۳ [۲۴]، محققان یک جاذب مبتنی بر گرافن را گزارش کردند که قابل تنظیم بوده و نسبت به قطبش حساس نیست. این مطالعه همچنین شامل یک مدل دقیق با استفاده از تجزیه و تحلیل خطوط انتقال است. تجزیه و تحلیل و ارزیابی این جاذب محدود به موقعیت‌هایی است که نور مستقیماً از زاویه عمود بر آن برخورد می‌کند. یک مطالعه دیگر، ساختاری با یک لایه گرافن طرح‌دار با جذب ۹۸ درصد را ارائه نمود که به دلیل شکل نامتقارن آن به زاویه قطبش حساس است [۲۵]. علاوه بر این، محققان یک ساختار مبتنی بر گرافن با پهنای باند وسیع در حوزه تراهرتز معرفی کرده‌اند. به منظور افزایش پهنای باند این جاذب، ساختار با چندین لایه گرافن طراحی شده است [۲۶].

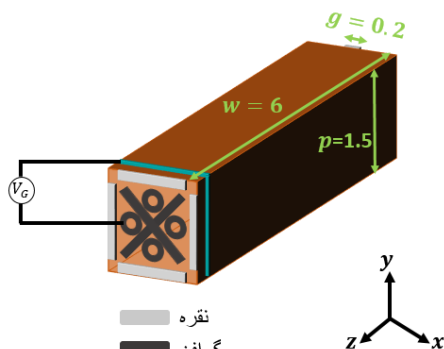
<sup>1</sup> Surface Plasmon Polaritons

<sup>2</sup> Jurkat

<sup>3</sup> Figure of Merit (FoM)

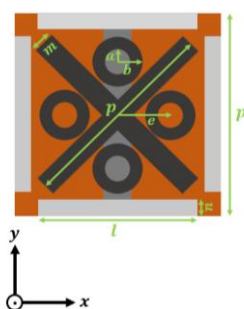
<sup>4</sup> Quality Factor (Q)

در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است، لایه‌های پلی‌سیلیکون و گرافن به طور مؤثر توسط یک لایه نازک سیلیکا ایزوله شده‌اند. نکته قابل توجه این است که ضخامت لایه پلی‌سیلیکون، که با  $t_p$  نشان داده شده است، آنقدر ناچیز بوده که بر نتایج شبیه‌سازی تأثیر نمی‌گذارد یا عملکرد ساختار را به خطر نمی‌اندازد. این انتخاب طراحی، کارایی و اثربخشی رویکرد ما را برجسته می‌کند و عملکرد کلی سیستم را افزایش می‌دهد [۳۳].

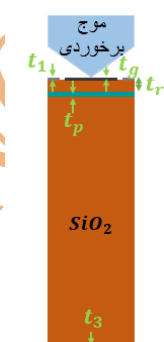


نقره  
گرافن  
سیلیکا  
پلی‌سیلیکون

(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱: شماتیک ساختار جاذب (الف) طرح سه بعدی، (ب) سلول واحد، (ج) نمای جانبی

## ۲- پیکربندی و مدل‌سازی ساختار جاذب فراماده

طرح جاذب فراماده پیشنهادی برای دستیابی به جذب بهینه، در شکل ۱ ارائه شده است. این طرح شامل چهار حلقه گرافنی است که بین دو خط متقاطع قرار گرفته و چهار نوار نقره‌ای گرافن طرح‌دار را احاطه کرده است. این ساختار فراماده، لایه بالایی بستر را تشکیل می‌دهد که شکلی مربع با ابعاد  $1.5 \times 1.5 \times 6$  میکرومتر دارد. شکل ۱ (ب) و (ج) جزئیات بیشتری را در مورد این ساختار ارائه می‌دهد. ابعاد سازه معرفی شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

سلول واحد شامل گرافن و نقره بر روی بستری از دی‌الکتریک دی‌اکسیدسیلیکون (سیلیکا) با گذردهی  $2.25$  قرار گرفته است. نقره مورد استفاده برای لایه بالایی و نوار پایینی دارای رسانایی الکتریکی  $6.3012 \times 10^{12} S/m$  می‌باشد [۳۲].

رسانایی گرافن می‌تواند با تنظیم سطح فرمی آن از طریق دو روش اصلی آرایش شیمیایی و گیت الکتریکی تغییر کند. در روش گیت الکتریکی، همان طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است، ولتاژ مستقیم خارجی به لایه‌های گرافن و پلی‌سیلیکون اعمال شده تا تغییرات لازم در رسانایی گرافن ایجاد شود. ولتاژ گیت، پتانسیل شیمیایی گرافن را طبق معادله (۱) تنظیم می‌کند.

$$V_G = n_s e t_2 / \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1)$$

مقدار چگالی حامل بار ( $n_s$ ) با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$n_s = \frac{2}{\pi h^2 V_F^2} \int_0^\infty \epsilon [f_d(\epsilon, \mu_c, T) - f_d(\epsilon + 2\mu_c, \mu_c, T)] d\epsilon \quad (2)$$

که در آن  $V_F = 9.5 \times 10^5 m/s$  سرعت فرمی،  $\epsilon$  نشان دهنده انرژی،  $f_d(\epsilon, \mu_c, T)$  و  $f_d(\epsilon + 2\mu_c, \mu_c, T)$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_d(\epsilon, \mu_c, T) = \frac{1}{(e^{(\epsilon - \mu_c)/(k_B T)} + 1)} \quad (3)$$

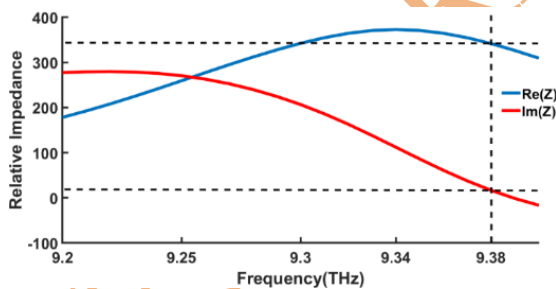
$$f_d(\epsilon + 2\mu_c, \mu_c, T) = \frac{1}{(e^{(\epsilon + \mu_c)/(k_B T)} + 1)} \quad (4)$$

در پیاده‌سازی این روش، اجزای گرافنی که توسط یک شکاف از هم جدا شده‌اند، باید یا به صورت سری به هم متصل شوند یا به صورت جداگانه به ولتاژهای بایاس مستقیم خارجی جداگانه متصل شوند تا سطح ولتاژ یکسانی را که با  $V_G$  نشان داده می‌شود، حفظ کنند. همان‌طور که

