Document Type: Full length research Paper
Pages: 65-80

Polarization-Independent High-Q Metamaterial Perfect Absorber for Microwave Refractive Index Sensing and Chemical Identification

Mehdi Askari*[,1], Sohrab Mohammadi Pouyan[2], Ehsan Menbari[1]

[1]Department of Physics, Faculty of Basic Science, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun, Iran
[2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun, Iran

Received: 06.01.2026 Final revised: 27.07.2026 Accepted: 19.09.2026 Published On-Line: 06.10.2026

Doi: 10.22055/jrmbs.2026.21019

Abstract

In this work, a high-performance, polarization-independent metamaterial perfect absorber operating in the microwave regime is introduced and numerically investigated for refractive-index-based sensing applications. The proposed structure is based on a metal–dielectric–metal configuration and incorporates a concentric cut-out double-square double-layered resonator, enabling near-unity absorption at the resonance frequency of 5.489 GHz. The underlying physics behind this perfect absorption behavior is elaborately discussed. Simulation results demonstrate that the proposed sensor exhibits high sensitivity, a large quality factor, and a considerable figure of merit. The maximum sensitivity, quality factor, and figure of merit are found to be 2.3 GHz/RIU, 166, and 48.9, respectively, exceeding those reported for many previously published microwave sensors. It is also shown that the device maintains stable performance under varying angles of incidence, with optimal sensing characteristics achieved at normal incidence. By appropriately scaling the structure, the resonance frequency is shifted to 8 GHz, enabling accurate discrimination among edible oils, brake fluids, and selected industrial solvents. These characteristics make the proposed metamaterial perfect absorber a promising platform for rapid, precise, and non-destructive chemical identification in industrial and environmental applications.

Keywords: Metamaterial perfect absorber, microwave sensor, refractive-index-based sensing, quality factor, figure of merit, plasmonic resonance, edible oils

*Corresponding Author: mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

مقاله پژوهشی کامل

جاذب کامل فرامادهای با ضریب کیفیت بالا و مستقل از قطبش در ناحیه مایکروویو برای حسگری مبتنی بر ضریب شکست و شناسایی شیمیایی

مهدی عسکری[۱،*]، سهراب محمدی پویان [۲]، احسان منبری [۱]

[۱]بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون، ایران

[۲]بخش مهندسی برق و الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون، ایران

دریافت: ۱٤۰٤/۱۰/۱٦ ویرایش نهائی: ۱٤۰۵/۰۵/۰۵ پذیرش: ۱٤۰۵/۰٦/۲۸ انتشار بر خط: ۱٤۰۵/۰۷/۱٤
Doi: 10.22055/jrmbs.2026.21019

چکیده

در این پژوهش، یک جاذب کامل فرامادهای با عملکرد بالا، مستقل از قطبش و فعال در ناحیه مایکروویو، برای کاربرد در **حسگری مبتنی بر ضریب شکست** معرفی و به‌صورت عددی بررسی شده است. ساختار پیشنهادی بر پایه پیکربندی فلز–دی‌الکتریک–فلز طراحی شده و شامل یک تشدیدگر دولایه با حلقه‌های مربعی توخالی هم‌مرکز است که جذب نزدیک به واحد را در فرکانس تشدید ۵٫٤۸۹ گیگاهرتز فراهم می‌کند. علت فیزیکی وقوع رفتار جذب کامل به‌طور مشروح مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حسگر پیشنهادی دارای حساسیت بالا، ضریب کیفیت بزرگ و شاخص مزیت قابل‌توجهی است، به‌طوری‌که بیشینه مقادیر حساسیت، ضریب کیفیت و شاخص مزیت به‌ترتیب برابر با ۲٫۳ گیگاهرتز بر واحد تغییر ضریب شکست، ۱٦٦ بر واحد تغییر ضریب شکست و ٤۸٫۹ به‌دست آمده‌اند. همچنین نشان داده می‌شود که عملکرد ساختار در برابر تغییر زاویهٔ تابش پایدار بوده و بهترین ویژگی‌های حسگری در حالت تابش عمود حاصل می‌شود. با مقیاس‌بندی مناسب ساختار، فرکانس تشدید به‌ناحیهٔ۸ گیگاهرتز منتقل شده و امکان تمایز دقیق میان روغن‌های خوراکی، سیالات ترمز و برخی حلال‌های صنعتی فراهم می‌شود. این ویژگی‌ها، ساختار پیشنهادی را به‌گزینه‌ای مناسب برای شناسایی سریع، دقیق و غیرمخرب مواد شیمیایی در کاربردهای صنعتی و محیطی تبدیل می‌کند.

کلیدواژگان: جاذب کامل فرامادهای، حسگر مایکروویو، حسگری مبتنی بر ضریب شکست، ضریب کیفیت، شاخص مزیت، تشدید پلاسمونی، روغن‌های خوراکی

مقدمه

فرامادهها، به‌عنوان ساختارهای الکترومغناطیسی مهندسی‌شدهٔ مصنوعی، طی دو دههٔ گذشته به‌دلیل توانایی چشمگیرشان در کنترل و دست‌کاری امواج الکترومغناطیسی، به‌شیوه‌هایی که با مواد طبیعی قابل دستیابی نیست، توجه گسترده‌ای را به‌خود جلب کرده‌اند [۱]. این قابلیت‌ها ریشه در عناصر ساختاری زیرطولی‌موجی فرامادهها دارند که امکان کنترل مؤثر پارامترهایی نظیر گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی را فراهم می‌کنند [۲] و در نتیجه منجر به بروز پدیده‌هایی غیرمتعارف مانند ضریب شکست منفی

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.
این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص ٤.۰ بین‌المللی می‌باشد

[۳,٤] ، نامرئی‌سازی [٥] ، نور کند [٦] و جذب کامل می‌شوند [۷].

در میان کاربردهای متنوع فراماده‌ها، جاذب‌های کامل فراماده‌ای به‌عنوان ادواتی بسیار جذاب شناخته می‌شوند، زیرا قادرند جذب نزدیک به واحد را در فرکانس‌های تشدید مشخص ایجاد کنند [۸]. در میان پیکربندی‌های مختلف، ساختارهای فلز–دی‌الکتریک–فلز به‌دلیل توانایی بالای آن‌ها در پشتیبانی از جفت‌شدگی قوی میان میدان‌های الکترومغناطیسی، کارایی ویژه‌ای از خود نشان داده‌اند [۹]. با تنظیم دقیق پارامترهای هندسی نظیر دورهٔ تناوب، عرض شکاف و ابعاد تشدیدگر، می‌توان طیف جذب را به‌صورت هدفمند کنترل کرد و به ویژگی‌هایی مانند ضریب کیفیت بالا، شاخص مزیت بزرگ و حساسیت زیاد در حسگری مبتنی بر ضریب شکست دست یافت [۱۰]. افزون بر این، ساختارهایی که از تقارن جانبی برخوردارند، رفتار مستقل از قطبش از خود نشان می‌دهند و از این رو در کاربردهای عملی، که در آن‌ها کنترل قطبش موج تابشی همواره امکان‌پذیر نیست، مزیت قابل‌توجهی دارند [۱۱].

