

طراحی و استخراج مدل مداری یک فیلتر پهن باند بر پایه سطح انتخاب‌گر فرکانس برای کاربردهای تراهرتز

حامد محمدی نعمت آباد^۱، کارشناس ارشد؛ احسان زارعیان جهرمی^۲، استادیار؛ راحله بصیری^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - ha.mohammadi@sutech.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - zareian@sutech.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - r.basiri@sutech.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک فیلتر میان‌گذر بر پایه سطح انتخاب‌گر فرکانس در محدوده فرکانسی تراهرتز طراحی شده است. فیلتر طراحی شده دارای عمل‌کرد چشم‌گیری در نواحی باند عبور و خارج از باند است. این ساختار دارای پهنای باند نسبی ۶۰٪ با فرکانس مرکزی ۰/۴ تراهرتز است و به‌علاوه، دامنه موج عبوری بالایی با حدکثر صافی فوق‌العاده‌ای در مقایسه با کارهای پیشین به‌دست آمده است. همچنین، مدار معادل این ساختار استخراج شده است. مقایسه انجام‌شده بین مدل مداری و شبیه‌سازی تمام موج، بیانگر تطابق خوب نتایج به‌دست آمده است. به‌علاوه، حساسیت این فیلتر نسبت به زوایای مختلف در محدوده ۰ تا ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است که بیان‌گر حساسیت کم این فیلتر نسبت به زوایای تابش متفاوت است. همچنین، تأثیر ناشی از تغییر پارامترهای فیزیکی فیلتر موردنظر مورد تحلیل قرار گرفته است و نتایج حاصله، براساس المان‌های مداری توجیه شده است.

واژه‌های کلیدی: فیلتر فراماده، سطوح انتخاب‌گر فرکانس، فیلتر تراهرتز، مدل مدار معادل، حساسیت.

Design and Equivalent Circuit Model Extraction of a Frequency Selective Surface-Based Broadband Filter for Terahertz Applications

Hamed Mohammadi Nemat-Abad¹, MSc; Ehsan Zareian-Jahromi², Assistant professor; Raheleh Basiri³, Assistant professor

1- Department of Electrical and Electronic Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: ha.mohammadi@sutech.ac.ir

2- Department of Electrical and Electronic Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: zareian@sutech.ac.ir

3- Department of Electrical and Electronic Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: r.basiri@sutech.ac.ir

Abstract: In this paper, a frequency selective surface-based band pass filter is proposed in terahertz regime. The proposed filter provides a great performance in pass band and out-of-band regions. A fractional bandwidth of 60% around the central frequency of 0.4 THz is achieved whereas a high transmission magnitude with an acceptable flatness is obtained in comparison to previous reports. Additionally, an equivalent circuit model is extracted for the proposed filter. A comparison between simulation results and those obtained using proposed circuit model shows a good agreement. Moreover, the sensitivity of the proposed filter with respect to the incident wave angle is investigated in the range of 0 to 60°. It is demonstrated that the performance of the designed filter is acceptable for various incident angles in the mentioned range. Also, the effects of altering different geometrical parameters are investigated and justified based on the equivalent circuit model.

Keywords: Metamaterial filter, frequency selective surfaces, terahertz filter, equivalent circuit model, sensitivity.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۹

نام نویسنده مسئول: احسان زارعیان جهرمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

امروزه فناوری ترانزستور یکی از مباحث پرطرفدار در رشته‌های فیزیک و موج و میدان به شمار می‌رود که پیشرفت‌های چشم‌گیر اخیر، شاهی بر این موضوع است [۲، ۱]. امواج ترانزستور که در محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ ترانزستور قرار دارند، توانایی حل بسیاری از مشکلات حل‌نشده در زمینه مخابرات از جمله تصویربرداری و طیف‌سنجی [۳-۵]، شناسایی مواد منفجره و مواد مخدر [۷، ۶]، و مخابرات فرایه‌ن‌بند [۸، ۷] را دارا هستند. با توجه به نیازهای موجود در این حوزه، ابزارهای گوناگونی طراحی و ساخته شده که از جمله آن‌ها می‌توان به آنتن ترانزستور [۹، ۱۰]، جاذب [۱۱]، حسگر [۱۲، ۱۳] و فیلتر [۱۴] اشاره نمود.

فیلترها از جمله ابزارهای پرکاربرد در زمینه مخابرات به شمار می‌روند. فیلترهای مورد استفاده در محدوده فرکانسی ترانزستور به دسته‌های گوناگونی تقسیم می‌شوند. انواع مختلف این فیلترها براساس فناوری طراحی عبارتند از فیلتر گرافنی [۱۵]، فیلتر کریستال مایع [۱۶]، و فیلتر فرامواد [۱۷].

فرامواد به آن دسته از مواد اطلاق می‌شود که به‌طور طبیعی در طبیعت یافت نمی‌شوند و براساس نوع کاربرد، با ثابت‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی خاص طراحی می‌گردند. با استفاده از این مواد می‌توان ابزارهای مختلفی در باند ترانزستور طراحی و پیاده‌سازی نمود. نوع خاصی از فرامواد با عنوان سطوح انتخابگر فرکانس، دارای کاربردهای فراوانی است [۲۱-۱۸].

فرامواد و از همه مهم‌تر سطوح انتخابگر فرکانس نقش به‌سزایی در پیشرفت فناوری ترانزستور داشته‌اند، به‌طوری‌که از این ساختارها در طراحی فیلترهای فضایی که از مهم‌ترین ابزارهای حوزه ترانزستور است، استفاده شده‌است. این فیلترها برحسب کاربرد، انواع مختلفی از قبیل بالاگذر [۲۲]، میان‌گذر [۲۳]، و میان‌گذر [۱۷] دارند که هرکدام می‌توانند به فیلترهای باریک‌بند [۲۴]، چندبندی [۲۵]، و پهن‌بند [۲۶] تقسیم‌بندی شوند.

در طراحی این ساختارهای ترانزستور مبتنی بر فرامواد باید به دو فرض مهم در طراحی توجه نمود: ۱- باید شرط محیط همگن مؤثر برای این ساختارها رعایت شود. برای حصول این شرط باید ابعاد ساختار کمتر از $\lambda_g/4$ در نظر گرفته شود تا بتوان برای ساختار مورد نظر، همانند یک ماده واقعی ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی که به ترتیب ϵ_r و μ_r نامیده می‌شوند، در نظر گرفت [۱۸]. ۲- برای این‌که ساختار طراحی‌شده نسبت به زاویه تابش امواج حساسیت کم‌تری داشته‌باشد، باید ساختار طراحی‌شده الگویی متقارن داشته‌باشد [۲۷، ۲۸]. با توجه به دو شرط بالا ساختاری چندلایه با الگوهایی متقارن که ابعادی در حد $\lambda_g/4$ را کوچک‌تر دارد، مد نظر است.