آزاد نزدیک شود [۳۴]. هدف از این کار، کاهش بازتاب است. ویژگی‌های جذب را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = \frac{Z(\omega) - \eta_0}{Z(\omega) + \eta_0} = \frac{Z'(\omega) - 1}{Z'(\omega) + 1} \quad (۵)$$

$Z(\omega)$  امپدانس جذب را نشان می‌دهد،  $\eta_0$  به امپدانس فضای آزاد اشاره دارد و  $Z'(\omega)$  امپدانس نرمال شده است که با استفاده از متغیرهای  $S$  ارزیابی می‌شود. جذب بهینه زمانی اتفاق می‌افتد که قسمت حقیقی و قسمت موهومی امپدانس به ترتیب به یک و صفر نزدیک شوند. این بدان معناست که برای دستیابی به حداکثر جذب، امپدانس جذب باید با فضای آزاد تراز و برابر باشد [۳۵]. هنگامی که امپدانس‌ها به خوبی با هم تطبیق داده می‌شوند، بازتاب موج فرود کم می‌شود. تغییر عوامل هندسی ساختار فراماده می‌تواند نرخ بازتاب آن را تغییر داده و امپدانس آن را تحت تاثیر قرار دهد. شکل ۲ تغییرات امپدانس را در رابطه با فرکانس در ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد. در فرکانس تشدید ۹.۳۸ تراهرتز، امپدانس جذب با فضای آزاد مطابقت دارد و امکان جذب کامل و حداقل انعکاس را فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، برای اینکه جذب بهینه انجام شود، امپدانس جذب  $(Z = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r})$  باید با محیط اطراف  $(Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0})$  مطابقت داشته باشد [۳۶].



شکل ۲: بخش حقیقی و بخش موهومی امپدانس نسبی

جذب دارای ساختار تناوبی با دوره  $p=1.5$  میکرومتر در هر دو جهت  $X$  و  $Y$  است. موج فرودی در امتداد محور  $Z$  در صفحه  $XY$  منتشر می‌شود. جذب پیشنهادی در CST Studio Suite 2020 با تکنیک ادغام محدود<sup>۱</sup> پیاده‌سازی شده است. اندازه مش، با استفاده از مش‌بندی قابل انطباق به ۱۶ عنصر در هر طول موج بهینه شده است. شکل ۳ (الف) طیف جذب جذب را برای هر دو حالت TE و TM

هدف اصلی ما در طراحی یک جاذب موثر، ایجاد یک باند باریک با نرخ جذب واحد بود. این جاذب برای کاربرد بالقوه در حسگرهای ضریب شکست در ناحیه تراهرتز در نظر گرفته شده است. در ساختار ترکیبی از حلقه‌های گرافن و خطوط متقاطع استفاده شده، که در ساختار بسیاری از جاذب‌های ارائه شده در سال‌های اخیر به شکل‌های متنوع به کار گرفته شده است. برای بهبود کار، نوارهایی از جنس نقره را در اطراف الگوی گرافن با ضخامت یکسان قرار داده‌ایم که منجر به جذب تک باندهای بسیار نزدیک به واحد شد.

تجزیه و تحلیل گسترده‌ای در رابطه با ویژگی‌های الکترومغناطیسی مدل موردنظر انجام شد. تقارن عمودی سازه، فرکانس تشدید را تضمین می‌کند که به قطبش حساس نیست.

جدول ۱: متغیرهای هندسی جاذب ارائه شده در شکل ۱

| مقدار متغیر | مقدار متغیر | مقدار متغیر | مقدار متغیر |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $p$         | 1.5         | $a$         | $p/15$      |
| $m$         | $p/8$       | $n$         | $p/12.5$    |
| $e$         | $p/3.8$     | $w$         | 6           |
| $t_1$       | 0.001       | $t_g$       | 0.001       |
| $t_3$       | 0.05        | $t_r$       | 0.015       |
|             |             | $b$         | $p/9$       |
|             |             | $l$         | $p/2.6$     |
|             |             | $g$         | 0.2         |
|             |             | $t_p$       | $\ll t_r$   |

### ۳- بحث و نتایج شبیه‌سازی ساختار

رابطه اساسی و میزان جذب در جاذب‌ها را می‌توان با رابطه  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  بیان نمود، که در آن  $A(\omega)$  نشان‌دهنده جذب،  $R(\omega) = |S_{11}|^2$  بیانگر انعکاس از سازه و  $T(\omega) = |S_{21}|^2$  نشان‌دهنده انتقال از آن است. هنگامی که یک فلز با رسانندگی بالا و با ضخامت بیش از عمق پوسته در زمین جاذب استفاده شود، انعکاس از ساختار به صفر کاهش می‌یابد. در این حالت، رابطه جذب را می‌توان به  $A(\omega) = 1 - |\Gamma|^2$  ساده نمود که در آن،  $\Gamma$  نشان‌دهنده ضریب بازتاب است. بنابراین، بازتاب کمتر (که با  $|\Gamma|$  کوچکتر نشان داده می‌شود) منجر به جذب انرژی بیشتر توسط سازه می‌شود [۳۳].

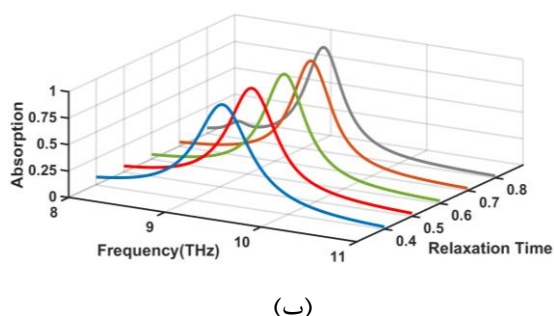
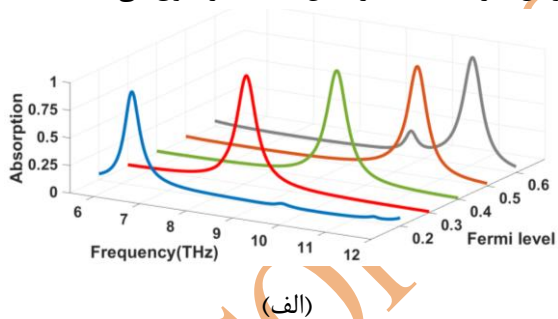
سلول واحد به گونه‌ای طراحی و بهینه شده است که امپدانس در فرکانس موردنظر، به امپدانس مشخصه فضای

<sup>1</sup> Finite Integration Technique (FIT)