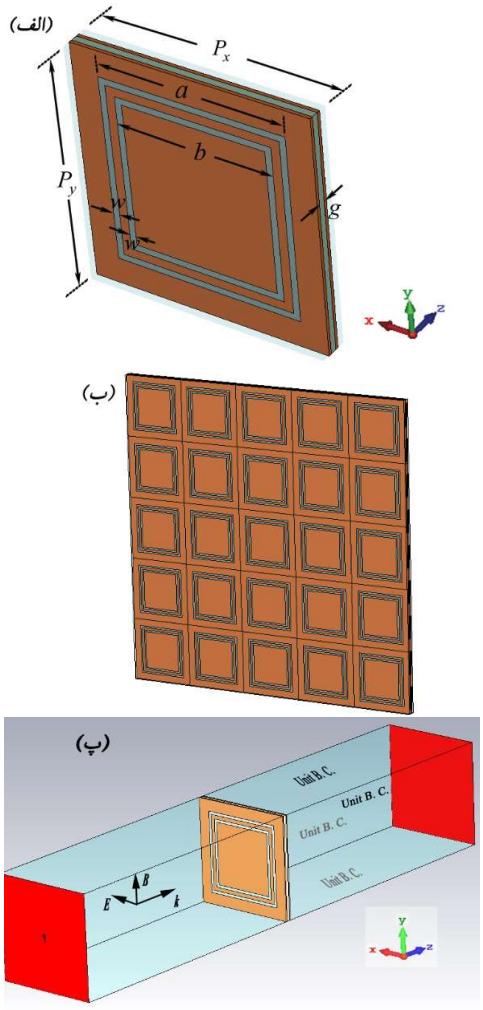
در سال‌های اخیر، حسگرهای مایکروویوی مبتنی بر جاذب‌های کامل فراماده‌ای عملکرد بسیار موفقی در تمایز میان موادی با خواص دی‌الکتریک بسیار نزدیک به یکدیگر نشان داده‌اند و قادر بوده‌اند تغییرات کوچک ضریب شکست را با دقت بالا آشکارسازی کنند [۱۰]. این قابلیت به‌ویژه در کاربردهایی مانند تشخیص اصالت روغن‌های خوراکی و جلوگیری از تقلب، پایش وضعیت روانکارها در سامانه‌های خودرویی و مکانیکی و شناسایی مواد شیمیایی صنعتی نظیر حلال‌ها و سیالات ترمز اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۲]. روش‌های متداول تحلیل شیمیایی برای چنین کاربردهایی غالباً زمان‌بر، تهاجمی یا مبتنی بر معرف‌های شیمیایی هستند که هزینه‌بر بوده و برای پایش پیوسته مناسب نیستند [۱۳]. در مقابل، حسگرهای مایکروویوی مبتنی بر فراماده، بستری بدون برچسب، غیرمخرب و بلادرنگ با قدرت تفکیک بالا فراهم می‌کنند [۱۲].

در این پژوهش، یک جاذب کامل فراماده‌ای مایکروویوی با ضریب کیفیت بالا و مستقل از قطبش به‌عنوان یک حسگر مطالعه می‌شود. ساختار مطالعه شده حساسیت بالا و شاخص مزیت چشمگیری از خود نشان می‌دهد و عملکرد آن در مقایسه با بسیاری از طرح‌های مشابه گزارش‌شده در منابع اخیر برتر است. علاوه بر این، قابلیت این ساختار برای شناسایی دقیق روغن‌ها و مواد شیمیایی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و پتانسیل آن برای کاربرد در حوزه‌های صنعتی، محیطی و ایمنی‌محور به‌طور روشن نشان داده می‌شود. لازم است تشریح گردد که در پژوهش پیشین نویسندگان، یک حسگر فراماده‌ای در محدوده تراهرتز با تمرکز بر دستیابی به ضریب کیفیت بالا ارائه شده بود [۱٤]. در مقابل، پژوهش حاضر به طراحی یک جاذب کامل فراماده‌ای مستقل از قطبش در محدوده مایکروویو اختصاص دارد و علاوه بر معرفی یک پیکربندی متفاوت، تحلیل جامع‌تری از مکانیزم جذب و حسگری بر پایه تشدیدهای LC ،جریان‌های سطحی، میدان مغناطیسی و تطبیق امپدانس ارائه می‌کند.

مطالعهٔ ساختار و روش‌های عددی

شکل ۱، سلول پایهٔ جاذب کامل فراماده‌ای را نشان می‌دهد. این ساختار دارای پیکربندی فلز–دی‌الکتریک–فلز است، به‌طوری‌که لایهٔ پایینی از یک ورق فلزی یکنواخت تشکیل شده و نقش آینهٔ بازتابنده را ایفا می‌کند. لایهٔ بالایی شامل یک ورق فلزی دیگر است که دو حلقهٔ مربعی هم‌مرکز از آن حذف شده‌اند. ابعاد هندسی این ساختار دولایه با تشدیدگر مربعی

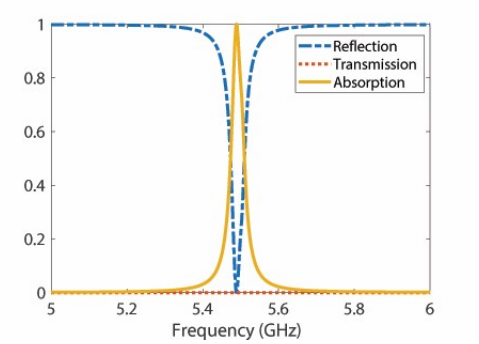
دوتایی در توضیح شکل به‌طور کامل مشخص شده است. لایه‌های فلزی از جنس مس ساخته شده‌اند و ضخامت آن‌ها برابر با $t=۰/۲۱mm$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. الف: سلول واحدی از جاذب کامل با $P_x=P_y=۱۵mm$ ، $a=۱۱/۷mm$ ، $b=۹/۸mm$ ، $w=۰/٤mm$ و $g=۰/٤۳mm$. ب) ساختار دوره‌ای جاذب کامل. پ) وضعیت قرارگیری پورت‌ها، میدان‌ها، جهت انتشار موج الکترومغناطیسی فرودی و شرایط مرزی.

در شبیه‌سازی‌ها، فلز به‌صورت یک مادهٔ رسانای تلفات‌دار مدل‌سازی شده و رسانندگی الکتریکی آن برابر با ۵.۸×۱۰^{۷} زیمنس بر متر در نظر گرفته شده است. از آنجا که ساختار در محدوده فرکانسی مایکروویو عمل می‌کند، پاسخ الکترومغناطیسی فلز با فرض رسانندگی ثابت مدل‌سازی شده و استفاده از مدل‌های پاشندگی نظیر لورنتس–درود ضروری نیست. همچنین لازم به اشاره است که اگرچه فلزاتی مانند نقره و طلا نیز به‌دلیل رسانندگی بالای خود در ساختارهای فراماده‌ای قابل استفاده هستند، اما در محدوده فرکانسی مایکروویو اختلاف عملکرد آن‌ها با مس بسیار ناچیز است. از سوی دیگر، هزینه کمتر، دسترس‌پذیری بیشتر و کاربرد گسترده مس در فناوری‌های مایکروویوی، این فلز را به گزینه‌ای مناسب برای طراحی حاضر تبدیل می‌کند. لایهٔ دی‌الکتریک از مادهٔ Isola FR408 با ضخامت $g=۰/٤۳$ میلی‌متر و گذردهی الکتریکی نسبی ۲٫۵۳ تشکیل شده است.