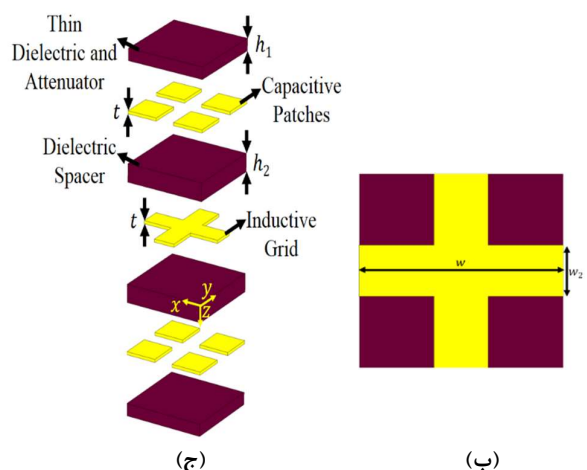
در سال‌های اخیر کاربردهای گوناگونی از ساختارهای سطوح فرکانس‌گزین در محدوده فرکانسی گیگاهرتز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌است [۲۹]. همچنین، فیلترهای فضایی بسیاری با توجه به شرایط

ذکرشده، در محدوده فرکانسی میکروویو طراحی و پیشنهاد شده‌است [۲۸، ۳۰، ۳۱]. اما تعداد این کارها برای محدوده فرکانسی ترانزستور ناچیز است و هنوز زوایای پنهانی از این ساختارها در محدوده فرکانسی ترانزستور وجود دارد. به‌عنوان نمونه، مقالات کمی در زمینه مدل مداری این ساختارها و بحث تفصیلی پیرامون این موضوع ارائه شده‌است و همچنین از نقطه نظر فرامواد، کمتر به این ساختارها پرداخته‌اند. از جمله مقالاتی که در زمینه فیلترهای فراماده میان‌گذر ارائه شده‌است می‌توان به [۳۲] اشاره نمود. در [۳۲] فیلتری میان‌گذر با پهنای باند نسبی ۴۴٪ پیشنهاد شده‌است که از حداکثر صافی خوبی در پهنای باند عبور برخوردار نیست، و مشخصات مطلوبی در خارج از باند عبور ندارد. همچنین از لحاظ ابعاد و ضخامت ساختار، فیلتر پیشنهادی ابعاد بزرگی دارد. در [۲۷] روشی برای طراحی فیلتر فراماده ارائه شده‌است که منجر به تعداد لایه‌های زیاد جهت رسیدن به پهنای باند مناسب می‌شود که خود، سبب دشواری ساخت و ضخامت زیاد ساختار می‌شود.

براساس مطالب ذکرشده، در این مقاله، یک ساختار فراماده به‌عنوان یک فیلتر پهن‌بند میان‌گذر در محدوده فرکانسی ترانزستور طراحی شده‌است که قابلیت فیلترکردن مطلوبی در پهنای باند ذکرشده دارد. همچنین، به‌دلیل وجود تقارن، ساختار نسبت به زوایای تابشی و پلاریزاسیون موج تابشی حساسیت پایینی دارد. در این ساختار، سعی بر طراحی رویه فلزی با رفتار خازنی مناسبی بوده که درجه آزادی بالاتری نسبت به کارهای قبل داشته‌باشد [۲۷]. این عمل کرد باعث بهبود پهنای باند ساختار و همچنین کاهش ضخامت ساختار به حد چشم‌گیری شده‌است. به‌علاوه، مدل مداری معادل فیلتر پیشنهادی استخراج شده‌است که نتایج آن، هم‌خوانی مناسبی با نتایج شبیه‌سازی تمام موج دارد. در این مقاله رفتار ساختار در قسمت‌های مختلف براساس مدل مداری ارائه‌شده به درستی توجیه شده‌است و همچنین از نقطه نظر فراماده ساختار ارائه‌شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است.

فیلترهای طراحی‌شده با این ویژگی‌ها سبب انتقال مناسب امواج در پهنای باند عبور و فیلترکردن امواج ناخواسته می‌شوند. از این فیلترها می‌توان در کاربردهای تصویربرداری پزشکی [۳۳] و طیف‌سنجی استفاده نمود [۳۴، ۳۵]. باید اشاره کرد که هر چه پهنای باند فیلتر موردنظر بیش‌تر باشد، قابلیت پوشش محدوده وسیع‌تری از فرکانس‌ها فراهم می‌باشد و در نتیجه، جزئیات بیشتری از تصویر، قابل دریافت است. از کاربردهای دیگر این نوع فیلترها، می‌توان به کاربردهای حس‌گری و مخابرات بی‌سیم در محدوده ترانزستور نیز اشاره نمود [۳۲].

در ادامه این مقاله، مراحل طراحی فیلتر پیشنهادی در بخش دوم بررسی شده‌است. در بخش سوم، مدل مداری ساختار فیلتر پیشنهادی ارائه گردیده‌است و همچنین، پارامترهای آن استخراج گردیده‌است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و مقایسه با کارهای پیشین در بخش چهارم مورد بررسی قرار گرفته‌است. نهایتاً، جمع‌بندی مطالب ارائه‌شده در این مقاله در بخش پنجم آورده شده‌است.