جدول ۲: بررسی عملکرد جاذب

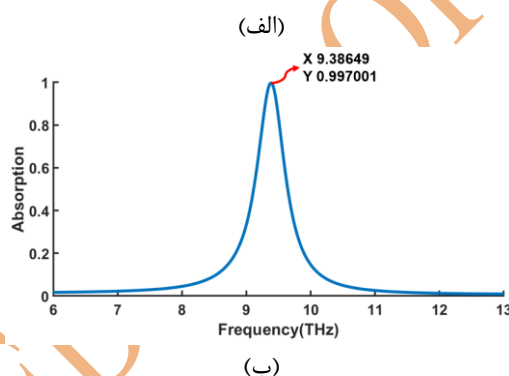
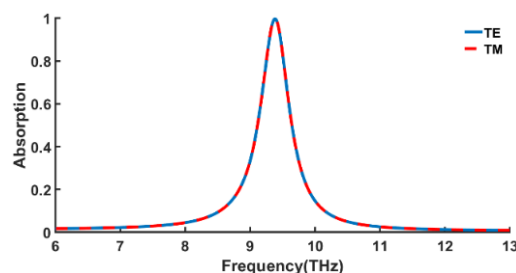
| مؤلفه | پهنای باند | میزان | فرکانس    | وضعیت   |
|-------|------------|-------|-----------|---------|
| کیفیت | نیم توان   | جذب   | تشدید     | قطبش    |
|       | (تراهرتز)  | (%)   | (تراهرتز) |         |
| ۱۷.۶۷ | ۰.۵۳۰۳۶    | ۹۹.۷  | ۹.۳۸۶۵    | TM و TE |

پتانسیل شیمیایی ( $\mu$ ) یک کمیت بنیادی در ترمودینامیک است که انرژی لازم برای افزودن یک ذره اضافی به سیستم را نشان می‌دهد و در تعیین رفتار الکترونیکی گرافن نقش مهمی دارد. گرافن قابلیت تنظیم سطح فرمی خود را از طریق دو روش آلیش شیمیایی و اعمال ولتاژ بایاس خارجی دارد. در آلیش شیمیایی، با افزودن اتم‌ها یا مولکول‌های خارجی، سطح فرمی تغییر کرده که به دو دسته آلیش  $n$  و  $p$  تقسیم می‌شود. اعمال ولتاژ بایاس خارجی بر روی لایه گرافن، میدان الکتریکی ایجاد کرده و چگالی حامل بار و در نتیجه رسانایی آن را تغییر می‌دهد. در شبیه‌سازی انجام شده، پتانسیل شیمیایی در بازه ۰.۲ تا ۰.۶ الکترون‌ولت بررسی و همان‌طور که در شکل ۵(الف) مشاهده می‌شود، این افزایش باعث تغییر آبی در فرکانس‌های اوج جذب شده و آن‌ها را به سمت فرکانس‌های بالاتر سوق می‌دهد.



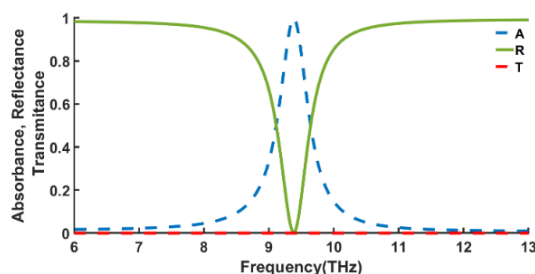
شکل ۵: تغییرات طیف فرکانسی در برابر (الف) تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن، (ب) تغییرات زمان آرامش گرافن

نشان می‌دهد که به دلیل تقارن ساختار، یکسان هستند. همان‌طور که در شکل ۳(ب) نشان داده شده است، جاذب به جذب ۹۹.۷٪ در فرکانس ۹.۳۸ تراهرتز دست می‌یابد.



شکل ۳: (الف) طیف جذب در حالت قطبش TE و TM، (ب) فرکانس اوج جذب

شکل ۴ طیف بازتاب، جذب و انتقال را برای جاذب فراماده ارائه شده نشان می‌دهد. تشدیدکننده‌های حلقه تقسیم شده<sup>۱</sup> و ساختارهای تشدید بخش‌بندی شده<sup>۲</sup> به کار رفته در طراحی، منجر به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی شده که به طور موثر امپدانس ساختار را با محیط اطراف ( $Z_0$ ) تطبیق داده و بازتاب از ساختار را کاهش می‌دهد. جدول ۲ گزارش کلی از عملکرد جاذب را ارائه می‌دهد.



شکل ۴: جذب ( $A(\omega)$ )، بازتاب ( $R(\omega)$ ) و انتقال ( $T(\omega)$ ) از ساختار

<sup>1</sup> split-ring resonators (SRRs)

<sup>2</sup> sectional resonance structure

سطوح جذب کمتری در ماده ایجاد می‌شود. به طور خاص، در زوایای تندتر، هندسه لایه‌ها باعث می‌شود که بخش بیشتری از میدان مغناطیسی ورودی به جای جذب، منعکس شود. این امر منجر به کاهش قابل توجهی در کارایی برهمکنش بین میدان مغناطیسی و اکسیدهای فلزی می‌شود که در نهایت منجر به حداقل جذب انرژی می‌شود [۲۸]. جدول ۳ تغییرات فرکانس تشدید جاذب با توجه به تغییرات در زاویه موج فرودی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: بررسی عملکرد جاذب با زاویه قطبش ثابت در برابر تغییرات زاویه موج برخوردی

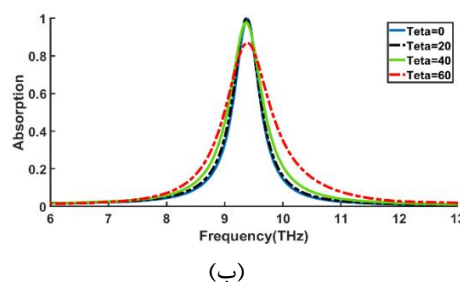
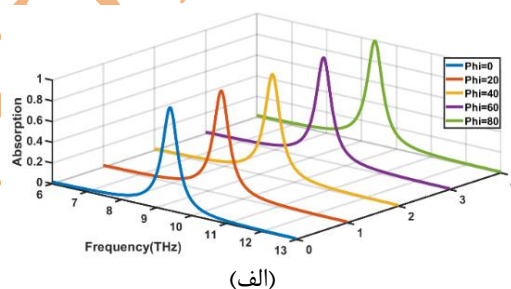
| مؤلفه     | پهنای باند | میزان     | فرکانس  | زاویه  |
|-----------|------------|-----------|---------|--------|
| کیفیت     | نیم‌توان   | جذب       | تشدید   | برخورد |
| (تراهرتز) | (%)        | (تراهرتز) |         |        |
| ۱۷.۶۷     | ۰.۵۳۰۳۶    | ۹۹.۷      | ۹.۳۸۶۴۹ | ۰      |
| ۱۸.۷۳     | ۰.۵۰۰۳۸    | ۹۹.۹۷     | ۹.۳۷۶۴۹ | ۲۰     |
| ۱۴.۱۸     | ۰.۶۶۰۴۶    | ۹۷.۸۷     | ۹.۳۶۶۴۸ | ۴۰     |
| ۱۱.۴۵     | ۰.۸۲۰۵۷    | ۸۶.۸۸     | ۹.۳۹۶۴۵ | ۶۰     |

با در نظر گرفتن زاویه تابش و قطبش طبیعی موج ورودی، واضح است که در فرکانس تشدید، نرخ جذب بیش از ۹۹ درصد است. شکل ۷ تغییرات در پهنای باند نیم‌توان (FWHM)، مؤلفه کیفیت (Q)، فرکانس تشدید، و میزان جذب را در رابطه با زاویه برخورد مشخص می‌کند.