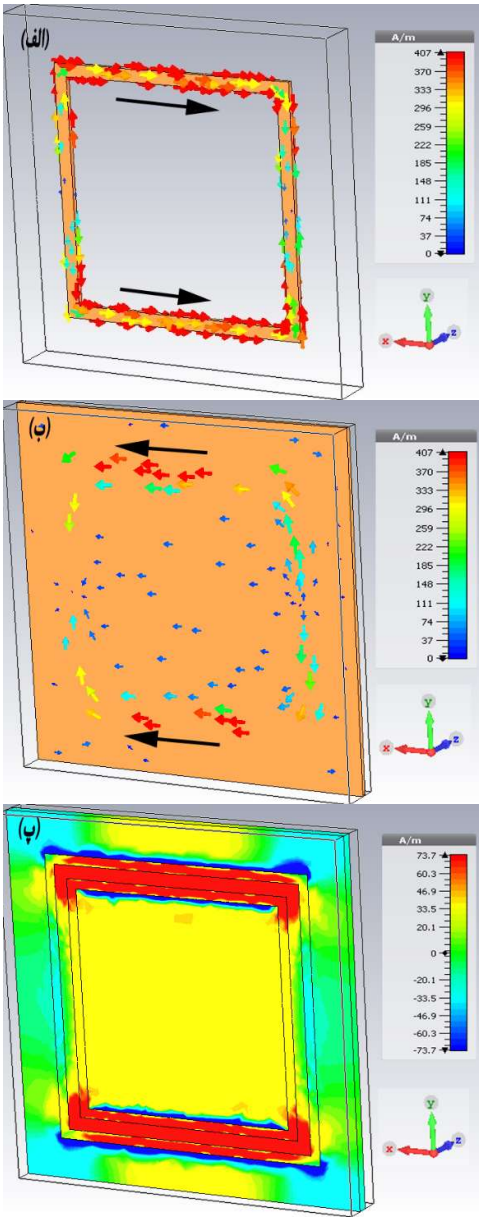
شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار CST Microwave Studio انجام شده‌اند. در این شبیه‌سازی‌ها، یک موج الکترومغناطیسی تخت که قطبش آن در راستای محور x است، به‌صورت عمود بر سطح ساختار و از سمت لایهٔ بالایی به آن تابانده می‌شود. لازم به تأکید است که انتخاب این قطبش کاملاً دلخواه بوده و به‌دلیل تقارن جانبی ساختار، پاسخ الکترومغناطیسی آن مستقل از قطبش موج تابشی است. منحنی‌های جذب، بازتاب و عبور ساختار در شکل۲ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، ساختار در فرکانس ۵٫٤۸۹ گیگاهرتز به جذب کامل دست می‌یابد، به‌طوری‌که ضریب جذب تقریباً برابر با یک است. این نتیجه، عملکرد ساختار را به‌عنوان یک جاذب کامل فراماده‌ای تأیید می‌کند.



شکل۲. نمودارهای بازتاب، جذب و عبور از ساختار

تبیین ساز و کار جذب کامل

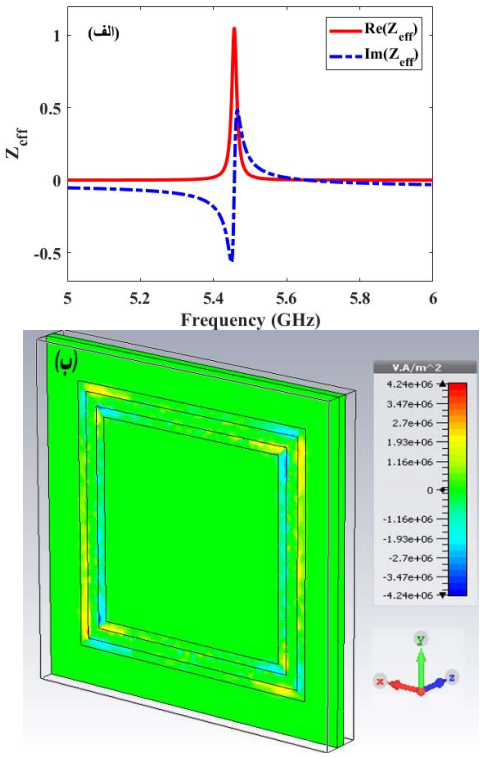
برای بررسی منشأ فیزیکی جذب کامل، توزیع جریان‌های سطحی القاشده روی تشدیدگر فلزی لایه بالایی و صفحه فلزی زیرین در فرکانس تشدید ۵٫۴۸۹ گیگاهرتز شبیه‌سازی شده‌اند (شکل۳). لازم است خاطر نشان شود که عملاً بین دو حلقه خالی ساختار شکل۱، یک حلقه مربعی فلزی وجود دارد که عملاً یک تشدیدگر مربعی فلزی تشکیل می‌دهد که عنصر اصلی برانگیختگی تشدید الکترومغناطیسی ساختار محسوب می‌شود. به‌همین دلیل به‌جهت اینکه با وضوع بیشتری بتوان جریان‌های سطحی ایجاد شده در لایهٔ اول را مشاهده کرد، در شکل۳الف، تنها جریان‌های سطحی القا شده روی این حلقهٔ فلزی مربعی به نمایش گذاشته شده‌اند. با توجه به‌اینکه قطبش موج الکترومغناطیسی فرودی در راستای x انتخاب شده است این جریان‌ها در دو بازوی حلقه که موازی این راستا هستند ایجاد شده که نشان دهنده ماهیت الکتریکی این تشدید است. از طرفی جریان‌های الکتریکی تشدیدی ایجاد شده روی لایهٔ تخت زیرین نیز در شکل۳ب نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، جریان‌های القاشده در صفحه فلزی زیرین در نواحی متناظر با تشدیدگر، در جهت مخالف جریان‌های لایه



شکل ۳. جریان سطحی القایی در فرکانس تشدید ۵٫۴۸۹ گیگاهرتز روی الف: حلقه مربعی فلزی و ب: ورقه یکنواخت فلزی. پ: مؤلفه z میدان مغناطیسی در فرکانس تشدید ذکر شده.

بالایی قرار دارند که بیانگر جفت‌شدگی مغناطیسی قوی بین دو لایه است. عملاً این تشدید مغناطیسی سبب ایجاد جریان های در جهت مخالف روی لایه تخت فلزی می شود. این حلقه جریان را می‌توان به‌صورت یک مدار LC معادل در نظر گرفت که در آن خاصیت

القاگری ناشی از مسیر بسته جریان و ظرفیت خازنی ناشی از میدان الکتریکی متمرکز در فاصله بین دو لایه فلزی است. در واقع در اینجا دو حلقه جریان مستقل، یکی مرتبط با بازوی بالایی و دیگری متناظر با بازوی پایینی حلقه فلزی، با جریان‌هایی هم‌جهت ایجاد می‌شود که باعث ایجاد ممان مغناطیسی‌های تشدیدی هم‌سو می‌شود. برای مشاهده آن ممان مغناطیسی‌های تشدیدی، شبیه‌سازی مؤلفهٔ y میدان مغناطیسی در شکل۳پ نشان داده شده است.



شکل ٤. الف: قسمت حقیقی و موهومی امپدانس مؤثر بهنجار ساختار. ب: مؤلفهٔ z بردار پویین تینگ در بسامد جذب تشدیدی ٥٫٤٨٩ گیگا هرتز.

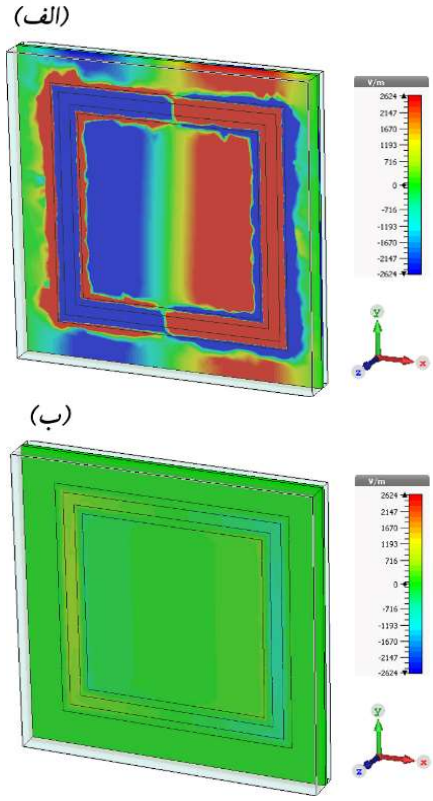
میدان مغناطیسی تشدیدی ایجادشده در ساختار سبب ایجاد پاسخ مغناطیسی مؤثر فراماده می‌شود. این پاسخ مغناطیسی، همراه با پاسخ الکتریکی رزوناتور، موجب تطبیق امپدانس ساختار با فضای آزاد شده و در نتیجه دامنه موج بازتابی به حداقل می‌رسد. عملاً می‌توان گفت که جذب کامل زمانی حاصل می‌شود که تشدید الکتریکی رزوناتور و تشدید مغناطیسی مدار LC به‌طور همزمان در یک فرکانس رخ دهند.