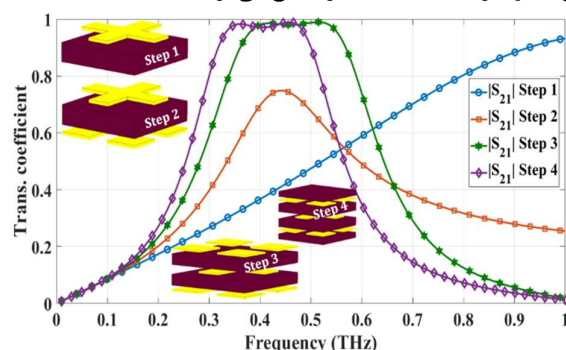
شکل (۱): (الف) نمای دوبعدی لایه پیچ خازنی (ب) نمای دوبعدی لایه شبکه سلفی (ج) نمای سه بعدی کلی ساختار و طرز قرار گرفتن لایه ها

جدول (۱): پارامترهای هندسی فیلتر پیشنهادی مربوط به شکل (۱)

پارامترها	مقادیر (μm)	پارامترها	مقادیر (μm)
h_1	۲۰	w	۱۷۰
h_2	۳۰	w_1	۴۰
t	۱	w_2	۴۵

برای بهبود عملکرد ساختار، مکمل لایه صلیبی شکل در زیر ساختار اولیه قرار داده می شود. با افزایش تعداد لایه ها تعداد المان های راکتیو موجود در ساختار افزایش می یابد که سبب ایجاد یک رزونانس در حوالی فرکانس 0.45 THz می شود. با افزایش درجه آزادی ساختار، می توان فرکانس های قطع بالا و پایین را با تغییر ابعاد لایه های موجود کنترل نمود. این مساله، به کمک شبیه سازی پارامتری ساختار، بررسی شده و بهترین مقادیر جهت پارامترهای مداری، انتخاب شده اند.

در مرحله سوم، یک لایه مکمل صلیبی دیگر در بالای لایه صلیبی با فاصله h_2 (شکل (۲)) قرار می گیرد. حضور این لایه سبب بهبود صافی باند ضریب عبور ساختار و همچنین افزایش میزان عبور می شود. بدین وسیله، مشخصات فیلتر پیشنهادی در خارج از باند عبور نیز بهبود می یابد و ضریب کیفیت ساختار اصلاح می گردد.



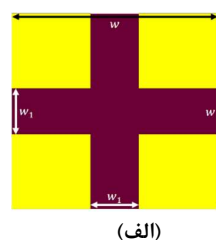
شکل (۲): ضریب انتقال برای مراحل تکاملی ساختار براساس ابعاد ذکر شده در جدول (۱)

۲- مراحل طراحی فیلتر پیشنهادی

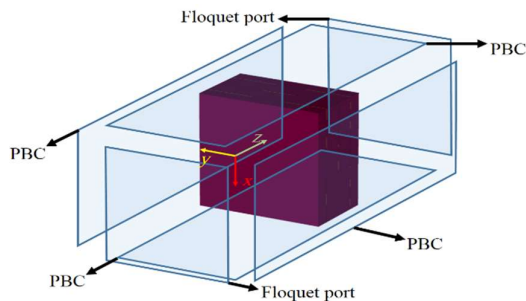
الگوریتم های بهینه سازی به دلیل زمان بردن و عدم تضمین حصول بهترین پاسخ، دارای معایبی هستند. به علاوه با تغییر مشخصات فیلتر دلخواه، الگوریتم بهینه سازی را باید مجدداً اجرا نمود. جهت از بین بردن این معایب، نقطه شروع اولیه در بهینه سازی بسیار مهم است. بدین منظور در ابتدا، به مطالعه سلول واحدهای مختلف پرداخته می شود و عمل کرد آن ها بررسی می شود. لازم به ذکر است با توجه به این که خاصیت فراماده بودن ساختار مد نظر است، ابعاد کلی از قاعده $p \ll \lambda_g/4$ پیروی می کند که p تناوب ساختار و λ_g طول موج فرکانس مرکزی پاسخ مورد نظر است. سپس، با ترکیب مناسب سلول های واحد، تقریبی از ساختار نهایی را به دست آورده می شود که به عنوان نقطه شروع در الگوریتم بهینه سازی وارد می شود. با بهینه سازی ابعاد این ساختار، نتیجه نهایی حاصل می شود. از مزایای این روش نسبت به بهینه سازی مطلق ساختار بدون حدس اولیه مناسب، می توان به این موارد اشاره نمود: زمان کمتر پردازش الگوریتم، تضمین حصول پاسخ مناسب، و قابلیت تعمیم به ساختارهای فیلتری دیگر به دلیل توجیهات فیزیکی فراهم شده. در پایان پس از مشخص شدن ابعاد کلی ساختار، با در نظر گرفتن پاسخ فرکانسی مورد نظر، ضخامت مناسب با استفاده از جستجوی فرکانسی به دست می آید.

سلول واحد فیلتر پیشنهادی، متشکل از سه لایه فلزی است که به وسیله لایه های دی الکتریک از هم جدا شده اند. لایه فلزی وسط یک مدل صلیبی شکل است که به وسیله دو لایه دی الکتریک در بالا و پایین از لایه های فلزی دیگر جدا شده است. دو لایه فلزی مشابه بالا و پایین، مکمل لایه صلیب هستند. علاوه بر لایه های دی الکتریک جداکننده، دو لایه دی الکتریک دیگر به منظور ایجاد تضعیف مورد نظر در خارج از باند عبور، در بالا و پایین ساختار قرار گرفته اند. نمای سه بعدی و دوبعدی ساختار پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. مقادیر عددی پارامترهای مربوط به این ساختار که پس از بهینه سازی حاصل شده، در جدول (۱) آورده شده است.

روال طراحی تکاملی مرحله به مرحله فیلتر مورد نظر به همراه نمودارهای مربوط به هر مرحله، در شکل (۲) آورده شده است. در مرحله اول، یک لایه دی الکتریک به همراه لایه صلیبی شکل در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج شکل (۲)، یک صفر انتقال در فرکانس های پایین تحت تاثیر خاصیت سلفی لایه صلیبی ایجاد شده است.



(الف)



شکل (۳): جزییات شبیه‌سازی مربوط به سلول واحد طراحی شده

قسمت‌های دی‌الکتریک موجود در ساختار به‌عنوان خط انتقال در نظر گرفته می‌شوند و باتوجه‌به شکل (۴-ب) می‌توان آن‌ها را براساس مدل تلگرافی خط انتقال، به‌صورت خط انتقالی با امپدانس مشخصه $Z_T = Z_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ و طول متناسب با ارتفاع لایه دی‌الکتریک در نظر گرفت. در این رابطه Z_0 برابر با 377Ω و ϵ_r ثابت گذردهی الکتريکی نسبی ماده دی‌الکتریک است [۳۸]. ظرفیت سلفی و خازنی این لایه‌ها براساس روابط (۲ و ۱) قابل محاسبه می‌باشند [۲۷].

$$L_T = \mu_0 \mu_r h \quad (۱)$$

$$C_T = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r h}{2} \quad (۲)$$

در این رابطه $\mu_0 \mu_r$ بیانگر ثابت نفوذپذیری مغناطیسی ماده دی‌الکتریک است. همچنین، $\epsilon_0 \epsilon_r$ نشان‌دهنده ثابت گذردهی الکتريکی ماده دی‌الکتریک هستند. باتوجه‌به مطالب ذکرشده و مدل‌های مداری ارائه‌شده برای هر قسمت از ساختار و ساده‌سازی‌های درنظرگرفته‌شده، می‌توان درنهایت مدل ساده‌شده شکل (۴-ج) را برای فیلتر پیشنهادی در نظر گرفت.