برای درک بهتر مکانیزم جذب فیزیکی جاذب، ارزیابی جامعی از توزیع جریان در سطح لایه‌های بالایی و پایینی سازه انجام شد. توزیع جریان سطحی ناشی از برهمکنش امواج الکترومغناطیس برخوردی با جاذب کامل فرامواد در شکل ۸ در فرکانس تشدید نشان داده شده است. تشکیل یک حلقه جریان با جریان‌های غیرموازی در سراسر این لایه‌ها شواهد قانع‌کننده‌ای برای شروع حالت تشدید دوقطبی مغناطیسی فراهم می‌کند. این پدیده نشان می‌دهد که دوقطبی‌های مغناطیسی درون ماده به یک میدان مغناطیسی خارجی پاسخ می‌دهند که منجر به نوسان منسجم گشتاورهای مغناطیسی می‌شود. آرایش غیرموازی جریان‌ها نشان‌دهنده یک تعامل پیچیده بین لایه‌ها است، جایی که جریان‌های مخالف یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند که اثر تشدید را افزایش داده و باعث می‌شود که

زمان آرامش ( $t_r$ )، میانگین زمان بین رویدادهای پراکندگی حامل‌های بار را نشان داده و بر تحرک گرافن تأثیر می‌گذارد. با تغییر زمان آرامش، فرکانس اوج جذب و میزان نرخ جذب که در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است، تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۵، مقدار انتخاب شده برای پتانسیل شیمیایی گرافن برابر با ۰.۴ الکترون‌ولت و زمان آرامش ۰.۶ پیکوثانیه می‌باشد.

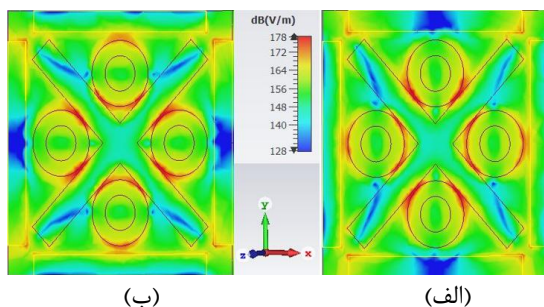
یکی از مزایای مهم برای جاذب، استقلال و عدم حساسیت به زاویه قطبش امواج ورودی و مقاومت قابل قبول در برابر تغییرات در زاویه تابش است. این امر نیاز به الزامات ویژه جهت قطبش خاص، برای استفاده از این تجهیزات را از بین می‌برد. در شکل ۶ (الف) و (ب)، تغییر فرکانس برای تغییرات در هر دو زاویه قطبش و زاویه موج فرودی به منظور ارزیابی مناسب بودن جاذب برای استفاده عملی نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییرات طیف فرکانسی در برابر (الف) تغییرات قطبش، (ب) تغییرات زاویه موج فرودی

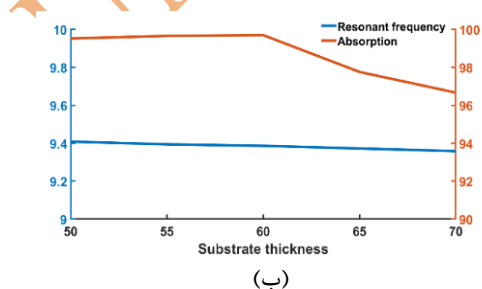
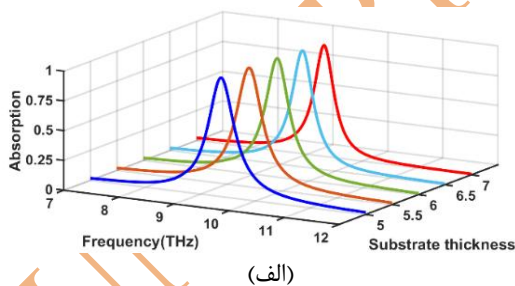
تغییرات طیف فرکانسی در زوایای مختلف برخورد در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. دامنه تشدید برای زوایای برخورد تا ۳۰ درجه بالای ۹۹ درصد باقی می‌ماند، اما با افزایش زاویه برخورد، درصد جذب کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه تابش، کاهش قابل توجهی در شار مغناطیسی در تعامل با لایه‌های اکسید فلزی وجود دارد. این کاهش به این دلیل اتفاق می‌افتد که ناحیه مؤثری که شار مغناطیسی می‌تواند از طریق آن نفوذ کند کاهش یافته و در نتیجه

شکل ۹ توزیع میدان الکتریکی برای حالت‌های TE و TM را نشان داده و بینشی در مورد فیزیک جاذب موردنظر در فرکانس تشدید ۹.۳۸ تراهرتز ارائه می‌کند. فرکانس اوج، بیشتر توسط فضای بین نوارهای ضربدری شکل و نوارهای حلقه شکل ایجاد شده است.



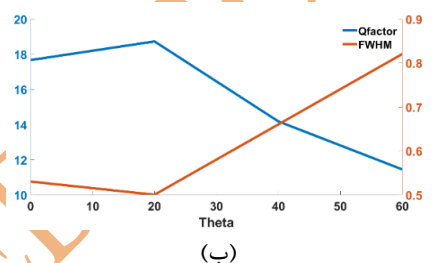
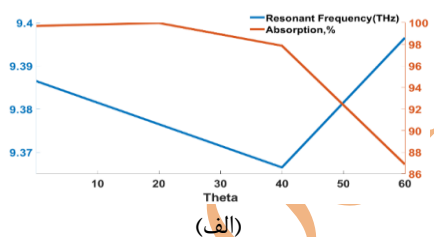
شکل ۹: توزیع میدان الکتریکی در فرکانس ۹.۳۸ تراهرتز (الف) حالت TM، (ب) حالت TE

تأثیر تغییر ارتفاع دی‌الکتریک بر محل فرکانس تشدید و شدت آن، هنگامی که عوامل دیگر ثابت هستند، در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با تغییر ارتفاع بستر دی‌الکتریک (w) از ۵ تا ۷ میکرومتر، فرکانس اوج تنها کمی به اندازه چند نانومتر تغییر می‌کند در حالیکه میزان جذب همچنان بالا (بیش از ۹۶.۵ درصد) باقی می‌ماند. از شکل ۱۰ (ب)، آشکار است که طول موج عملیاتی به مقدار کم تحت تأثیر تغییرات w است و بازده جذب تحت تأثیر ارتفاع دی‌الکتریک قرار نمی‌گیرد.