برای تأیید این موضوع، امپدانس مؤثر ساختار و مؤلفه z بردار پویین تینگ نیز محاسبه شده و نتایج در شکل نشان داده شده‌اند. شکل٤الف نشان می‌دهد که در بسامد جذب تشدیدی ٥٫٤٨٩ گیگاهرتز مقدار قسمت حقیقی امپدانس مؤثر بهنجار شده ساختار (نسبت امپدانس مؤثر ساختار به امپدانس فضای آزاد) برابر یک است. همچنین در این بسامد مقدار قسمت موهومی امپدانس مؤثر بهنجار شده نیز برابر صفر است. در این شرایط، امپدانس مؤثر ساختار با امپدانس ذاتی فضای آزاد ($Z_0 \approx ۳۷۷\,\Omega$) منطبق می‌شود؛ ازاین‌رو ضریب بازتاب تقریباً صفر خواهد بود. از آنجا که صفحه فلزی زیرین عبور موج را نیز حذف می‌کند، رابطه $A = 1 - R - T$ به $A \approx 1$ تبدیل شده و جذب تقریباً کامل حاصل می‌شود [۳۵] .

قابلیت‌های حسگری

در مراجع علمی این موضوع که وارد کردن یک مادهٔ خارجی در نزدیکی یک ساختار فراماده، سبب تغییر در ضریب شکست مؤثر آن ساختار و در نتیجه جابه‌جایی فرکانس تشدید آن می‌شود امری پذیرفته شده است [۱۵]. در واقع در فرکانس تشدید، میدان الکتریکی در نواحی شکاف تشدیدگر و فضای بین دو لایه فلزی به‌شدت متمرکز می‌شود و انرژی الکترومغناطیسی عمدتاً در همین نواحی ذخیره می‌گردد. شبیه‌سازی میدان الکتریکی در بسامد تشدید این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهد (شکل۵). از آنجا که نمونه مورد

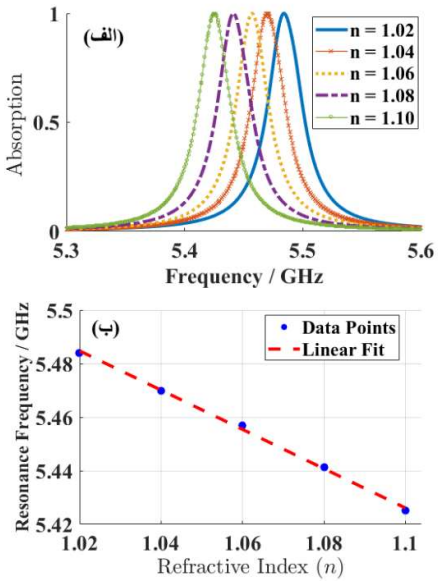
آزمایش این نواحی را پر می‌کند، تغییر ضریب شکست آن موجب تغییر ظرفیت خازنی مؤثر تشدیدگر می‌شود.



شکل۵. شبیه‌سازی مولفه در راستای z میدان الکتریکی، E_z ؛ (الف) در فرکانس تشدیدی ۵٫۴۸۹ گیگاهرتز و (ب) در یک فرکانس نوعی غیر تشدیدی ۵٫۸۸۱ گیگاهرتز.

در نتیجه، با افزایش ضریب شکست، ظرفیت خازنی مدار LC افزایش یافته و مطابق رابطه $f_r = ۱/۲\pi\sqrt{LC}$ بسامد تشدید به‌سمت مقادیر پایین‌تر جابه‌جا می‌شود. بنابراین، حساسیت حسگر حاصل وابستگی مستقیم بسامد تشدید به تغییرات ظرفیت خازنی مؤثر ناشی از تغییر خواص دی‌الکتریک محیط است. هرچه میدان الکتریکی در نواحی تماس با نمونه متمرکزتر باشد، تغییرات کوچک‌تر ضریب شکست نیز جابه‌جایی فرکانسی بزرگ‌تری ایجاد خواهند کرد که این امر به افزایش حساسیت حسگر منجر می‌شود.

همین ویژگی است که سبب می‌شود فراماد کاربردهای گسترده‌ای در حسگری پیدا کنند.



شکل ٦. الف: نمودار طیف جذب زمانی که بخش‌های خالی لایه نخست ساختار با موادی با ضرایب شکست ۱٫۰۲ تا ۱٫۱ پُر شده‌اند. ب: نمودار فرکانس‌های تشدید برحسب ضریب شکست‌ها و خط برازش.

در ساختار دولایه پیشنهادی، ماده مورد آزمون در فضاهای خالی تشدیدگر قرار گرفته و با تغییر ضریب شکست آن، فرکانس تشدید ساختار جابه‌جا می‌شود. برای بررسی این رفتار، طیف جذب ساختار برای ضریب شکست‌های ۱٫۰۲، ۱٫۰٤، ۱٫۰٦، ۱٫۰۸ و ۱٫۱۰ شبیه‌سازی شده است که نتایج آن در شکل٦الف نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب شکست ماده، فرکانس جذب کامل (فرکانس تشدید) به‌سمت مقادیر پایین‌تر منتقل می‌شود.

به‌منظور ارزیابی کمی عملکرد حسگر، فرکانس‌های تشدید استخراج‌شده از شکل٦الف برحسب ضریب شکست رسم شده و نمودار متناظر آن در شکل٦ب ارائه شده است. با برازش خطی داده‌ها، شیب خط برازش به‌عنوان حساسیت متوسط حسگر تعیین

می‌شود. حساسیت حسگر از رابطه $S = \Delta f_{res} / \Delta n$ تعریف می‌شود که در آن Δf_{res} تغییر فرکانس تشدید به ازای تغییر ضریب شکست محیط Δn است. شیب خط برازش برابر با $۰/۷۳۳ GHz / RIU$ به‌دست آمد که بیانگر حساسیت بالای حسگر پیشنهادی و پاسخ تقریباً خطی آن در بازهٔ مورد بررسی است.

به‌منظور ارزیابی جامع‌تر عملکرد حسگر، علاوه بر حساسیت، دو شاخص مهم دیگر نیز محاسبه شدند. نخست، شاخص مزیت (FOM) که از رابطهٔ $FOM = S / FWHM$ به‌دست می‌آید و بیانگر توانایی حسگر در ایجاد جابه‌جایی فرکانسی نسبت به پهنای پیک تشدید است. در رابطهٔ اخیر $FWHM$ بیانگر پهنای طیف در نصف بیشینه است. همچنین ضریب کیفیت $Q - factor$ که از رابطهٔ $Q\text{-}factor = f_{res} / FWHM$ تعریف می‌شود، میزان تیزی پیک تشدید را مشخص می‌کند. برای حسگر پیشنهادی، مقادیر FOM و Q به‌ترتیب برابر با $۱/۸۷ / ۳۷ RIU$ و ۱٦٦ به‌دست آمدند که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب ساختار از نظر قدرت تفکیک و کیفیت تشدید است. برای مقایسه عملکرد حسگر پیشنهادی با پژوهش‌های اخیر، مقادیر حساسیت، شاخص مزیت و ضریب کیفیت در جدول۱ در کنار نتایج منتشرشده در مطالعات پیشین ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مقایسهٔ ویژگی‌های حسگری ساختار معرفی شده با سایر حسگرهای معرفی شده در بخشی از مقالات اخیر

هندسه ساختار	تایید آزمایش گاهی	استقلال از زاویه تابش	استقلال از قطبش	Q-factor	FOM (1/RIU)	S (GHz/RIU)	Freq. (GHz)	مرجع
نسبتا ساده	✓	✓	×	٦۹٫۸	٦٫۵٦	۱٫۱۸	۱۲٫۵٦	[۱٦]
نسبتا ساده	✓	✓	×	۷٦٫۸۷	گزارش نشده	۲٫۱	۱۳٫۳۵	[۱۷]
پیچیده	×	×	×	۲۵٫۹۲	۲٫۱۸	۰٫٤۷	۷٫۵	[۱۸]
نسبتا پیچیده	✓	×	×	۱٤۹	۷۰٫۲۵	۰٫٦۲	۳٫۵	[۱۹]
نسبتا ساده	×	×	×	گزارش نشده	۱۵	۰٫۹	٤٫۳	[۲۰]
نسبتا پیچیده	×	✓	✓	۲۵٫٦۸	۲٫۸۸	۰٫٤۷	٤٫٦۲	[۲۱]
ساده	×	✓	✓	۱٦٦	۳۷٫۸۷	۱٫۲۵	۵٫٤۷۵	این مقاله