اکنون به بیان روشی مناسب جهت استخراج مقادیر عددی این المان‌ها پرداخته می‌شود. پاسخ فرکانسی حاصل از مدل مداری باید تطبیق مناسبی با پاسخ فرکانسی حالت تمام موج داشته‌باشد. برای استخراج مقادیر عددی المان‌های مدل مداری، ابتدا مقدار اولیه پارامترها با استفاده از روند ارائه‌شده در [۲۷] محاسبه می‌شود. سپس با بهینه‌سازی این پارامترها، مقادیر مناسب به‌دست می‌آیند. برای به‌دست‌آوردن مقدار عددی پارامترها به‌ترتیب زیر عمل می‌شود:

الف) مقدار خازن C_1 از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$C_1 = \frac{q_1}{\omega_0 r_1 Z_0 \delta} \quad (۳)$$

که q_1 مقدار نرمالیزه‌شده ضریب کیفیت رزوناتورهای ورودی و خروجی و r_1 مقدار نرمالیزه‌شده امپدانس‌های منبع و بار است. همچنین، $\delta = BW/f_0$ پهنای باند نسبی فیلتر موردنظر است که BW و f_0 به‌ترتیب پهنای باند فیلتر و فرکانس مرکزی در پاسخ فرکانسی فیلتر موردنظر هستند [۲۷]. این رابطه در اصل از نتایج رزوناتورهای موازی است که پس از ساده‌سازی براساس رابطه Q و درنظرگرفتن اثر تزویج بین لایه‌ها حاصل می‌شود.

درنهایت، لایه‌های موجود در مراحل قبل بین دو لایه دی‌الکتریک با ضخامت h_1 قرار می‌گیرند. افزودن لایه عایق بیرونی تأثیر چندانی بر پهنای باند و مقدار Q ساختار ندارد. درواقع، قراردادن این لایه بیشتر نقش محافظت از لایه‌های طلا در سطح خارجی ساختار را بر عهده دارد [۳۶].

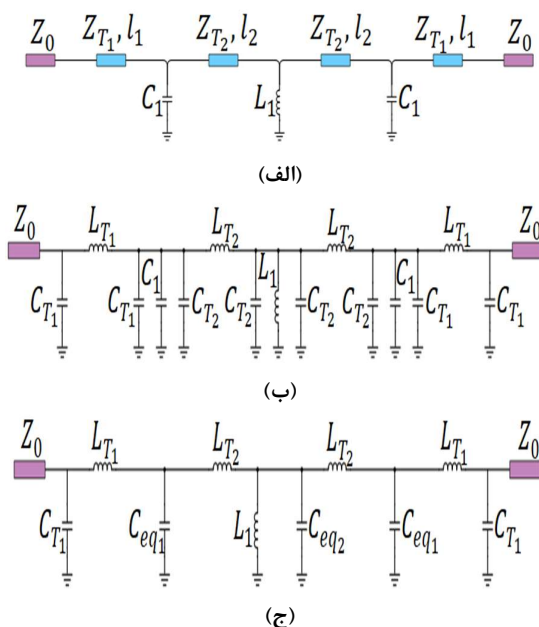
سلول واحد پیشنهادی دارای ماهیتی تناوبی می‌باشد و دوره تناوب آن در دو جهت x و y ، P است. شرایط مرزی به‌کاررفته در شبیه‌سازی این فیلتر، شرایط مرزی متناوب به‌همراه تحریک فلوکه بوده‌است. در شکل (۳) مشخصات مربوط به شبیه‌سازی ساختار به تفصیل ارائه گردیده‌است. لایه‌های فلزی به‌کاررفته در این ساختار از جنس طلا با مقدار هدایت الکتريکی S/m 4×10^7 (معادل با مقاومت سطحی $0.22 \Omega/square$) در باند عبور انتخاب شده‌اند. در شبیه‌سازی تمام موج، می‌توان از فلز تلفدار یا صفحه مقاومتی جهت مدل‌سازی لایه‌های طلا استفاده نمود که هر دو حالت، به نتایج مشابهی منجر خواهندشد. همچنین لایه‌های دی‌الکتریک از پلیمر به ضریب گذردهی نسبی $\epsilon_r = 2.35$ تشکیل شده‌اند که به‌دلیل نزدیک‌بودن مقدار امپدانس کلی ساختار به امپدانس فضای آزاد، تطبیق خوبی با فضای آزاد حاصل می‌گردد [۳۷]. باید اشاره نمود که برای عایق‌های پلیمری مقدار تلفات بسیار پایین است، به‌طوری‌که در مراجع میزان تلفات ذکر نمی‌شود. در این مقاله نیز میزان تانژانت تلفات لایه عایق صفر در نظر گرفته شده‌است که به‌دلیل پایین‌بودن تلفات، تفاوت چندانی در پاسخ ایجاد نمی‌شود [۳۶].

۳- استخراج مدارمعادل ساختار

ازآنجاکه ساختار فیلترهای فضایی به‌گونه‌ای است که شاید نتوان دید مناسبی از لحاظ شهودی یا عمل‌کرد فیلتری ساختار دریافت نمود، نیاز به وجود ابزاری چون مدار معادل ساختار به شدت احساس می‌شود. با استفاده از مدار معادل می‌توان رفتار فیلتر فضایی، تغییر پارامترهای هندسی، و تأثیر لایه‌های مختلف را به‌راحتی توجیه نمود. باتوجه‌به روند طراحی و فرض‌های درنظرگرفته‌شده، ساختاری متقارن با شرط همگن مؤثر طراحی شده‌است. این ساختار حساسیت کمی به جهت تابش امواج دارد و می‌توان برای آن، مدلی مداری براساس المان‌های فشرده استخراج نمود. مدل مداری کامل و بدون ساده‌سازی در حالت تابش عمودی، در شکل (۴-الف) نمایش داده شده‌است. لازم به ذکر است که مدل مداری برای زوایای تابشی غیر عمود نیز دارای شکل کلی مشابه با حالت عمود می‌باشد و تنها در مقادیر المان‌های مداری متفاوت هستند. اکنون به معرفی پارامترهای مداری به‌کاررفته در مدار معادل و ارتباط آن‌ها با بخش‌های مختلف ساختار شکل (۱) پرداخته می‌شود.