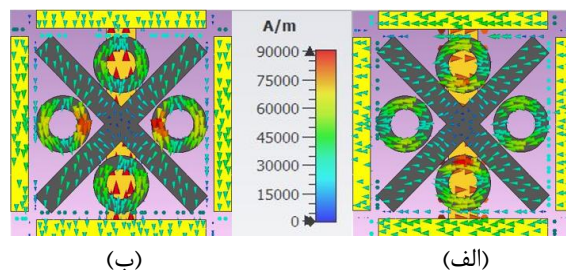


شکل ۱۰: (الف) تغییر فرکانس اوج با تغییر ارتفاع دی‌الکتریک (ب) تغییر فرکانس اوج و میزان جذب با تغییر ارتفاع دی‌الکتریک

شار مغناطیسی با میدان H مواجه شده، پیوند خورد [۳۷]. طیف جذبی از پاسخ تشدید مغناطیسی ناشی شده و در طول موج تشدید، جریان‌های سطحی در لایه پایینی در جهت مخالف جریان‌های لایه بالایی جریان می‌یابد. چگالی جریان سطحی در فرکانس اوج عمدتاً بر روی حلقه‌های گرافن و ساختار سیم پایین متمرکز است.



شکل ۷: تغییرات به هنگام تغییر زاویه تابش (الف) فرکانس تشدید و میزان جذب، (ب) مؤلفه کیفیت و پهنای باند نیم‌توان



شکل ۸: توزیع جریان سطحی در فرکانس ۹.۳۸ تراهرتز (الف) حالت TM، (ب) حالت TE

رفتار مشاهده شده با مدل مدار LC مطابقت دارد. این مدل، برهمکنش بین اندوکتانس (L) و خازن (C) را ترسیم می‌کند [۳۸]. معادله (۶)، رابطه بین فرکانس و طول پیک را نشان می‌دهد که با ویژگی‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل مدار LC همسو است. در این رابطه، فرکانس تشدید با f و طول سازه با w بیان شده است.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \propto \frac{1}{w} \quad (6)$$

در این قسمت بررسی‌های انجام گرفته، حول کاوش کاربردهای بالقوه برای ساختار فراماده ارائه شده در حوزه سنجش و استفاده از قابلیت‌های جذب آن است. زمانی که فقط ضریب شکست محیط افزایش یافته و سایر عوامل ثابت هستند، نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ (الف) نشان می‌دهند که فرکانس اوج به طور قابل توجهی به سمت چپ تغییر می‌کند. مشخصات حسگر در جدول ۴ نشان داده شده است. این ویژگی‌ها با استفاده از نتایج به دست آمده از شکل ۱۱

استخراج شده‌اند. این ویژگی‌های اساسی برای ارزیابی عملکرد حسگر از طریق روابط ۷ تا ۹ که در ادامه می‌آیند، تعیین می‌شوند [۴۷]:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n} \quad (7)$$

$$FoM = \frac{S}{FWHM} \quad (8)$$

$$Q_{factor} = \frac{f}{FWHM} \quad (9)$$

جدول ۴: ارزیابی عملکرد حسگر مورد نظر بر اساس تغییرات ضریب شکست

| مؤلفه کیفیت | رقم شایستگی (1/RIU) | حساسیت (THz/RIU) | پهنای باند نیم‌توان (تراهرتز) | میزان جذب (%) | فرکانس تشدید (تراهرتز) | ضریب شکست |
|-------------|---------------------|------------------|-------------------------------|---------------|------------------------|-----------|
| ۲۱.۴۵       | -                   | -                | ۰.۵۱                          | ۹۹.۶۸         | ۱۰.۹۴                  | ۱.۰       |
| ۲۰.۸۰       | ۲.۳۰                | ۱.۲              | ۰.۵۲                          | ۹۸.۱۸         | ۱۰.۸۲                  | ۱.۱       |
| ۲۰.۳۲       | ۳.۵۵                | ۱.۸۵             | ۰.۵۲                          | ۹۹.۸۶         | ۱۰.۵۷                  | ۱.۲       |
| ۲۰.۰۷       | ۳.۱۹                | ۱.۶۶             | ۰.۵۲                          | ۹۹.۳۹         | ۱۰.۴۴                  | ۱.۳       |
| ۱۶.۷۲       | ۵.۳۴                | ۳.۱              | ۰.۵۸                          | ۹۹.۲۳         | ۹.۷۰                   | ۱.۴       |
| ۱۵.۷        | ۵.۰۶                | ۳.۰۴             | ۰.۶                           | ۹۹.۰۴         | ۹.۴۲                   | ۱.۵       |
| ۱۵.۸۹       | ۴.۴۰                | ۲.۶              | ۰.۵۹                          | ۹۹.۵۰         | ۹.۳۸                   | ۱.۶       |
| ۱۶.۲۸       | ۴.۱۵                | ۲.۳۷             | ۰.۵۷                          | ۹۹.۸۵         | ۹.۲۸                   | ۱.۷       |
| ۱۳.۵        | ۵.۱۷                | ۳.۲۱             | ۰.۶۲                          | ۹۶.۲۶         | ۸.۳۷                   | ۱.۸       |
| ۱۲.۶۲       | ۴.۹۵                | ۳.۱۷             | ۰.۶۴                          | ۹۵.۸۵         | ۸.۰۸                   | ۱.۹       |

نشان می‌دهد که با معادله (۱۰) برای فرکانس اوج جذب مشخص می‌شود.

$$f = -3.2n + 14.34 \quad (10)$$

شیب معادله خط به دست آمده از تخمین تغییرات فرکانس تشدید ۳.۲ THz/RIU است که برابر با حداکثر حساسیت حسگر است. با استفاده از این رویکرد، می‌توان به تقریب خوبی از حداکثر حساسیت حسگر ضریب شکست دست یافت بدون اینکه نیاز به انجام محاسبات متعدد باشد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که میانگین حساسیت ۲.۴۶ THz/RIU است، در حالی که میانگین پهنای باند نیم‌توان ۰.۵۶ تراهرتز است. علاوه بر این، شکل ۱۱ (ب)، همبستگی بین تغییر در فرکانس تشدید و ضریب شکست محیط آزمایش را نشان می‌دهد. ستاره‌های قرمز در شکل نشان‌دهنده فرکانس تشدید برای ضریب شکست‌های مختلف است و خط آبی نشان‌دهنده تخمین خطی مجموعه داده فرکانس اوج است. برازش منحنی یک روند خطی بین فرکانس‌های اوج و ضریب شکست‌های محیط آزمایش را