نتایج

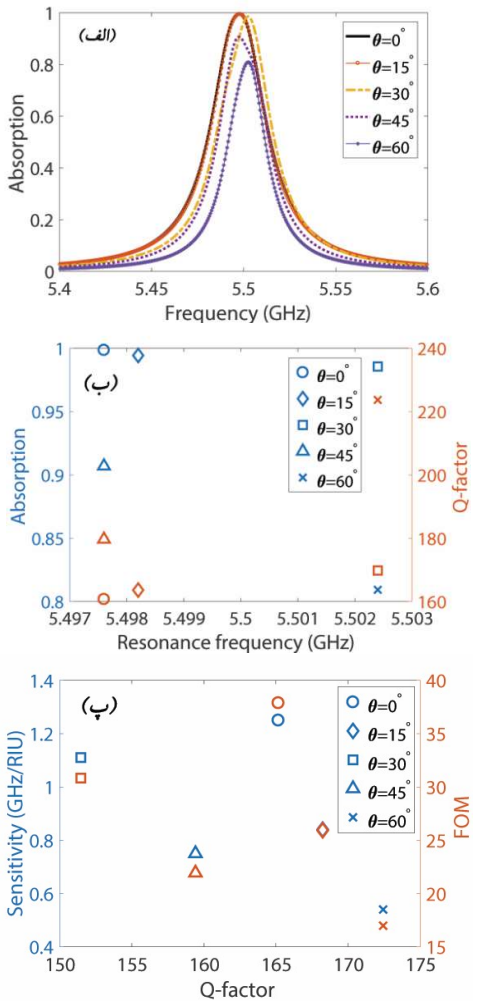
جدول مقایسه نشان می‌دهد که حسگر پیشنهادی از نظر حساسیت، ضریب کیفیت و شاخص مزیت، عملکردی رقابتی در مقایسه با بسیاری از حسگرهای فراماده‌ای مایکروویوی گزارش‌شده در سال‌های اخیر دارد. علاوه بر این، مستقل بودن پاسخ ساختار نسبت به قطبش، پایداری نسبی در برابر تغییر زاویه تابش و هندسه نسبتاً ساده آن، از دیگر مزیت‌های طراحی حاضر به‌شمار

می‌روند. با این حال، همانند بسیاری از ساختارهای مشابه که در مرحله طراحی و شبیه‌سازی قرار دارند، نتایج این پژوهش نیز هنوز از طریق اندازه‌گیری تجربی اعتبارسنجی نشده‌اند. ازاین‌رو، ساخت و آزمون عملی حسگر می‌تواند گام بعدی برای ارزیابی قابلیت‌های آن در کاربردهای واقعی باشد.

همچنین خاطر نشان می‌گردد که برتری عملکرد ساختار پیشنهادی تنها ناشی از بهینه‌سازی ابعاد هندسی نیست، بلکه نتیجه طراحی هندسه‌ای است که امکان ایجاد جفت‌شدگی الکترومغناطیسی قوی بین تشدیدگر مربعی لایه رویین و صفحه فلزی زیرین، تمرکز شدید میدان الکتریکی در فضای خالی لایه رویین (شکل۵) و محبوس‌شدن انرژی در لایه دی‌الکتریک را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها موجب کاهش پهنای باند تشدید، افزایش ضریب کیفیت و تقویت برهم‌کنش میدان با ماده مورد آزمایش شده و در نهایت به افزایش حساسیت حسگر منجر می‌شوند.

اثر زاویه تابش

تاکنون فرض این بود که موج فرودی به‌صورت عمود بر سطح فراماده تابیده می‌شود (متناظر با زاویه تابش $\theta=0^\circ$). اکنون زاویه‌های تابشی غیر از صفر و برابر با ۱۵°، ۳۰°، ۴۵° و ۶۰° را نیز در نظر گرفته و نمودارهای جذب مربوط به آن‌ها را رسم می‌کنیم. نتایج در شکل۷الف نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل، افزایش زاویه تابش موجب جابه‌جایی فرکانس تشدید می‌شود، هرچند این جابه‌جایی روند کاملاً یکنواختی ندارد. علاوه بر این، با افزایش θ جذب بیشینه کاهش و ضریب کیفیت افزایش می‌یابد. برای نمایش بهتر روند تغییرات این کمیت‌ها با زاویه تابش، در شکل۷ب، مقادیر حداکثر جذب و ضریب کیفیت به‌عنوان تابعی از فرکانس تشدید و برای هر زاویه تابش نشان داده



شکل ۷. الف: طیف های جذب مربوط به زوایای مختلف تابش موج الکترومغناطیسی، اندازه‌گیری‌شده نسبت به راستای عمود بر ساختار. ب: تأثیر زاویه تابش بر ضریب کیفیت، بیشینه جذب، و فرکانس تشدید. در هر دو بخش الف و ب، نواحی خالی لایه بالایی ساختار با هوا پر شده‌اند. پ: تغییرات حساسیت حسگر، شاخص مزیت و ضریب کیفیت در برابر زاویه تابش.

شده است. بر اساس این نمودار، بیشترین ضریب کیفیت برابر با ۲۲۳٫۷ در زاویه تابش ۶۰ درجه و در فرکانس تشدید ۵٫۵۰۲ گیگاهرتز به‌دست می‌آید. در مقابل، بیشترین میزان جذب (تقریباً برابر با یک) در تابش عمودی ($\theta=0^\circ$) مشاهده می‌شود.

تغییر زاویه تابش، عملکرد حسگری ساختار را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای بررسی این اثر، مقادیر ضریب شکست ۱٫۰٤ و ۱٫۰٦ برای نواحی خالی لایه بالایی ساختار در نظر گرفته شده و با استفاده از آنان، پارامترهای حساسیت، شاخص مزیت و ضریب کیفیت برای هر یک از زاویه‌های تابش مورد بحث محاسبه می‌گردد. نتایج در شکل۷پ نشان داده شده‌اند. طبق این شکل، بیشترین حساسیت برابر با $1/11\ GHz/RIU$ بوده و در زوایای تابش ۰° و ۳۰° به‌دست می‌آید. مقدار بیشینه شاخص مزیت برابر با ۳۳٫٦٤ بر واحد تغییر در ضریب شکست در زاویه $\theta=0^\circ$ رخ می‌دهد، در حالی که بالاترین ضریب کیفیت یعنی ۱۷۲٫٤ در زاویه $\theta=60^\circ$ مشاهده می‌شود؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های پیشین، زمانی که فضاهای خالی لایه بالا با هوا پر شده بودند، سازگار است. به‌طور کلی، زاویه تابش $\theta=0^\circ$ بهترین ترکیب از پارامترهای حسگری را ارائه می‌دهد و می‌توان آن را بهینه‌ترین زاویه برای عملکرد حسگر دانست. همچنین شایان ذکر است که مقدار بیشینه ضریب کیفیت به‌دست‌آمده با استفاده از $n=1/04$ و $n=1/06$ برای فضاهای خالی (یعنی ۱۷۲٫٤ در $\theta=60^\circ$) کمتر از مقدار متناظر آن (یعنی ۲۲۳٫۷) در حالتی است که این فضاها با هوا پر شده بودند.

