

طراحی بهینه و تحلیل تمام‌موج جاذب‌های فراماده‌ای پهن‌بند در طیف نور مرئی

مرتضی نظری، امیر حبیب‌زاده شریف و محمد اسکندری

همچنین یک جاذب فراماده‌ای پهن‌بند مستقل از قطبش موج تابشی و مستقل از زاویه تابش با استفاده از پیچ‌های مربعی و لوزی شکل طراحی شده که دارای میانگین جذب ۹۵٪ در طیف نور مرئی است [۱۲]. از طرفی یک جاذب فراماده‌ای پهن‌بند دیگر با استفاده از حلقه‌های دایروی و پیچ‌های مربعی با میانگین جذب ۹۶/۴۳٪ در طیف نور مرئی معرفی شده که طیف جذب آن نیز مستقل از قطبش نور تابشی است [۱۳].

در این مقاله، دو جاذب فراماده‌ای پهن‌بند مستقل از زاویه تابش و قطبش موج تابشی با ساختار متناوب دوبعدی طراحی شده و عملکرد آنها با استفاده از شبیه‌سازی‌های تمام‌موج مبتنی بر روش انتگرال‌گیری متناهی (FIT) تحلیل شده‌اند. این ساختارها به‌صورت فلز-عایق-فلز بوده و از لایه فلز بازتابنده پشتی به منظور جلوگیری از عبور امواج تابشی و افزایش میزان جذب استفاده شده است. ابعاد هندسی لایه‌ها و ثابت دی‌الکتریک عایق، پارامترهای مؤثر بر فرکانس‌های تشدید پلاسمون‌های سطحی هستند. با طراحی دقیق این پارامترها عملکرد بهینه جاذب‌ها با میزان جذب بیش از ۹۲٪ در طیف نور مرئی تحقق یافته است. به منظور تحلیل عملکرد جاذب‌ها، پروفایل‌های توزیع شدت میدان الکتریکی و توزیع شدت میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- طراحی جاذب‌های فراماده‌ای

ساختارهای طراحی شده برای سلول واحد جاذب‌های فراماده‌ای پهن‌بند در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. این جاذب‌ها متشکل از پیچ‌های مربعی و صلیبی بوده و دارای ساختار فلز-عایق-فلز هستند. لایه عایق از جنس سیلیکا بوده و بین لایه بازتابنده پشتی و تشدیدگرهای فلزی قرار گرفته است. جنس لایه‌های بازتابنده و تشدیدگرها از نیکل است [۱۴]. تلفات نوری و پاشندگی مواد سیلیکا و نیکل در نظر گرفته شده‌اند [۱۵]. تشدیدگرها نقش اساسی را در جذب نور ایفا می‌کنند؛ چرا که با تحریک پلاسمون‌های سطحی محلی و ایجاد تشدید فابری-پیرو به کمک لایه بازتابنده پشتی، موجب حبس شدن میدان الکترومغناطیسی در لایه عایق و متعاقباً افزایش میزان جذب آن می‌شوند. این ساختارها شبیه ساختار ارائه شده در [۱۰] هستند با این تفاوت که اینجا از تعداد کمتری از پیچ‌های قطری استفاده گردیده و نشان داده شده که این ساختارها در مقایسه با جاذب طراحی شده در [۱۰] از عملکرد جذبی بهتری برخوردارند. دلیل استفاده از پیچ‌های غیرقطری اضافی در جاذب ۲ (نشان داده شده در شکل ۱-ب)، امکان‌سنجی افزایش جذب با تحریک هرچه بیشتر پلاسمون‌های سطحی محلی است؛ چرا که هر پیچ دارای فرکانس تشدید متفاوتی است. میزان جذب در جاذب‌های الکترومغناطیسی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰]

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

چکیده: در این مقاله، طراحی بهینه، شبیه‌سازی عددی و تحلیل تمام‌موج دو جاذب فراماده‌ای پهن‌بند در فرکانس‌های فرورسرخ، نور مرئی و فرابنفش از طیف نور خورشید ارائه شده‌اند. این جاذب‌های مسطح، متشکل از دو لایه هادی و یک لایه عایق میانی هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر روش انتگرال‌گیری متناهی نشان داده‌اند که عملکرد جاذب‌های طراحی شده مستقل از قطبش و زوایای تابش سمتی و ارتفاع موج تابشی است. جاذب‌های پیشنهادی دارای میزان جذب بیش از ۹۲٪ در محدوده نور مرئی هستند؛ لذا این جاذب‌ها می‌توانند به منظور برداشت انرژی نور خورشید مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژه: جاذب، پهن‌بند، فراماده، نور مرئی، تحلیل تمام‌موج.