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین گفته شد، ضریب شکست اکثر بافت‌های طبیعی و سرطانی در محدوده ۱.۳۴ تا ۱.۴ قرار می‌گیرد که محدوده نسبتاً محدودی را تشکیل می‌دهد و به عنوان محدوده زیست‌پزشکی شناخته می‌شود [۳۹، ۲۸]. به عنوان مثال در شرایط عادی، ضریب شکست یک سلول جوهرکات ۱.۳۷۶ است. در حالیکه، برای

سلول‌های سرطانی، این ضریب شکست برابر ۱.۳۹ است. در مورد سلول‌های پستان، اعداد ضریب شکست برای سلول‌های طبیعی ۱.۳۹۹ و برای سلول‌های سرطانی ۱.۳۸۵ است. عملکرد حسگر ارائه شده در تشخیص سلول‌های جوهرکات و سینه به ترتیب در جدول ۵ و جدول ۶ به تفصیل آمده است.

جدول ۵: ارزیابی عملکرد حسگر مورد نظر برای سنجش سلول جوهرکات

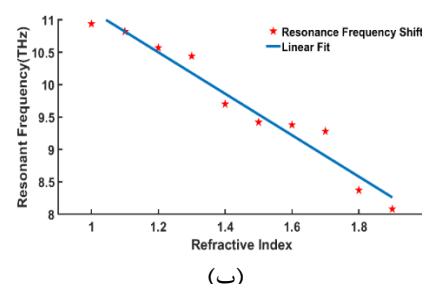
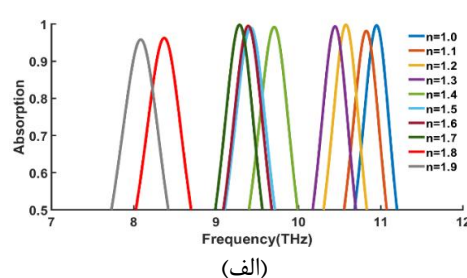
| مؤلفه کیفیت | رقم شایستگی (1/RIU) | حساسیت (THz/RIU) | پهنای باند نیم‌توان (تراهرتز) | میزان جذب (%) | فرکانس تشدید (تراهرتز) | ضریب شکست | وضعیت  |
|-------------|---------------------|------------------|-------------------------------|---------------|------------------------|-----------|--------|
| ۲۰.۲۱       | ۳.۲۷                | ۱.۶۷             | ۰.۵۱                          | ۹۹.۶۵         | ۱۰.۳۱                  | ۱.۳۷۶     | طبیعی  |
| ۱۶.۷۹       | ۵.۲۹                | ۳.۰۷             | ۰.۵۸                          | ۹۹.۳۴         | ۹.۷۴                   | ۱.۳۹      | سرطانی |

جدول ۶: ارزیابی عملکرد حسگر مورد نظر برای سنجش سلول سینه

| مؤلفه کیفیت | رقم شایستگی (1/RIU) | حساسیت (THz/RIU) | پهنای باند نیم‌توان (تراهرتز) | میزان جذب (%) | فرکانس تشدید (تراهرتز) | ضریب شکست | وضعیت  |
|-------------|---------------------|------------------|-------------------------------|---------------|------------------------|-----------|--------|
| ۱۶.۷۴       | ۵.۳۱                | ۳.۰۸             | ۰.۵۸                          | ۹۹.۳۱         | ۹.۷۱                   | ۱.۳۹۹     | طبیعی  |
| ۲۰.۲۵       | ۳.۰۹                | ۱.۵۸             | ۰.۵۱                          | ۹۹.۵۷         | ۱۰.۳۳                  | ۱.۳۸۵     | سرطانی |

حسگر ضریب شکست ارائه شده نوعی حسگر پزشکی است. این نوع حسگرها توانایی شناسایی زودهنگام و دقیق سرطان، بدخیمی و نیز سایر اختلالات بافتی را ارائه می‌دهند. در نتیجه، یافته‌های این مطالعه برای رشته‌های مختلف تشخیص، فراتر از کاربردهای زیست‌پزشکی نویدبخش است.

در جدول ۷، ساختار حسگر ضریب شکست مبتنی بر جاذب کامل فرامواد طراحی شده با طرح‌های مشابه در سال‌های اخیر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که این حسگر توانایی‌های حسگری را افزایش داده و می‌تواند به طور موثر برای ارزیابی تغییرات در ضریب شکست‌های محیط مورد نظر به کار رود.



شکل ۱۱: (الف) طیف جذب برای ضریب شکست‌های مختلف، (ب) تغییر فرکانس‌های تشدید برای تغییر ضریب شکست محیط

جدول ۷: مقایسه عملکرد حسگر موردنظر با سایر حسگرهای ضریب شکست ارائه شده در سال‌های اخیر

| مرجع    | سال  | فرکانس کاری<br>(تراهرتز) | حساسیت<br>(THz/RIU) | رقم شایستگی<br>(1/RIU) |
|---------|------|--------------------------|---------------------|------------------------|
| [۴۰]    | ۲۰۲۰ | ۲-۷                      | ۱.۷۱۳               | ۶.۹۹۸                  |
| [۴۱]    | ۲۰۲۰ | ۰.۵۰                     | ۰.۷۴۵               | ۵.۱                    |
| [۴۲]    | ۲۰۲۰ | ۴.۵-۷.۵                  | ۱.۵۷                | ۲۴.۵                   |
| [۴۳]    | ۲۰۲۰ | ۰.۵-۱.۹                  | ۰.۲۴۳               | ۳.۳                    |
| [۴۴]    | ۲۰۲۰ | ۰.۱-۱.۹                  | ۰.۳                 | ۱.۸۸                   |
| [۴۵]    | ۲۰۲۱ | ۲.۵-۴                    | ۱.۷                 | اشاره نشده             |
| [۴۶]    | ۲۰۲۱ | ۰.۲-۰.۷                  | ۰.۲۹۴               | ۴.۰۳                   |
| [۴۷]    | ۲۰۲۲ | ۳-۱۰                     | ۱.۷۹۱               | ۷.۰۴۶                  |
| [۴۸]    | ۲۰۲۲ | ۰.۲-۳                    | ۰.۷۳                | ۲.۹۷                   |
| [۴۹]    | ۲۰۲۳ | ۶.۴۲-۶.۷۷                | ۲.۳۷۲               | ۶۴.۶۲                  |
| [۲۴]    | ۲۰۲۳ | ۶.۲۹-۷.۵۱۲               | ۲.۵۳۸               | ۸.۷۳                   |
| [۵۰]    | ۲۰۲۳ | ۷-۱۴                     | ۱.۸۷۶               | ۲.۱۴                   |
| [۵۱]    | ۲۰۲۳ | ۳-۱۱                     | ۲.۱۳                | ۵.۳۶                   |
| [۵۲]    | ۲۰۲۴ | ۳.۵-۴                    | ۱.۲۱۵               | ۲۱.۴۹                  |
| [۵۳]    | ۲۰۲۴ | ۱.۲-۱.۸                  | ۱.۰۶                | اشاره نشده             |
| [۵۴]    | ۲۰۲۴ | ۰.۵-۱.۴                  | ۰.۲۷                | ۱۸                     |
| این طرح | ۲۰۲۵ | ۸-۱۱                     | ۳.۲۱                | ۵.۳۴                   |