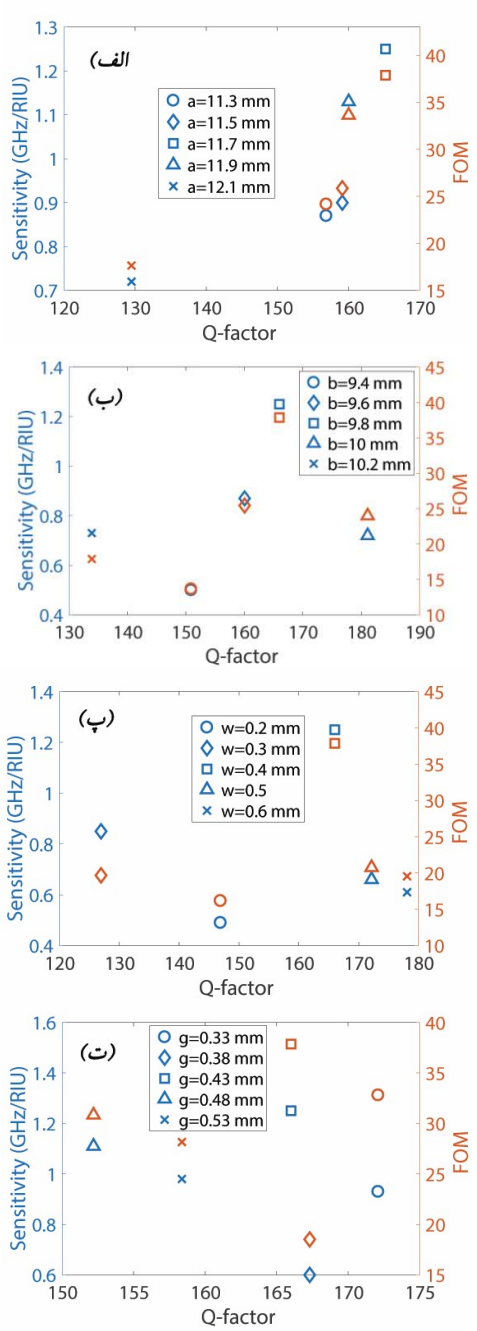
پایداری نسبی پاسخ ساختار در برابر تغییر زاویه تابش را می‌توان نتیجه هم‌زمان چند عامل فیزیکی دانست. نخست، ابعاد سلول واحد در مقایسه با طول موج کاری بسیار کوچک است؛ ازاین‌رو میدان الکترومغناطیسی در مقیاس سلول واحد تقریباً یکنواخت باقی می‌ماند و تغییر زاویه تابش تأثیر محدودی بر نحوه برانگیختگی تشدیدگر دارد. دوم، تقارن چهارگانه تشدیدگر موجب می‌شود جفت‌شدگی الکترومغناطیسی ساختار با موج فرودی در زوایای مختلف تا حد زیادی حفظ شود. علاوه بر این، از آنجا که پاسخ ساختار ناشی از تشدیدهای موضعی LC است، انرژی عمدتاً در اطراف تشدیدگر و در فاصله بین دو لایهٔ فلزی محبوس می‌شود؛ بنابراین تغییر زاویهٔ انتشار، تأثیر کمتری بر شرایط تشدید نسبت به ساختارهای مبتنی بر مدهای انتشاری دارد. در نتیجه، اگرچه با افزایش زاویه تابش، شدت جذب و فرکانس تشدید تا حدودی تغییر می‌کنند، ساختار همچنان عملکرد حسگری مطلوب خود را حفظ می‌کند.

اثر پارامترهای هندسی

همان‌گونه که در ادبیات پژوهشی به‌خوبی شناخته شده است، پاسخ الکترومغناطیسی یک ساختار فراماده به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای هندسی آن قرار دارد. برای ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی کلیدی در طرح حاضر (یعنی a ، b ، w و g) بر عملکرد حسگر، و همچنین برای بررسی اینکه آیا مقادیر معرفی‌شده در شکل۱ واقعاً بهینه هستند یا خیر، پارامترهای حسگری برای مقادیر مختلف هر یک از این پارامترها محاسبه می شود. نتایج در شکل۸ ارائه شده‌اند.

بیشترین مقادیر پارامترهای حساسیت و شاخص مزیت، بر اساس شکل۸الف، برای $a=11/7mm$، و بر اساس شکل۸ب برای $b=9/8mm$ به‌دست می‌آیند. این دو دقیقاً همان مقادیر معرفی شده در زیر نویس شکل۱ هستند. از سوی دیگر، بیشترین ضریب کیفیت برابر با ۱۸۱ و در $b=10\ mm$ رخ می‌دهد.

برای پارامتر w، شکل۸پ نشان می‌دهد که بیشترین ضریب کیفیت برابر با ۱۷۸٫۱ در $w=0/6\ mm$ حاصل می‌شود، در حالی‌که بیشترین مقادیر حساسیت



شکل ۸ پارامترهای مختلف حسگری ساختار، شامل حساسیت، شاخص مزیت و ضریب کیفیت برای مقادیر متفاوت پارامترهای هندسی.

و شاخص مزیت در $w=۰/۰٤\ mm$ مشاهده می‌گردد. شکل۸ت نیز تغییرات پارامترهای حسگری را نسبت به مقادیر مختلف g نمایش می‌دهد.

به‌طور کلی، از این تحلیل نتیجه می‌شود که اگرچه با برخی پیکربندی‌های هندسی دیگر می‌توان به‌مقادیر کمی بالاتر برای ضریب کیفیت دست یافت، اما بیشترین مقادیر حساسیت و شاخص مزیت با استفاده از ویژگی‌های هندسی مشخص‌شده در شکل۱ حاصل می‌شوند.

کاربرد در شناسایی شیمیایی

توانایی تشخیص انواع مختلف روغن‌ها با استفاده از حسگرها برای بسیاری از کاربردهای صنعتی، زیست‌محیطی و ایمنی اهمیت حیاتی دارد [۲۲]. برای نمونه، در بخش صنایع غذایی، تشخیص اصالت و پایش استاندارد روغن‌های خوراکی مانند روغن زیتون، ذرت، پالم و آفتابگردان برای حفاظت از مصرف‌کننده ضروری است، به‌ویژه برای جلوگیری از تقلب یا افت کیفیت ناشی از حرارت‌دیدگی بیش از حد [۲۳].

به‌طور مشابه، در سامانه‌های خودرویی و مکانیکی، تشخیص وضعیت روغن‌ها ــ مانند تمایز بین سیال ترمز سالم و آلوده ــ می‌تواند از خرابی تجهیزات جلوگیری کرده و ایمنی عملکرد را تضمین کند [۱۹]. در صنایع شیمیایی نیز شناسایی حلال‌هایی مانند بنزن و تتراکلریدکربن به‌دلیل تفاوت در خواص دی‌الکتریک و کاربردهای آن‌ها ضروری است [۱۲].

روش‌های متداول آزمایش معمولاً کند، تهاجمی یا وابسته به‌مواد شیمیایی هستند که این امر هزینه و پیچیدگی را افزایش می‌دهد. در مقابل، حسگری دی‌الکتریک مبتنی بر امواج مایکروویو یک راهکار

بدون نیاز به برچسب، غیرمخرب و آنی برای پایش دقیق چنین سیالاتی فراهم می‌کند [۲٤].

حسگرهای مبتنی بر فراماده که بر اساس ضریب شکست عمل می‌کنند، به‌دلیل حساسیت بالا، ابعاد فشرده و ویژگی‌های تشدید قابل تنظیم، گزینه‌ای بسیار مناسب برای چنین فرایندهای تشخیصی هستند.

جدول۲. ثابت‌های دی‌الکتریک اندازه‌گیری‌شده در فرکانس ۸ گیگاهرتز، گزارش‌شده در [۱۲].

ثابت دی الکتریک اندازه گیری شده در ۸ گیگاهرتز	ماده مورد آزمایش
۲٫٥٦	روغن زیتون
۳٫۰۷	روغن ذرت
۲٫۹۳	روغن آفتاب گردان
۲٫۸۱	روغن پالم
۲٫۷۸	روغن ترمز تمیز
۲٫٦۹	روغن ترمز مصرف شده
۲٫٥۱	تتراکلرید کربن

همان‌گونه که در منابع [۲٦, ۲٥] نشان داده شده است، فراماواد هنگام قرارگیری در معرض مواد با ثابت‌های دی‌الکتریک متفاوت، می‌توانند جابه‌جایی‌های تشدیدی تیز و قابل‌توجهی ایجاد کنند. این حساسیت ناشی از محبوس‌شدن شدید میدان الکترومغناطیسی در شکاف‌های تشدیدگر است که به‌طور مستقیم با نمونه مورد آزمایش برهم‌کنش دارد.