باتوجه‌به فاصله بین پچ‌های فلزی در لایه مکمل صلیبی شکل (۱)، خازن C_1 در شکل (۴-الف) نشان‌دهنده مدل مداری این لایه در بالا و پایین ساختار می‌باشد. به‌دلیل تقارن و یکسان‌بودن لایه‌های بالا و پایین، این خازن‌ها با موقعیت و مقادیر یکسان در مدار معادل قرار گرفته‌اند. لایه فلزی وسط به‌صورت یک سلف موازی تحت عنوان L_1 مدل می‌شود.

فرکانسی تراهرتز، رقم قابل قبولی است [۳۴]. به علاوه سرعت گروه نیز مشخصه‌ای از عمل کرد فیلتر است که باتوجه



شکل (۴): (الف) مدار معادل ابتدایی ساختار، (ب) مدل خط انتقالی مدار معادل قسمت الف، (ج) مدار معادل نهایی و ساده شده ساختار فیلتر پیشنهادی

جدول (۲): مقادیر ضریب کیفیت، ثابت توزیع و مقاومت نرمالیزه شده ورودی و خروجی [۳۹]

r	k_{12}	q	نوع فیلتر
۱	۰/۷۰۷۱	۱	Butterworth
۱	۰/۶۸۱۸	۱/۱۸۱۱	Chebyshev (0.01 dB)
۱	۰/۶۶۱۸	۱/۴۳۲۸	Chebyshev (0.1 dB)
۱	۰/۶۴۷۴	۱/۸۶۳۶	Chebyshev (0.5 dB)

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مدار معادل در شکل (۴-ج)

پارامترها	مقادیر (pH)	پارامترها	مقادیر (fF)
L_{T1}	۱	C_{T1}	۸/۳۷
L_{T2}	۴/۸	C_{eq1}	۱۲
L_I	۳/۳۸	C_{eq2}	۱/۸

به شیب نمودار پاشندگی قابل محاسبه است اما در مقایسه با فاکتور تأخیر گروه از اهمیت کمتری برخوردار است. بنابراین، برای کاربردهای فیلتری معمولاً تأخیر گروه گزارش می‌شود [۳۴].

در شکل (۶)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل مداری در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی تمام‌موج ساختار مشاهده می‌شود. تطابق مشاهده شده بین نتایج، نشان‌دهنده صحت پیاده‌سازی مدل مداری و مدل کردن صحیح قسمت‌های مختلف ساختار است. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت

خازن‌های حاصل از مدار معادل خط انتقال نیز از رابطه (۴) به دست می‌آیند:

$$C_{Ti} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r h_i}{2}, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

(ب) پس از محاسبه مقادیر خازن‌ها، مقدار سلف موازی L_1 از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 (C_1 - K_{2,3} \delta \sqrt{C_2 C_4})}, \quad (5)$$

که در این فرمول k بیان‌گر ضریب نرمالیزه شده توزیع بین هر طبقه است. مقادیر مربوط به k و q و r در جدول (۲) آورده شده است [۳۹]. این رابطه نیز با دانستن $L_1 C_1 = 1/\omega_0^2$ و در نظر گرفتن اثر توزیع بین لایه‌ها از رابطه (۳) نتیجه شده است.

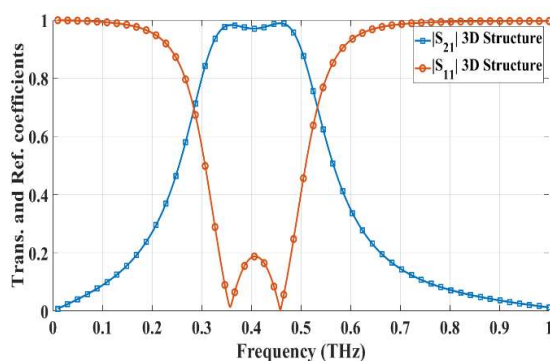
در نهایت مقدار سلف‌های ناشی از خطوط انتقال موجود از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$L_{Ti} = \mu_0 \mu_r h_i, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

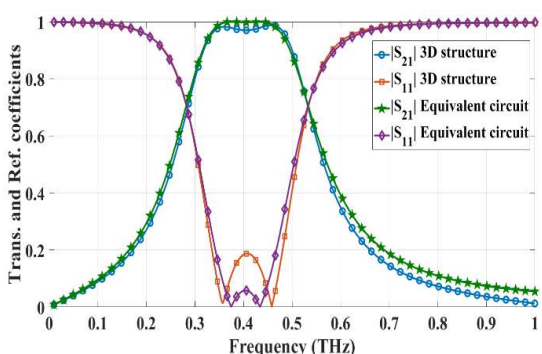
پس از معرفی روند بدست آوردن مقادیر تقریبی المان‌های مداری و محاسبه مقدار عددی پارامترها، این مقادیر به عنوان مقدار اولیه در بهینه‌ساز نرم افزار ADS (الگوریتم ژنتیک) به کار می‌روند. بهینه‌سازی با تعریف تابع هدف مناسب و با هدف رسیدن به بهترین پاسخ ممکن انجام می‌شود. لازم به ذکر است که منظور از بهترین پاسخ ممکن، منطبق‌ترین پاسخ با نتایج حاصل از شبیه‌سازی تمام موج است. بدین ترتیب، مقادیر نهایی مربوط به المان‌های مدار معادل به دست می‌آیند که در جدول (۳) بیان شده است.