۱- مقدمه

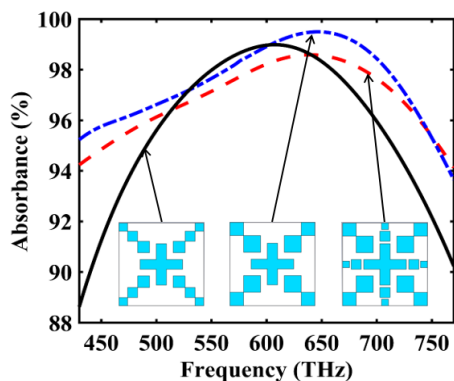
فرامواد، ساختارهایی متناوب با خصوصیات شگفت‌انگیز نوری از جمله ضریب شکست منفی هستند [۱] و از کاربردهای فراوانی در طیف الکترومغناطیس برخوردارند که از آن جمله می‌توان به استفاده از آنها در عدسی‌های کامل [۲] و [۳]، پوشش‌های نامرئی‌ساز [۴] و [۵]، تغییر قطبش [۶]، برداشت انرژی [۷]، جاذب‌های کامل تک‌باندی [۸]، چندباندی [۹] و پهن‌بند [۱۰] اشاره کرد. جاذب‌های الکترومغناطیسی به واسطه طیف‌های جذبی‌شان به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند: نوع اول، جاذب‌های پهن‌بند هستند که از قابلیت جذب زیاد در طیف وسیعی از طول موج‌ها برخوردارند و نوع دوم، جاذب‌های باند باریک هستند که طول موج‌های خاصی را جذب می‌کنند. در سالیان اخیر، پژوهش‌های زیادی در زمینه طراحی جاذب‌های فراماده‌ای در باندهای فرکانسی میکروویو، فرورسرخ و نور مرئی انجام شده‌اند. به عنوان مثال، جاذب فراماده‌ای با استفاده از نانومیل‌های طلا به منظور جذب کامل طول موج‌های فرورسرخ طراحی شده است [۱۱]. همچنین جاذب‌های با باند بسیار باریک به منظور استفاده در زیست‌حسگرهای پلاسمونی و فیلترهای نوری طراحی شده‌اند [۱۱]. از طرفی، پژوهش‌های زیادی نیز به منظور طراحی ساختارهای خاص برای حذف وابستگی جذب به قطبش نور تابشی انجام شده‌اند. در حوزه جاذب پهن‌بند نیز یک نوع جاذب فراماده‌ای طراحی شده که عملکرد آن مستقل از قطبش موج تابشی و زاویه تابش آن است [۱۰].

این مقاله در تاریخ ۱۹ اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۷ آبان ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

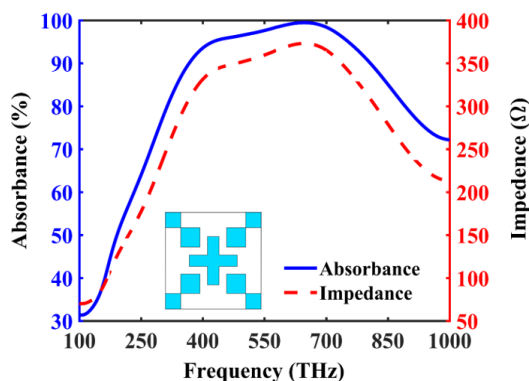
مرتضی نظری، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، (email: mortezanazari197@gmail.com).

امیر حبیب‌زاده شریف، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، (email: sharif@sut.ac.ir).