حسگری که در این مقاله معرفی شده است، با دستیابی به ضریب کیفیت برابر با ۱٦٦ و شاخص مزیت برابر با ۳۷٫۸۷ بر واحد تغییر در ضریب شکست عملکردی بسیار بهتر از بسیاری از حسگرهای مایکروویوی موجود از نظر تفکیک‌پذیری و دقت ارائه می‌دهد (جدول۱).

برای استفاده از این حسگر در تشخیص مواد شیمیایی مختلف ذکرشده، لازم است ضریب شکست یا ثابت دی‌الکتریک این مواد در دسترس باشد تا بتوان آن‌ها را برای پر کردن نواحی شکاف ساختار به کار برد. مقادیر موردنیاز ثابت دی‌الکتریک در مرجع [۱۲] گزارش شده‌اند که به‌صورت تجربی در فرکانس ۸ گیگاهرتز اندازه‌گیری شده‌اند. در نگاه نخست، ممکن است استفاده از این مقادیر برای حسگر حاضر موجه به‌نظر نرسد، زیرا فرکانس تشدید آن ٥٫٤۸۹ گیگاهرتز است.

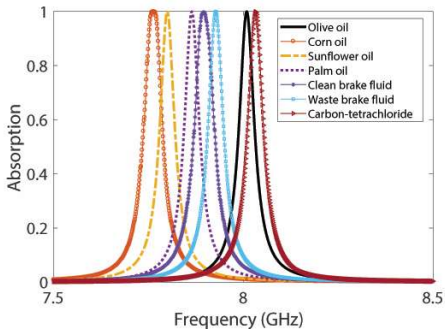
بنابراین، برای سازگار کردن حسگر، ابتدا پارامترهای هندسی ساختار شکل۱ را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کنیم که فرکانس تشدید از ٥٫٤۸۹ گیگاهرتز به حدود ۸ گیگاهرتز منتقل شود. با توجه به‌اینکه فرکانس تشدید یک فراماده به‌طور معکوس با ابعاد اجزای سازنده آن رابطه دارد [۲۸, ۲۷]، ابعاد عناصر با ضرب کردن مقادیر P_x، P_y، a و b در ۰٫٦٤٥ و مقدار g در ۰٫۷۸ کاهش داده شدند، در حالی که t بدون تغییر باقی ماند. این ضرایب مقیاس‌گذاری از طریق روش آزمون و خطا تعیین شدند تا علاوه بر اینکه جابه‌جایی طیفی مورد نظر انتقال به آبی حاصل شود، رفتار جذب کامل در فرکانس تشدید نیز حفظ گردد.

شایان ذکر است که در فرایند بازتنظیم ابعاد هندسی، روغن زیتون با ثابت دی‌الکتریک ۲٫٥٦ به‌عنوان ماده آزمایشی برای پر کردن نواحی شکاف انتخاب شد [۱۲].

پس از آنکه فرکانس تشدید با موفقیت به ۸ گیگاهرتز منتقل شد، مقادیر مختلف ثابت دی‌الکتریک فهرست‌شده در جدول۲ اعمال می‌گردد و طیف‌های جذب برای هفت ماده شیمیایی مختلف ترسیم می‌شود. همان‌گونه که در شکل۹ مشاهده می‌شود، نتایج نشان می‌دهند که اختلاف فرکانسی میان روغن زیتون و روغن ذرت برابر با ۲٤٦ مگاهرتز

؛ مقداری که به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از ۱۰۰ مگاهرتز گزارش‌شده در مرجع [۱۲] برای همین دو روغن است.

به‌طور دقیق‌تر، فرکانس‌های تشدید برای روغن زیتون و روغن ذرت به‌ترتیب ۸٫۰۰۹ گیگاهرتز و ۷٫۷۶۳ گیگاهرتز هستند که به حساسیت $۲/۳\ GHz/RIU$ و شاخص مزیت برابر با $۴۸/۹۱/RIU$ منجر می‌شود؛ مقادیری که حتی از داده‌های جدول ۱ نیز فراتر می‌روند.



شکل ۹. **طیف‌های جذب مربوط به مواد شیمیایی مختلف.**

علاوه بر این، شکل۹ نشان می‌دهد که حتی اختلاف‌های بسیار کوچک در ویژگی‌های دی‌الکتریک سایر مواد آزمایش‌شده نیز به قله‌های تشدید کاملاً متمایز منجر می‌شود. این ویژگی‌ها، حسگر فراماده پیشنهادی را به ابزاری قدرتمند، سریع، دقیق و غیرتماسی برای شناسایی روغن‌ها و مواد شیمیایی مشابه در کاربردهای عملی تبدیل می‌کنند.

نتیجه گیری

این پژوهش یک جاذب کامل مایکروویو فراماده‌ای مستقل از قطبش برای حسگری دقیق ضریب شکست را معرفی کرده و مشخصات آن را به‌صورت عددی بررسی می‌کند. این ساختار که بر پایه چارچوب فلز– دی‌الکتریک– فلز و یک تشدیدگر مربعی دولایه طراحی شده، در فرکانس ۵٫۴۸۹ گیگاهرتز جذب تقریباً کامل از خود نشان می‌دهد. ارزیابی عملکرد حسگری نشان داد که این حسگر به حساسیت $۱/۲۵\ GHz/RIU$، شاخص مزیت $۳۷/۸۷۱/RIU$ و ضریب کیفیت ۱۶۶ دست می‌یابد؛ مقادیری که نسبت به بسیاری از ادوات مشابه گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین برتر هستند.

تأثیر زاویهٔ تابش نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که اگرچه فرکانس تشدید و دامنه جذب با تغییر زاویه تابش دستخوش تغییر می‌شوند، حسگر همچنان ضریب کیفیت بالا و حساسیت مطلوب خود را حفظ می‌کند. در عین حال مشخص گردید که بهترین عملکرد در تابش عمودی حاصل می‌شود. بهینه‌سازی پارامترهای هندسی نیز تأیید کرد که طراحی انتخاب‌شده، ترکیبی متعادل و نزدیک به‌بهینه از حساسیت، شاخص مزیت و ضریب کیفیت ارائه می‌دهد.

برای گسترش دامنه کاربرد، ساختار به‌گونه‌ای مقیاس‌بندی شد که فرکانس تشدید به ۸ گیگاهرتز منتقل شود و با داده‌های گزارش‌شده ثابت دی‌الکتریک برای انواع روغن‌ها و مواد شیمیایی سازگار شود. حسگر مقیاس‌شده جابه‌جایی‌های فرکانسی واضحی برای مواد آزمایشی مختلف نشان داد و امکان تمایز دقیق میان روغن‌های خوراکی، سیالات ترمز و حلال‌های صنعتی را فراهم کرد.

ترکیب حساسیت بالا، پهنای باند تشدید باریک، و عملکرد مستقل از قطبش، جاذب فراماده‌ای پیشنهادی را به‌گزینه‌ای بسیار مناسب برای شناسایی شیمیایی غیرمخرب، بدون نیاز به برچسب، و در زمان کم تبدیل می‌کند.

لازم به‌ذکر است که نتایج ارائه‌شده در این پژوهش بر پایه شبیه‌سازی‌های عددی به‌دست آمده‌اند و ساخت و

ارزیابی تجربی نمونه در چارچوب این مطالعه انجام نشده است. از این‌رو، بررسی اثر تلرانس‌های ساخت، ناهمگنی احتمالی مواد، زبری سطوح فلزی، تلفات واقعی مواد و شرایط اندازه‌گیری آزمایشگاهی می‌تواند در عملکرد نهایی حسگر تأثیرگذار باشد. بنابراین، ساخت نمونه، اندازه‌گیری تجربی پاسخ فرکانسی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، از مهم‌ترین مسیرهای ادامه این پژوهش خواهد بود.