#### ۴-نتیجه گیری

در این مقاله، یک جاذب فراماده تک باند قابل تنظیم متشکل از گرافن، دی اکسید سیلیکون و نقره ارائه شده است. این جاذب پیشنهادی به جذب کامل دست یافته و به سبب استفاده از گرافن در طراحی آن می‌توان بدون تغییر ابعاد، آن را تنظیم نمود. طرح ارائه شده دارای یک الگوی سلول واحد ساده و متقارن است که تحت تأثیر قطبش یا زاویه برخورد قرار نمی‌گیرد. این سازه حساسیت بالایی را در رابطه

با ضریب شکست محیط اطراف، با میانگین حساسیت ۲.۴۵ (THz/RIU)، رقم شایستگی ۴.۲۳ (1/RIU) و مؤلفه کیفیت ۱۷.۳۳۵ نشان می‌دهد. علاوه بر این ویژگی‌ها، با استفاده از رویکردی روشمند، روشی برای محاسبه حداکثر حساسیت حسگر ضریب شکست معرفی شده است. این روش امکانی را جهت دستیابی به یک تقریب دقیق از حداکثر حساسیت بدون نیاز به محاسبات گسترده فراهم می‌کند. این جاذب کامل فراماده به عنوان یک حسگر

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه سمنان جهت حمایت از تحقیق حاضر ابراز می‌دارند. همچنین از نکات ارزشمند داوران قدردانی می‌شود.

زیستی عملی برای شناسایی به موقع و دقیق نمونه‌های زیستی، به ویژه در تشخیص سلول‌های سرطانی مانند سلول‌های سینه و جورکات در حوزه فرکانس تراهرتز عمل کند.

### مراجع

- [1] Veselago, V.G., *Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities*. Soviet Physics Uspekhi, 1968. **10**(4): p. 504-509.
- [2] Khani, S. and M. Hayati, *An ultra-high sensitive plasmonic refractive index sensor using an elliptical resonator and MIM waveguide*. Superlattices and Microstructures, 2021. **156**: p. 106970.
- [3] Fakharian, M.M., *Design of a terahertz metasurface absorber based on machine learning technique*. Tabriz Journal of Electrical Engineering, 2024. **54**(3): p. 291-299.
- [4] Kuznetsov, S.A., et al., *Matrix structure of metamaterial absorbers for multispectral terahertz imaging*. Progress In Electromagnetics Research, 2012. **122**: p. 93-103.
- [5] Guo, S., et al., *Multistate active control RCS signature for the continuous adjustment absorber/reflector transformation applications*. Optics Express, 2021. **29**(15): p. 24151-24160.
- [6] Namai, A., et al., *Synthesis of an electromagnetic wave absorber for high-speed wireless communication*. Journal of the American Chemical Society, 2009. **131**(3): p. 1170-1173.
- [7] Liao, Z., et al., *Ultra-narrowband resonant light absorber for high-performance thermal-optical modulators*. Optics Express, 2021. **29**(20): p. 31048-31057.
- [8] Grant, J., et al., *CMOS compatible metamaterial absorbers for hyperspectral medium wave infrared imaging and sensing applications*. Optics express, 2018. **26**(8): p. 10408-10420.
- [9] Zhu, J. and C. Wu, *Detection of amino acid with metamaterial perfect absorbers in the terahertz band*. Measurement, 2022. **192**: p. 110738.
- [10] Rengasamy, S., R. Natarajan, and V. Kuttathathi Srinivasan, *Miniaturized multi-spectral perfect metamaterial absorber for THz sensing, imaging and spectroscopic applications*. Plasmonics, 2023. **18**(2): p. 643-651.
- [11] Khodadadi, B., et al., *Sensitivity increment of metamaterial-based refractive index sensor with silicon layers*. Silicon, 2023. **15**(15): p. 6745-6759.
- [12] Li, W., et al., *Active tunable terahertz bandwidth absorber based on single layer graphene*. Communications in Theoretical Physics, 2023. **75**(4): p. 045503.
- [13] Landy, N.I., et al., *Perfect metamaterial absorber*. Physical review letters, 2008. **100**(20): p. 207402.
- [14] Tao, H., et al., *A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization*. Optics express, 2008. **16**(10): p. 7181-7188.
- [15] Liu, Y.-Q., et al., *Dispersion theory of surface plasmon polaritons on bilayer graphene metasurfaces*. Nanomaterials, 2022. **12**(11): p. 1804.
- [16] Tatel, G. and M. Wartak, *Amplification of surface plasmons*, in *21st Century Nanoscience—A Handbook*. 2020, CRC Press. p. 16-1-16-14.
- [17] Khani, S., A. Farmani, and P. Rezaei, *Optical resistance switch for optical sensing*, in *Artificial Intelligence in Mechatronics and Civil Engineering: Bridging the Gap*. 2023, Springer. p. 1-38.
- [18] Fakharian, M.M., *Bilayer reprogrammable graphene meta-atoms for THz wave reflection/absorption*. Optical and Quantum Electronics, 2024. **56**(5): p. 849.
- [19] Deng, G., et al., *Graphene-based tunable polarization sensitive terahertz metamaterial absorber*. Optics Communications, 2016. **380**: p. 101-107.
- [20] Biabanifard, S., *A graphene-based dual-band THz absorber design exploiting the impedance-matching concept*. Journal of Computational Electronics, 2021. **20**(1): p. 38-48.
- [21] Alipour, A., A. Mir, and A. Farmani, *Ultra high-sensitivity and tunable dual-band perfect absorber as a plasmonic sensor*. Optics & Laser Technology, 2020. **127**: p. 106201.