۴- بررسی نتایج

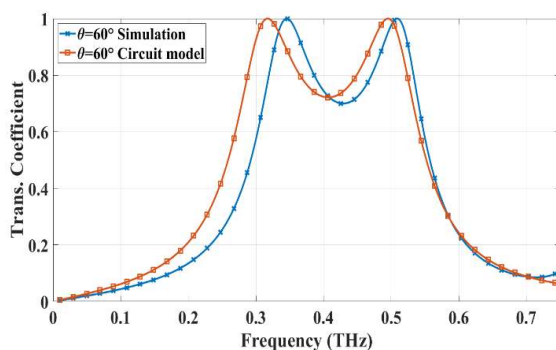
در این قسمت به بحث پیرامون نتایج مختلف ساختار پرداخته می‌شود. پارامترهای پراکندگی به دست آمده از شبیه‌سازی تمام موج ساختار در شکل (۵) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، فیلتر پیشنهادی دارای پهنای باند بسیار خوب ۶۰٪ است و از صافی بسیار خوبی در پهنای باند عبور بهره‌مند است. به علاوه، حداکثر ریبیل در باند عبور به مقدار ۰/۰۴ می‌رسد و بیشینه مقدار عبور تقریباً ۱ است. همچنین، میزان بازگشت موج از ساختار در پهنای باند عبور کمتر از ۰/۲ بوده که در مقایسه با کارهای گذشته میزان قابل قبولی است. علاوه بر باند عبور، در خارج از ناحیه گذر نیز فیلتر مورد نظر نتایج قابل قبولی دارد به طوری که میزان عبور در خارج از باند به مقدار کمتر از ۰/۱ می‌رسد و بازگشت موج در ناحیه خارج از باند عبور به مقدار حداکثر ۱ می‌رسد. همچنین باید اضافه کرد که باتوجه به کاربرد فیلتر طراحی شده که برای طیف‌سنجی و تصویربرداری مدنظر است، بررسی نمودار فاز انتقال، ضرورت چندانی ندارد [۳۴]. شایان ذکر است که تأخیر گروه برای این فیلتر در محدوده پیکوتانیه است که این رقم برای یک فیلتر در محدوده



شکل (۵): ضرایب انتقال و بازگشت مربوط به فیلتر طراحی شده



شکل (۶): مقایسه نتایج مربوط به مدل مداری و شبیه سازی تمام موج ساختار پیشنهادی



شکل (۷): مقایسه نتایج مربوط به مدل مداری و شبیه سازی تمام موج در حالت زاویه تابش ۶۰ درجه

جدول (۴): مقادیر پارامترهای مدار معادل در شکل (۴-ج) در حالت زاویه

تابش ۶۰ درجه

پارامترها	مقادیر (pH)	پارامترها	مقادیر (fF)
L_{T1}	۱۵/۳	C_{T1}	۲/۶
L_{T2}	۳/۳	C_{eq1}	۳۳/۱
L_I	۲/۱	C_{eq2}	۳۰

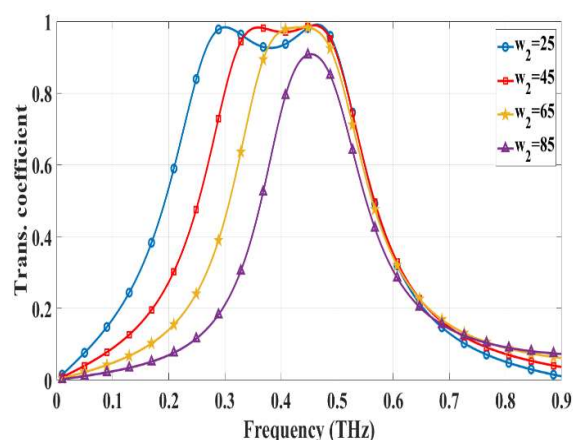
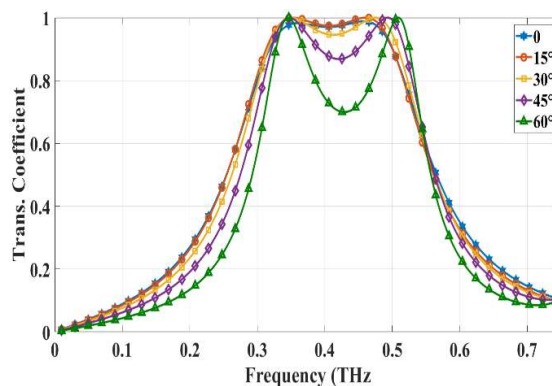
که الگوریتم موردنظر عمل کرد مناسبی جهت یافتن مقدار عددی پارامترهای مدل مداری داشته است.

همان طور که در قسمت قبل ذکر شد، مدار معادل در حالت تابش مایل تنها در مقدار المان های مداری متفاوت خواهد بود که برای اثبات این ادعا، شکل (۷) آورده شده است. این شکل نشان دهنده پارامتر انتقال ساختار در زاویه ۶۰ درجه در دو حالت شبیه سازی تمام موج و مدل مداری است. همان طور که مشاهده می شود، دو نمودار نزدیکی خوبی دارند و تفاوت موجود بین دو نمودار، ناشی از دقت در یافتن مقادیر المان های مداری است. مقادیر عناصر در زاویه ۶۰ درجه در جدول (۴) آورده شده است.

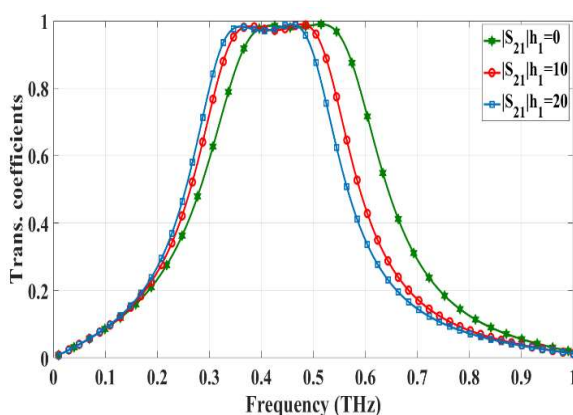
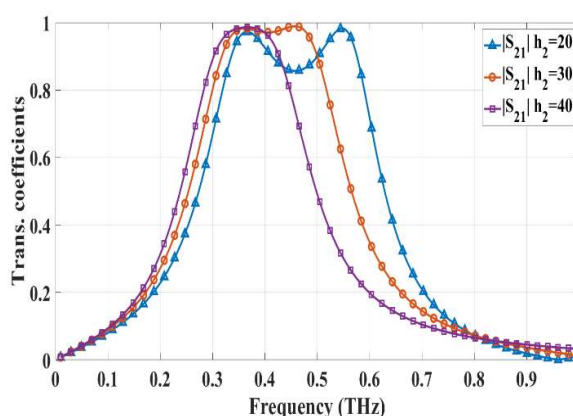
پس از بررسی نتایج مربوط به مدل مداری، حال به بررسی میزان حساسیت ساختار پیشنهادی نسبت به زاویه تابش موج پرداخته می شود. در شکل (۸)، نمودارهای عبور برای زوایای ۰ تا ۶۰ درجه رسم شده است. در سایر مقالات این بررسی تا زاویه ۴۵ درجه بررسی شده است آن که در این مقاله نشان داده شده است که ساختار تا زاویه ۶۰ درجه نیز از پایداری مناسبی برخوردار است. مشاهده می شود که مقدار عبور در پیک های فرکانسی ثابت بوده و تنها میزان صافی در باند عبور کاهش می یابد که در بیش ترین زاویه، به حداقل مقدار ۰/۷ رسیده است. بنابراین، عبور این فیلتر به ازای زوایای تابش مختلف قابل قبول است. همچنین پهنای باند فیلتر به ازای زوایای تابش مختلف تغییر چشم گیری نداشته است.