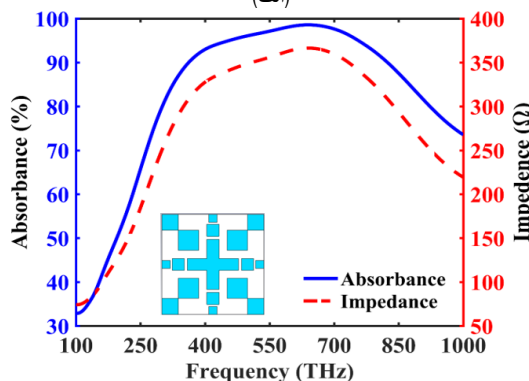
محمد اسکندری، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، (email: mo_eskandari@sut.ac.ir).



شکل ۲: طیف‌های جذب جاذب‌های ۱ و ۲ و جاذب ارائه شده در [۱۰] در ناحیه نور مرئی.

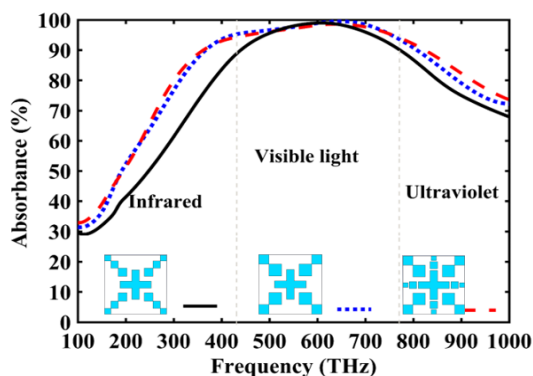


(الف)



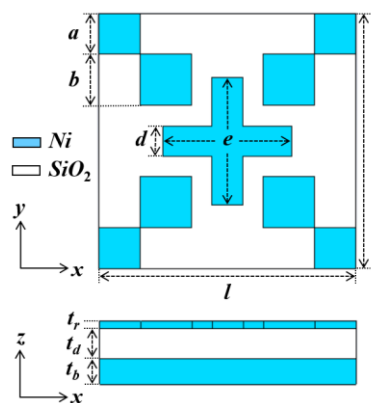
(ب)

شکل ۳: طیف‌های جذب و امپدانس ورودی در فرکانس‌های فروسرخ، نور مرئی و فرابنفش طیف نور خورشید برای (الف) جاذب ۱ و (ب) جاذب ۲.

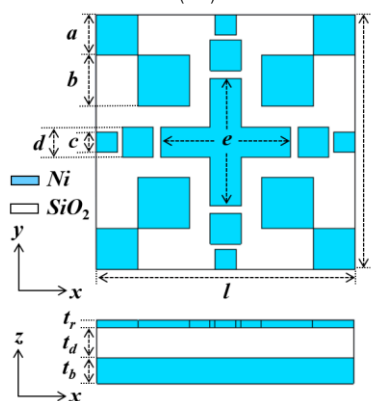


شکل ۴: منحنی‌های جذب جاذب‌های پیشنهادی در فرکانس‌های فروسرخ، نور مرئی و فرابنفش طیف نور خورشید.

نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل‌ها، جذب کامل به ازای فرکانس‌هایی تحقق می‌یابد که دارای امپدانس ورودی مساوی با امپدانس مشخصه فضای آزاد ($Z_0 = 377\Omega$) باشند. بنابراین تحقق تطبیق امپدانس، شرط



(الف)



(ب)

شکل ۱: ساختار سلول واحد جاذب‌های پیشنهادی از نماهای بالا و جانی، (الف) جاذب ۱ و (ب) جاذب ۲. $l = 500\text{ nm}$, $e = 250\text{ nm}$, $a = 80\text{ nm}$, $b = 100\text{ nm}$, $c = 40\text{ nm}$ ، $t_r = 60\text{ nm}$ و $d = 60\text{ nm}$, $t_b = 50\text{ nm}$, $t_d = 60\text{ nm}$ به ترتیب مساوی ۲۰ و ۱۵ نانومتر است.