- [22] Liang, S., et al., *Ultra long infrared metamaterial absorber with high absorption and broad band based on nano cross surrounding*. Optics & Laser Technology, 2023. **158**: p. 108789.
- [23] Fu, P., et al., *A broadband metamaterial absorber based on multi-layer graphene in the terahertz region*. Optics Communications, 2018. **417**: p. 62-66.
- [24] Zamzam, P., et al., *Graphene-based polarization-insensitive metamaterials with perfect absorption for terahertz biosensing applications: Analytical approach*. Optics & Laser Technology, 2023. **163**: p. 109444.
- [25] Wu, Z., J. Tian, and R. Yang, *A graphene based dual-band metamaterial absorber for TE polarized THz wave*. Micro and Nanostructures, 2022. **168**: p. 207331.
- [26] Khodadadi, B., et al., *Wideband polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on bilayer graphene metasurface*. Optical and Quantum Electronics, 2022. **54**.
- [27] Nickpay, M.R., M. Danaie, and A. Shahzadi, *A wideband and polarization-insensitive graphene-based metamaterial absorber*. Superlattices and Microstructures, 2021. **150**: p. 106786.
- [28] Mishu, S.J., M.A. Rahman, and N. Dhar, *Highly sensitive refractive index sensing with a dual-band optically transparent ITO-based perfect metamaterial absorber for biomedical applications*. Heliyon, 2024. **10**(5).
- [29] Anwar, S. and M. Khan, *High-performance terahertz refractive index sensor for cancer cells detection*. The European Physical Journal E, 2023. **46**(3): p. 19.
- [30] Banerjee, S., et al., *A biomedical sensor for detection of cancer cells based on terahertz metamaterial absorber*. IEEE Sensors Letters, 2022. **6**(6): p. 1-4.
- [31] Bahador, H., *Five-Segment THz Refractive Index Metamaterial Biosensor with Perfect Absorption for Carcinoembryonic Antigen Measurement*. IEEE Sensors Journal, 2024.
- [32] Nejat, M. and N. Nozhat, *Ultrasensitive THz refractive index sensor based on a controllable perfect MTM absorber*. IEEE sensors journal, 2019. **19**(22): p. 10490-10497.
- [33] Razani, A.N., et al., *Absorption-based ultra-sensitive RI sensor based on the flower-shaped graphene resonator for early detection of cancer*. Optics Communications, 2022. **524**: p. 128775.
- [34] Soltani-Zanjani, M., et al., *Multi-bias graphene-based THz super absorber*. Results in Physics, 2021. **25**: p. 104326.
- [35] Daraei, O.M., K. Goudarzi, and M. Bemani, *A tunable ultra-broadband terahertz absorber based on two layers of graphene ribbons*. Optics & Laser Technology, 2020. **122**: p. 105853.
- [36] Wang, D., et al., *A high Q-factor dual-band terahertz metamaterial absorber and its sensing characteristics*. Nanoscale, 2023. **15**(7): p. 3398-3407.
- [37] Landivar, V.T., *Plasmonics and metamaterials at terahertz frequencies*. 2014.
- [38] Hokmabadi, M.P., et al., *Design and analysis of perfect terahertz metamaterial absorber by a novel dynamic circuit model*. Optics express, 2013. **21**(14): p. 16455-16465.
- [39] Khani, S. and M. Hayati, *Optical biosensors using plasmonic and photonic crystal band-gap structures for the detection of basal cell cancer*. Scientific reports, 2022. **12**(1): p. 5246.
- [40] Abdulkarim, Y.I., et al., *An ultrathin and dual band metamaterial perfect absorber based on ZnSe for the polarization-independent in terahertz range*. Results in Physics, 2021. **26**: p. 104344.
- [41] Hamouleh-Alipour, A., A. Mir, and A. Farmani, *Analytical modeling and design of a graphene metasurface sensor for thermo-optical detection of terahertz plasmons*. IEEE Sensors Journal, 2020. **21**(4): p. 4525-4532.
- [42] Rezagholizadeh, E., M. Biabanifard, and S. Borzooei, *Analytical design of tunable THz refractive index sensor for TE and TM modes using graphene disks*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020. **53**(29): p. 295107.
- [43] Wang, Z., Z. Geng, and W. Fang, *Exploring performance of THz metamaterial biosensor based on flexible thin-film*. Optics Express, 2020. **28**(18): p. 26370-26384.
- [44] Wang, T., et al., *Dual-controlled switchable broadband terahertz absorber based on a graphene-vanadium dioxide metamaterial*. Optical Materials Express, 2020. **10**(2): p. 369-386.
- [45] Azab, M.Y., et al., *Highly sensitive metamaterial biosensor for cancer early detection*. IEEE Sensors Journal, 2021. **21**(6): p. 7748-7755.
- [46] Wang, G., et al., *All-metal terahertz metamaterial biosensor for protein detection*. Nanoscale research letters, 2021. **16**: p. 1-10.

- [47] Nickpay, M.-R., M. Danaie, and A. Shahzadi, *Graphene-based metamaterial absorber for refractive index sensing applications in terahertz band*. Diamond and Related Materials, 2022. **130**: p. 109539.
- [48] Lu, X., et al., *Design and analysis of a dual-band THz metamaterial sensor with high refractive index sensitivity*. Frontiers in Physics, 2022. **10**: p. 973033.
- [49] Ma, S., et al., *Highly sensitive terahertz sensor based on graphene metamaterial absorber*. Optics Communications, 2023. **528**: p. 129021.
- [50] Khodadadi, B., et al., *Triple-band metamaterial perfect absorber for refractive index sensing in THz frequency*. Optical and Quantum Electronics, 2023. **55**(5): p. 431.
- [51] Nickpay, M.-R., M. Danaie, and A. Shahzadi, *Graphene-based tunable quad-band fan-shaped split-ring metamaterial absorber and refractive index sensor for THz spectrum*. Micro and Nanostructures, 2023. **173**: p. 207473.
- [52] Teber, A., *Refractive Index Sensor Based on Terahertz Metamaterial Absorber with High Sensitivity and Quality Factor for Sensing Applications*. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 2024. **13**(2): p. 61-68.
- [53] Gao, W., F. Chen, and W. Yang, *Temperature and refractive index sensor based on perfect absorber in InSb double rectangular ring resonator metamaterials*. Materials Today Communications, 2024: p. 109461.
- [54] Chen, Y., et al., *Bi-directional high-performance metamaterial perfect absorber for solar harvesting and refractive index sensing*. Materials Today Nano, 2024. **26**: p. 100487.