بررسی تأثیر تغییر پارامترهای هندسی و توصیف رفتار آن ها با استفاده از مدل مداری ارائه شده از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهای تأثیرگذار در طراحی ساختار پیشنهادی، پارامترهای w_2 و w_1 هستند. در شکل (۹) نتایج حاصل از تغییرات w_1 مشاهده می شود. هر چه مقدار این پارامتر افزایش می یابد، فاصله پچ های فلزی نسبت به هم افزایش خواهد یافت که در نتیجه این عمل، تمرکز میدان های الکتریکی بین دو پچ فلزی کمتر شده و بر طبق مدل مداری ظرفیت خازنی کم می شود. بنابراین طبق رابطه $f_c = 1/\sqrt{LC}$ ، فرکانس رزونانس دوم به سمت فرکانس های بالا شیفت پیدا می کند. در ضمن با افزایش میزان w_1 ، میزان پهنای باند نیز افزایش می یابد [۴۰].

در شکل (۱۰) نتایج حاصل از تغییرات w_2 آورده شده است که با دقت در نتایج می توان دریافت که با افزایش مقدار w_2 ، عرض صلیب افزایش می یابد. این امر باعث کم شدن مسیر جریان و بنابراین کاهش میزان سلف ایجاد شده در اثر لایه صلیبی شکل می شود. در نتیجه، فرکانس رزونانس اول طبق رابطه $f_c = 1/\sqrt{LC}$ افزایش می یابد. ضمناً در این حالت با تأثیر تغییر مقدار سلف، پهنای باند ساختار کاهش چشم گیری پیدا می کند [۴۰].

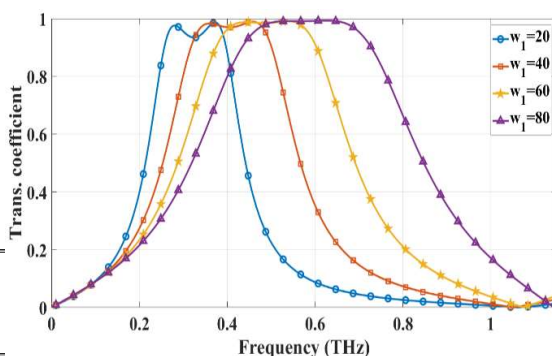

 شکل (۱۰): ضریب انتقال به ازای مقادیر متفاوت پارامتر w_2


شکل (۸): ضریب انتقال به ازای زوایای تابش متفاوت


 شکل (۱۱): ضریب انتقال به ازای مقادیر مختلف پارامتر h_1

 شکل (۱۲): ضریب انتقال به ازای مقادیر مختلف پارامتر h_2

نتایج پارامتر انتقال برای تغییر ضخامت عایق‌ها در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) آورده شده‌است. در شکل (۱۱) تأثیر عدم وجود لایه عایق با ضخامت h_1 و همچنین تأثیر ضخامت‌های مختلفی از این لایه بر پارامتر انتقال ساختار بررسی شده‌است. با دقت در شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت این لایه سبب کاهش اندکی در پهنای باند و مقدار Q ساختار شده‌است. می‌توان چنین بیان کرد که افزایش ضخامت این لایه سبب افزایش مقدار خازن C_{T1} شده‌است که در پی این افزایش، پهنای باند نیز کاهش یافته‌است. اما در شکل (۱۲) نتایج پارامتر انتقال به ازای مقادیر مختلف ضخامت لایه h_2 آورده شده‌است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت تغییرات پهنای باند با شدت بیشتری انجام می‌شود. دلیل این موضوع این است که با افزایش ضخامت لایه عایق، مقدار ظرفیت خازنی حاصل از این لایه افزایش می‌یابد. به سبب این افزایش، پهنای باند کاهش یافته‌است.

در جدول (۵) دستاوردهای به دست آمده از کار انجام شده در مقایسه با کارهای پیشین آورده شده‌است. در این جدول تمامی مشخصه‌های کارهای پیشین اعم از نوع لایه عایق و مشخصات مربوطه و همچنین ابعاد ساختار به همراه ویژگی‌های عملکردی ساختارهای گذشته گنجانده شده‌است تا مقایسه بهتری بین ساختار پیشنهادی و کارهای انجام شده صورت گیرد. نتایج موجود در جدول حاکی از بهبود پارامترهای فیلتری در این ساختار نسبت به ساختارهای دیگر است.


 شکل (۹): ضریب انتقال به ازای مقادیر متفاوت پارامتر w_1

جدول (۵): مقایسه ساختار پیشنهادی با مقالات پیشین				
مرجع	پهنای باند - فرکانس مرکزی (تراهرتز)	ابعاد ($\mu m \times \mu m \times \mu m$) Dielectric ($\tan \delta$) (ϵ_r)	تلفات در باند عبور	بازگشت در باند عبور
[۳۶]	۴۵٪ - (۰/۴۲)	$130 \times 130 \times 130$ PDMS (تلفات کم) (۲/۳۵)	۰/۳	کمتر از ۰/۲