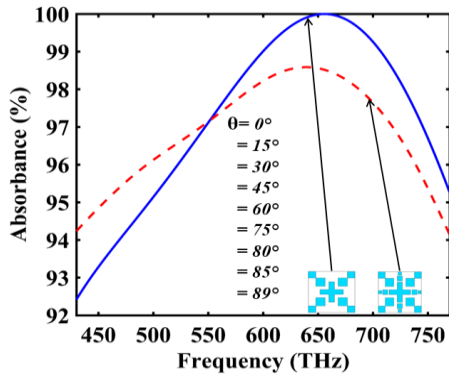
که در آن $T(\omega)$ و $R(\omega)$ به ترتیب ضرایب انتقال و بازتاب توان بوده و کمیت‌هایی وابسته به فرکانس هستند و توسط روابط $R(\omega) = S_{11}^2$ و $T(\omega) = S_{21}^2$ از طریق پارامترهای پراکندگی محاسبه می‌شوند [۱۰]. به منظور افزایش جذب، ضرایب انتقال و بازتاب باید به کمینه مقدار ممکن برسند. ضریب انتقال توان را می‌توان با طراحی بهینه ضخامت لایه بازتابنده حذف کرد ($T(\omega) \cong 0$).

بدیهی است که مقدار بهینه t_b باید خیلی بزرگ‌تر از عمق پوستی نیکل در باند فرکانس کاری باشد. کمینه‌سازی ضریب بازتاب توان نیز با بهینه‌سازی ابعاد ساختار امکان‌پذیر است. در این راستا می‌توان از روش تطبیق امپدانس استفاده کرد؛ چرا که بیشینه جذب در شرایط تطبیق امپدانس قابل تحقق است.

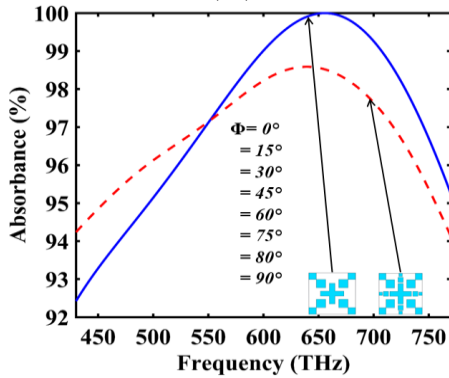
۳- نتایج شبیه‌سازی‌های عددی

در شکل ۲، طیف‌های جذب جاذب‌های ۱ و ۲ در ناحیه نور مرئی رسم شده و با طیف جذب ساختار ارائه‌گردیده در [۱۰] مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جذب بیش از ۹۹٪ برای جاذب ۱ در حوالی فرکانس ۶۵۰ تراهرتز تحقق یافته است. با محاسبه میانگین جذب هر یک از جاذب‌های ۱ و ۲ که به ترتیب برابر با ۹۷/۴٪ و ۹۶/۸٪ هستند، متوجه می‌شویم که جاذب ۱ نسبت به جاذب ۲ و جاذب ارائه‌شده در [۱۰] (با میانگین جذب ۹۵/۸٪) از عملکرد بسیار بهتری در طیف نور مرئی برخوردار است.

در شکل ۳، طیف‌های جذب و امپدانس ورودی جاذب‌های فراماده‌ای ۱ و ۲ در فرکانس‌های فروسرخ، نور مرئی و فرابنفش طیف نور خورشید

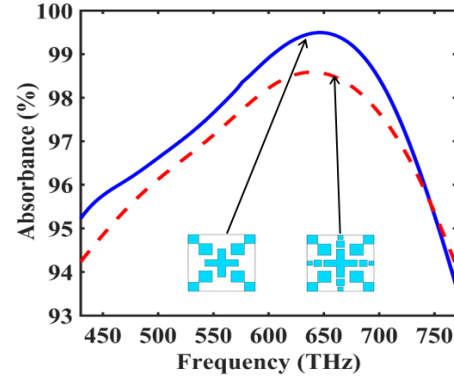


(الف)



(ب)

شکل ۶: طیف‌های جذب جاذب‌های ۱ و ۲ به ازای (الف) مقادیر مختلف زاویه تابش ارتفاع و (ب) مقادیر مختلف زاویه تابش سمتی. این منحنی‌ها برای هر جاذب بر همدیگر منطبق بوده و قابل تفکیک نیستند.



شکل ۵: طیف‌های جذب جاذب‌های ۱ و ۲ در قطبش‌های TE و TM. این منحنی‌ها برای هر جاذب بر همدیگر منطبق بوده و قابل تفکیک نیستند.