همچنین تاکید می‌گردد که نوآوری این پژوهش در طراحی و بهینه‌سازی یک جاذب کامل فرامادهای مستقل از قطبش با هدف دستیابی همزمان به‌ضریب کیفیت بالا، حساسیت مناسب و شاخص مزیت قابل‌توجه، همراه با تحلیل فیزیکی جامع مکانیزم جذب و حسگری است. به‌بیان دیگر این پژوهش با بهره‌گیری از یک طراحی هندسی بهینه، عملکرد یک پیکربندی شناخته‌شده را از نظر ویژگی‌های حسگری بهبود داده و تحلیل فیزیکی کامل‌تری از مکانیزم عملکرد آن ارائه می‌کند.

مرجع‌ها

[1] J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, Controlling electromagnetic fields, Science, 312 (2006) 1780–1782. https://doi.org/10.1126/science.1125907

[2] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4184. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184.

[3] D.R. Smith, J.B. Pendry, M.C.K. Wiltshire, Metamaterials and negative refractive index, Science, 305 (2004) 788–792. https://doi.org/10.1126/science.1096796.

[4] M. Askari, Z. Touhidi Nia, M.V. Hosseini, Modified fishnet structure with a wide negative refractive index band and a high figure of merit at microwave frequencies, J. Opt. Soc. Am. B, 39 (2022) 1282–1288. https://doi.org/10.1364/JOSAB.454386.

[5] U. Leonhardt, Optical conformal mapping, Science, 312 (2006) 1777–1780. https://doi.org/10.1126/science.1126493.

[6] V.B. Novikov, A.A. Dotsenko, A.P. Leontiev, K.S. Napolskii, T.V. Murzina, Chirp-driven control over fast-slow light effects in epsilon-near-zero metamaterials, Opt. Lett., 49 (2024) 1668–1671. https://doi.org/10.1364/OL.520084.

[7] M. Askari, A scheme for increasing the sensitivity of metal–insulator–metal perfect absorber sensors, Optik, 338 (2025) 172477. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2025.172477.

[8] Y. Wang, Z. Liu, F. Zhou, Z. Yi, J. Wang, Perfect absorption properties of a near-infrared super-surface perfect absorber based on a multilayer subwavelength array structure, Phys. Lett. A, 540 (2025) 130395. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.130395.

[9] N. Kazemi, M. Abdolrazzaghi, P. Musilek, E. Baladi, A Planar Compact Absorber for Microwave Sensing Based on Transmission-Line Metamaterials, IEEE Sens. J. 24 (2024) 41864–41874. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3484585

[10] Y. Yao, Z. Liao, Z. Liu, X. Liu, J. Zhou, G. Liu, Z. Yi, J. Wang, Recent progresses on metamaterials for optical absorption and sensing: A review, J. Phys. D: Appl. Phys. 54 (2021) 113002. DOI: 10.1088/1361-6463/abccf0

[11] M.R. Rakhshani, M. Rashki, Metamaterial perfect absorber using elliptical nanoparticles in a multilayer metasurface structure with polarization independence, Opt. Express, 30 (2022) 10387–10399. https://doi.org/10.1364/OE.454298.

[12] M.R. Islam, M.T. Islam, M.M. Salaheldeen, B. Bais, S.H.A. Almalki, H. Alsaif, M.S. Islam, Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application, Sci. Rep. 12 (2022) 6792. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10729-4.

[13] S. Feng, X. Xu, S. Tao, T. Chen, L. Zhou, Y. Huang, H. Yang, M. Yuan, C. Ding, Comprehensive evaluation of chemical composition and health-promoting effects with chemometrics analysis of plant derived edible oils, Food Chem.: X, 14 (2022) 100341. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100341.

[14] M. Askari, H. Pakarzadeh, F. Shokrgozar, High Q-factor terahertz metamaterial for superior refractive index sensing, J. Opt. Soc. Am. B, 38 (2021) 3929–3936. https://doi.org/10.1364/JOSAB.438773.

[15] D. Hu, T. Meng, H. Wang, Y. Ma, Q. Zhu, Ultra-narrow-band terahertz perfect metamaterial absorber for refractive index sensing application, Results Phys. 19 (2020) 103567. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103567

[16] H. Zhu, Y. Zhang, L. Ye, Y. Li, Z. Dang, R. Xu, B. Yan, A high Q-factor metamaterial absorber and its refractive index sensing characteristics, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 70 (2022) 5383–5391. https://doi.org/10.1109/TMTT.2022.3218041

[17] J. Liang, F. Ding, S. Li, H. Cheng, X. Zhou, C. Wang, H. Yang, J. Jin, Microwave metamaterial sensor with a high Q factor to measure complex permittivity based on cross-polarization conversion, Opt. Express, 33 (2025) 20918–20928. https://doi.org/10.1364/OE.561277

[18] K.P. Kaur, T. Upadhyaya, U. Patel, V. Sorathiya, A. Alwabli, A.Y. Jaffar, Ultra-thin, polarization-insensitive, and conformal metamaterial-based sensor with high Q-factor, Appl. Phys. A, 130 (2024) 930. https://doi.org/10.1007/s00339-024-08108-z

[19] M.A. Khalil, Y. Wong Hin, T. Batool, A. Hoque, L.Y. Chiong, H.H. Goh, T.A. Kurniawan, M.S. Soliman, M.T. Islam, Highly sensitive split ring resonator-based sensor for quality monitoring of edible oils, Sci. Rep. 15 (2025) 2283. https://doi.org/10.1038/s41598-025-85800-x

[20] L. Dewangan, N.K. Mishra, S. Ghosh, Angularly stable high-Q factor metamaterial absorber for biomedical sensing applications, IEEE Sens. Lett. 8 (2024) 1–4. https://doi.org/10.1109/LSENS.2024.3414337

[21] K.P. Kaur, T. Upadhyaya, K. Pandya, U. Patel, Ultrathin high Q-factor perfect metamaterial absorber for sensing applications, IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 2023, https://ieeexplore.ieee.org/document/10242878

[22] T. Chen, S. Li, H. Sun, Metamaterials application in sensing, Sensors, 12 (2012) 2742–2765. https://www.mdpi.com/1424-8220/12/3/2742

[23] Y.I. Abdulkarim, S. Dalgac, F.O. Alkurt, F.F. Muhammadsharif, H.N. Awl, S.R. Saeed, O. Altintas, C. Li, M. Bakir, M. Karaaslan, M. Ameen, R.K. Chaudhary, H. Luo, Utilization of a triple hexagonal split ring resonator based metamaterial sensor for the improved detection of fuel adulteration, J Mater Sci: Mater. Electron., 32 (2021) 24258–24272. https://doi.org/10.1007/s10854-021-06891-6

[24] M. Abdolrazzaghi, M. Daneshmand, A.K. Iyer, Strongly enhanced sensitivity in

planar microwave sensors based on metamaterial coupling, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 66 (2018) 1843–1855. https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2791942

[25] R. Melik, E. Unal, N.K. Perkgoz, B. Santoni, D. Kamstock, C. Puttlitz, H.V. Demir, Nested metamaterials for wireless strain sensing, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 16 (2010) 450–458. https://ieeexplore.ieee.org/document/5361333/

[26] M. Askari, M. Bahadoran, A refractive-index-based microwave sensor based on classical electromagnetically induced transparency in metamaterials, Optik, 253 (2022) 168589. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168589

[27] D. Schurig, J.J. Mock, D.R. Smith, Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials, Appl. Phys. Lett., 88 (2006) 081101. https://doi.org/10.1063/1.2166681

[28] C.M. Watts, X. Liu, W.J. Padilla, Metamaterial electromagnetic wave absorbers, Adv. Mater. 24 (2012) OP98–OP120. https://doi.org/10.1002/adma.201200674