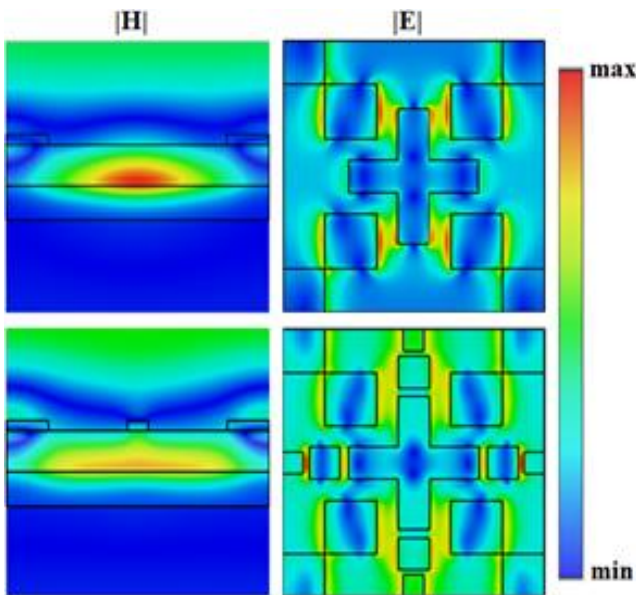
برقراری جذب کامل است. از طرفی مطابق شکل ۳ با گرایش امیدانس ورودی ساختار به مقدار امیدانس مشخصه فضای آزاد، جذب به مقدار ۱۰۰٪ میل کرده و بالعکس، با دور شدن امیدانس ورودی از آن، جذب ساختار نیز کاهش می‌یابد. در شکل ۴ نیز منحنی‌های جذب جاذب‌های ۱ و ۲ فرکانس‌های فروسرخ، نور مرئی و فرابنفش طیف نور خورشید نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که جاذب ۱ در کل ناحیه فرابنفش دارای جذب بیش از ۷۵٪ بوده و جذب آن در ناحیه فروسرخ نزدیک، بیش از ۷۰٪ است. این در حالی است که جاذب ۲ در کل ناحیه فروسرخ نزدیک، مرئی و فرابنفش دارای جذب بیش از ۷۶٪ است. بنابراین جاذب‌های فوق پهن‌بند پیشنهادی از قابلیت بسیار خوبی در برداشت انرژی خورشیدی برخوردار هستند.

طیف‌های جذب نشان داده شده در شکل‌های ۲ تا ۴ برای مود TE جاذب‌های پیشنهادی رسم شدند. حال به منظور بررسی تأثیر قطبش موج تابشی بر میزان جذب، در شکل ۵ طیف جذب جاذب‌های پیشنهادی در قطبش‌های TE و TM نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جاذب‌های پیشنهادی نسبت به قطبش موج تابشی غیرحساس بوده و این امر به عنوان یک مزیت مهم در کاربردهای متنوع این جاذب‌ها به شمار می‌رود. غیرحساس بودن عملکرد این جاذب‌ها به قطبش موج تابشی ناشی از تقارن هندسی ساختار آنها در صفحه xy است.

موضوع مهم دیگر، بررسی عملکرد جاذب‌های پیشنهادی به ازای زوایای مختلف سمتی و ارتفاع موج تابشی است. مطابق طیف‌های جذبی نشان داده شده در شکل ۶ عملکرد این جاذب‌ها به زوایای تابشی سمتی و ارتفاع وابسته نیست و این ویژگی نیز یک مزیت بسیار مهم در کاربردهای متنوع جاذب‌های طراحی شده به شمار می‌رود.

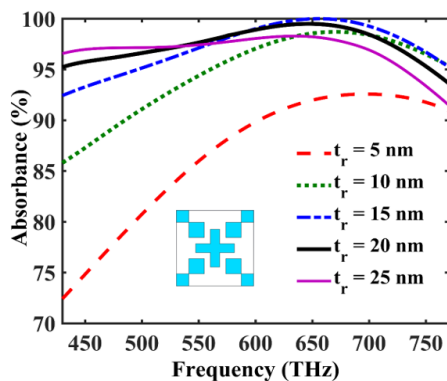
برای ایجاد درک فیزیکی و مشاهده مکانیزم جذب نور در جاذب‌های پیشنهادی، پروفایل‌های توزیع شدت میدان الکتریکی و توزیع شدت میدان مغناطیسی هر دو ساختار در فرکانس منطبق بر بیشترین میزان جذب آنها (فرکانس تشدید) در شکل ۷ رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت میدان الکتریکی در لبه‌های هر یک از پیچ‌ها به دلیل تحریک پلاسمون‌های سطحی محلی، افزایش یافته و شدت میدان مغناطیسی نیز در داخل لایه عایق به بیشینه مقدار خود رسیده است. در نتیجه، بیشینه میزان جذب به ازای فرکانس تشدید برای هر دو جاذب پیشنهادی تحقق یافته است.

در ادامه، تأثیر ضخامت لایه عایق و تأثیر ضخامت تشدیدگرها بر میزان جذب با حفظ اندازه سایر ابعاد ساختارها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۸، طیف‌های جذب جاذب‌های پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف ضخامت عایق نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده

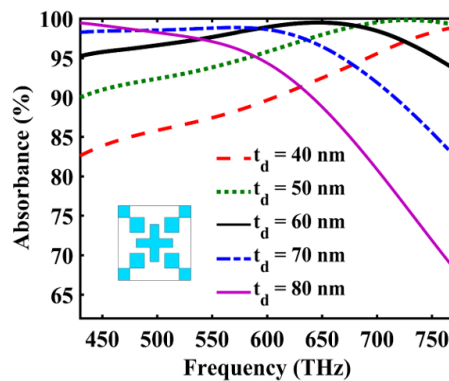


شکل ۷: پروفایل توزیع شدت میدان الکتریکی و توزیع شدت میدان مغناطیسی جاذب‌های پیشنهادی در فرکانس تشدید ۶۵۴٫۷۶ تراهرتز.

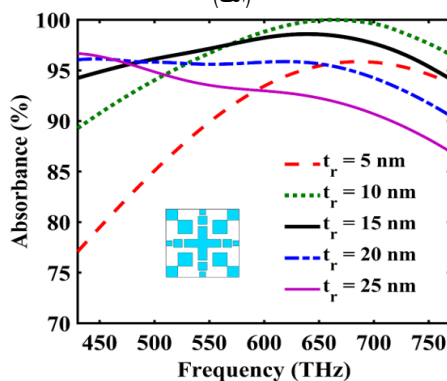
می‌شود با افزایش t_d ، فرکانس تشدید جاذب‌ها به فرکانس‌های پایین‌تر میل می‌کند. در واقع با افزایش t_d ، ظرفیت‌های خازنی بین هر یک از تشدیدگرها و لایه بازتابنده کاهش می‌یابند. با توجه به سری بودن خازن‌ها، مقدار خازن معادل افزایش یافته و در نتیجه، فرکانس تشدید کاهش می‌یابد. از طرفی مشاهده می‌شود که ضخامت بهینه ناحیه عایق به منظور تحقق بیشینه جذب در هر دو ساختار، ۶۰ نانومتر است. طیف‌های جذب جاذب‌های پیشنهادی به ازای ضخامت‌های مختلف تشدیدگرها در شکل ۹ رسم شده‌اند. به وضوح مشاهده می‌شود



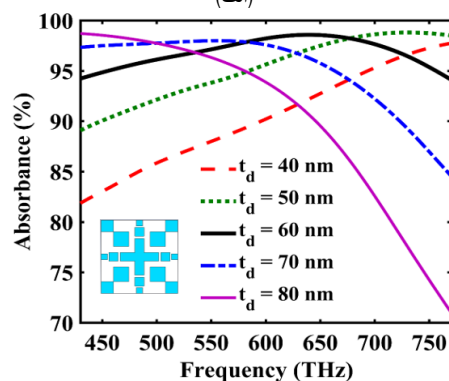
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱: طیف‌های جذب به ازای ضخامت‌های مختلف لایه عایق برای (الف) جاذب ۱ و (ب) جاذب ۲.

شکل ۲: طیف‌های جذب به ازای ضخامت‌های مختلف لایه عایق برای (الف) جاذب ۱ و (ب) جاذب ۲.

جدول ۱: مشخصات عملکردی جاذب‌های طراحی شده در مقایسه با جاذب‌های ارائه شده قبلی.

جاذب ۱	جاذب ۲	[۱۳]	[۱۲]	[۱۰]	مشخصات عملکردی
۹۷٫۴	۹۶٫۸	۹۶٫۴۳	۹۵	۹۵٫۸	میانگین جذب (درصد)
✓	✓	✓	✓	✓	عدم وابستگی به قطبش
صفر تا ۸۹	صفر تا ۸۹	صفر تا ۷۰	صفر تا ۹۰	صفر تا ۹۰	محدوده زاویه تابش ارتفاع (درجه)
صفر تا ۳۶۰	صفر تا ۳۶۰	صفر تا ۳۶۰	صفر تا ۳۶۰	صفر تا ۳۶۰	محدوده زاویه تابش سمتی (درجه)
۷۷۰ تا ۴۳۰	۷۷۰ تا ۴۳۰	۷۵۰ تا ۴۰۰	۷۷۰ تا ۴۳۰	۷۷۰ تا ۴۳۰	محدوده طیف جذبی (تراهرتز)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی بهینه، شبیه‌سازی عددی و تحلیل تمام‌موج دو جاذب فراماده‌ای پهن‌بند متشکل از ساختارهای مسطح متناوب سه‌لایه‌ای ارائه گردید. ساختار سه‌لایه‌ای این جاذب‌ها به صورت فلز-عایق-فلز بوده و از لایه فلز بازتابنده پشتی به منظور جلوگیری از عبور امواج تابشی و افزایش میزان جذب استفاده شده است. به منظور تحلیل عملکرد جاذب‌ها، پروفایل‌های توزیع شدت میدان الکتریکی و توزیع شدت میدان مغناطیسی مورد تحلیل قرار گرفتند. نشان داده شد که هر دو جاذب در مقایسه با جاذب طراحی شده در [۱۰]، [۱۲] و [۱۳] از عملکرد بهتری برخوردار است و میزان جذب آنها در محدوده نور مرئی بیش از ۹۲٪ بوده و از میانگین جذب ۹۶٫۸٪ و ۹۷٫۴٪ برخوردارند. از طرفی نشان داده شد که عملکرد جاذب‌های طراحی شده نسبت به زوایای سمتی و ارتفاع موج تابشی و همچنین نسبت به قطبش‌های TE و TM موج تابشی مستقل است. این عدم وابستگی طیف جذب به زوایای سمتی و ارتفاع و قطبش موج تابشی، ناشی از مشخصه تقارن هندسی جاذب‌های فراماده‌ای پیشنهادی است. بنابراین جاذب‌های پیشنهادی کاندیدای خوبی برای برداشت انرژی نور خورشید هستند.

که با افزایش t_r ، فرکانس تشدید جاذب‌ها به مقادیر پایین‌تر میل می‌کند؛ زیرا افزایش t_r منجر به افزایش اندوکتانس ساختار می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که ضخامت بهینه تشدیدگرها به منظور تحقق بیشینه جذب در جاذب‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۲۰ و ۱۵ نانومتر است.

مطابق جدول ۱، مشخصات عملکردی جاذب‌های طراحی شده در این مقاله با جاذب‌های معرفی شده در سال‌های اخیر در محدوده فرکانسی ۴۳۰ تا ۷۷۰ تراهرتز (مرجع [۱۳] در محدوده فرکانسی ۴۰۰ تا ۷۵۰ تراهرتز) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد تمامی جاذب‌ها مستقل از قطبش نور تابشی بوده و جاذب‌های ۱ و ۲ از میانگین جذب بیشتری در مقایسه با سایر جاذب‌ها برخوردارند؛ ضمن این که جاذب ۱ دارای بیشترین میانگین جذب است. از طرفی، عملکرد همگی جاذب‌ها مستقل از زاویه تابش سمتی بوده و از لحاظ زاویه تابش ارتفاع، جاذب‌های ۱ و ۲ و جاذب‌های معرفی شده در [۱۰] و [۱۱] از عملکرد بهتری نسبت به جاذب طراحی شده در [۱۳] برخوردارند. در مجموع به این نتیجه می‌رسیم که جاذب ۱ در مقایسه با سایر جاذب‌ها از عملکرد بهتری برخوردار است. همچنین یکی از مزایای این جاذب، سادگی ساختار هندسی و سهولت ساخت آن است.

able metamaterial absorber employed in visible region with a sun shape resonator," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 126466-126480, 2021.

- [14] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd," *Physical Review B*, vol. 9, no. 12, Article ID: 5056, Jun. 1974.
- [15] G. Ghosh, "Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals," *Optics Communications*, vol. 163, no. 1-3, pp. 95-102, May 1999.

مرتضی نظری در سال ۱۳۹۸ تحصیلات خود در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق را در دانشگاه غیرانتفاعی کمال ارومیه به پایان رساند و در سال ۱۴۰۱ موفق به اخذ مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه صنعتی سهند تبریز شد.

امیر حبیبزاده شریف در سال ۱۳۸۱ تحصیلات خود در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق را در دانشگاه تبریز به پایان رساند و در سالهای ۱۳۸۳ و ۱۳۹۲ به ترتیب موفق به اخذ مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی مهندسی برق از دانشگاه علم و صنعت ایران شد. ایشان از سال ۱۳۹۲ به عنوان عضو هیأت علمی با مرتبه استادیاری به دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند تبریز پیوست و در حال حاضر، با مرتبه دانشیاری در آن دانشگاه به فعالیتهای آموزشی و پژوهشی می‌پردازد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: فوتونیک، پلاسمونیک، الکترومغناطیس، بیوالکترومغناطیس، مهندسی میکروویو، طراحی آنتن، سیستم‌های مخابرات نوری، انتشار امواج الکترومغناطیسی و روش‌های تحلیلی و عددی در الکترومغناطیس.

محمد اسکندری در سال ۱۳۹۰ تحصیلات خود در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق را در دانشگاه فنی و حرفه‌ای گرگان به پایان رساند و در سال ۱۳۹۳ موفق به اخذ مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی فوتونیک-نانوفوتونیک از دانشگاه تبریز شد. ایشان در حال حاضر دانشجوی سال آخر دکترای مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند تبریز بوده و زیر نظر استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر امیر حبیبزاده شریف، به فعالیتهای پژوهشی می‌پردازد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: فوتونیک، پلاسمونیک، سلول‌های خورشیدی، جاذب‌های متامتریالی و سنسورهای نوری.

مراجع

- [1] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 18, Article ID: 3966, Oct. 2000.
- [3] N. Garcia, "Left-handed materials do not make a perfect lens," *Physical Review Letters*, vol. 88, no. 20, Article ID: 207403, May 2002.
- [4] W. Cai, "Optical cloaking with metamaterials," *Nature Photonics*, vol. 1, no. 4, pp. 224-227, Apr. 2007.
- [5] D. Schurig, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977-980, Nov. 2006.
- [6] Y. Zhao, A. Qing, Y. Meng, Z. Song, and C. Lin, "Dual-band circular polarizer based on simultaneous anisotropy and chirality in planar metamaterial," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1-7, Jan. 2018.
- [7] E. Unal, "Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications," *J. of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 9735-9740, Dec. 2015.
- [8] C. Sabah, *et al.*, "Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application," *Optics Communications*, vol. 322, pp. 137-142, Jul. 2014.
- [9] S. Ramya and I. Srinivasa Rao, "Design of new metamaterial absorber with triple band for radar cross section reduction," in *Proc. 5th Int. Conf. on Advances in Computing and Communications, ICACC'15*, pp. 303-306, Kochi, India, 2-4 Sept. 2015.
- [10] M. Bağmancı *et al.*, "Broad-band polarization-independent metamaterial absorber for solar energy harvesting applications," *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 90, pp. 1-6, Jun. 2017.
- [11] Z. Su, J. Yin, and X. Zhao, "Soft and broadband infrared metamaterial absorber based on gold nanorod/liquid crystal hybrid with tunable total absorption," *Scientific Reports*, vol. 5, Article ID: 16698, 9 pp., Nov. 2015.
- [12] M. Bagmancı, *et al.*, "Solar energy harvesting with ultra-broadband metamaterial absorber," *International J. of Modern Physics B*, vol. 33, no. 8, Article ID: 1950056, Mar. 2019.
- [13] M. M. K. Shuvo, M. I. Hossain, S. Rahman, S. Mahmud, S. S. Islam, and M. T. Islam, "A wide-angle, enhanced oblique incidence, bend-