- [7] T. Kleine-Ostmann and T. Nagatsuma, "A review on terahertz communications research," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 32, no. 2, pp. 143–171, 2011.
- [8] J. Federici and L. Moeller, "Review of terahertz and subterahertz wireless communications," *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 11, p. 6, 2010.
- [9] M. Dragoman, A. A. Muller, D. Dragoman, F. Coccetti, Plana, and R., "Terahertz antenna based on graphene," *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 10, p. 104313, 2010.
- [10] M. Tamagnone, J. S. Gomez-Diaz, J. R. Mosig, and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack," *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 21, p. 214102, 2012.
- [11] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization," *Optics express*, vol. 16, no. 10, pp. 7181–7188, 2008.
- [12] Y. Zhang, T. Li, B. Zeng, H. Zhang, H. Lv, X. Huang, W. Zhang, A. K. Azad, "A graphene based tunable terahertz sensor with double Fano resonances," *Nanoscale*, vol. 7, no. 29, pp. 12682–12688, 2015.
- [13] F. Miyamaru, S. Hayashi, C. Otani, K. Kawase, Y. Ogawa, H. Yoshida, E. Kato, "Terahertz surface-wave resonant sensor with a metal hole array," *Optics letters*, vol. 31, no. 8, pp. 1118–1120, 2006.
- [14] R. Mendis, A. Nag, F. Chen, and D. M. Mittleman, "A tunable universal terahertz filter using artificial dielectrics based on parallel-plate waveguides," *Applied physics letters*, vol. 97, no. 13, p. 131106, 2010.
- [15] D. Correias-Serrano, J. S. Gomez-Diaz, J. Perruisseau-Carrier, and A. Alvarez-Melcon, "Graphene-based plasmonic tunable low-pass filters in the terahertz band," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 13, no. 6, pp. 1145–1153, 2014.
- [16] C.-Y. Chen, C.-L. Pan, C.-F. Hsieh, Y.-F. Lin, and R.-P. Pan, "Liquid-crystal-based terahertz tunable Lyot filter," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 10, p. 101107, 2006.
- [17] M. Lu, W. Li, and E. R. Brown, "Second-order bandpass terahertz filter achieved by multilayer complementary metamaterial structures," *Optics letters*, vol. 36, no. 7, pp. 1071–1073, 2011.
- [18] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [19] M. Gil, J. Bonache, and F. Martin, "Metamaterial filters: A review," *Metamaterials*, vol. 2, no. 4, pp. 186–197, 2008.
- [20] B. A. Munk, *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [21] E. Zareian-Jahromi and J. Khalilpour, "Analysis of a freestanding frequency selective surface loaded with a nonlinear element," *Journal of Electromagnetic Waves and Appl.*, vol. 25, pp. 247–255, 2011.
- [22] H. Butt, Q. Dai, P. Farah, T. Butler, T. D. Wilkinson, J. J. Baumberg, G. A. J. Amaratunga, "Metamaterial high pass filter based on periodic wire arrays of multiwalled carbon nanotubes," *Applied physics letters*, vol. 97, no. 16, p. 163102, 2010.
- [23] X. Li, L. Yang, C. Hu, X. Luo, and M. Hong, "Tunable bandwidth of band-stop filter by metamaterial cell coupling in optical frequency," *Optics express*, vol. 19, no. 6, pp. 5283–5289, 2011.
- [24] J.-C. Zhang, Y.-Z. Yin, and J.-P. Ma, "Design of narrow band-pass frequency selective surfaces for millimeter wave applications," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 96, pp. 287–298, 2009.
- [25] F. Lan, Z. Yang, L. Qi, X. Gao, and Z. Shi, "Terahertz dual-resonance bandpass filter using bilayer reformative complementary metamaterial structures," *Optics letters*, vol. 39, no. 7, pp. 1709–1712, 2014.
- [26] N. R. Han, Z. C. Chen, C. S. Lim, B. Ng, and M. H. Hong, "Broadband multi-layer terahertz metamaterials fabrication and characterization on flexible substrates," *Optics express*, vol. 19, no. 8, pp. 6990–6998, 2011.
- [27] M. A. Al-Joumayly and N. Behdad, "A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 12, pp. 4033–4041, 2010.

-	۰/۱	۳۱۰×۳۱۰×۱۳۰ Tin foil(۰/۰۰۲)(۲/۸)	(۱/۰۵) - ۴۴٪	[۳۲]
کمتر از ۰/۶	۰/۱۵	۹۰×۹۰×۲۳۰ quartz(تلفات کم)(۳/۷۶)	(۰/۲۵) - ۲۲٪	[۱۷]
۰/۳	۰/۳	۹۵×۹۵×۴۳ Teijin(۰/۰۵)(۲/۸۹)	(۱/۲۵) - ۴۰٪	[۴۱]
کمتر از ۰/۲	۰/۰۵	۱۷۰×۱۷۰×۱۰۳ PDMS(تلفات کم)(۲/۳۵)	(۰/۴) - ۶۰٪	ساختار پیشنهادی

۵- نتیجه

در این مقاله، یک ساختار فراماده به عنوان فیلتر پهن باند میان گذر در محدوده فرکانسی تراهرتز طراحی شده است که قابلیت فیلتر کردن مطلوبی در پهنای باند ذکر شده دارد. به دلیل وجود تقارن، ساختار نسبت به زوایای تابشی (۰-۶۰ درجه) و پلاریزاسیون موج تابشی، حساسیت پایینی دارد. به علاوه، مدل مداری معادل فیلتر پیشنهادی استخراج شده است که نتایج آن، همخوانی مناسبی با نتایج شبیه سازی تمام موج دارد. فیلتر طراحی شده دارای پهنای باند نسبی ۶۰٪ در محدوده فرکانسی ۰/۱-۱ تراهرتز است و از حداکثر صافی بسیار خوبی در باند عبور برخوردار است. همچنین، میزان عبور در خارج از باند عبور به کمتر از مقدار ۰/۲ می رسد که برای کاربرد فیلتری مطلوب است. روش استخراج مدار معادل به همراه پارامترها، مورد بحث و بررسی قرار گرفته و مدل مداری مناسبی برای ساختار، ارائه شده است. صحت مدل مداری استخراج شده به کمک تطابق بسیار خوب نتایج حاصله با نتایج بدست آمده از شبیه سازی تمام موج نشان داده شده است. جهت اطمینان بیشتر از صحت مدل مداری استخراج شده، اثرات ناشی از تغییر پارامترهای هندسی ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که نشان داده شده است، می توان توجه مناسبی برای نتایج حاصله براساس مدل مداری بیان نمود.

مراجع

- [1] J. C. Wiltse, "History of millimeter and submillimeter waves," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1118–1127, 1984.
- [2] D. Dragoman and M. Dragoman, "Terahertz fields and applications," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 1–66, 2004.
- [3] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Optics express*, vol. 11, no. 20, pp. 2549–2554, 2003.
- [4] D. M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani, R. G. Baraniuk, J. V. Rudd, and M. Koch, "Recent advances in terahertz imaging," *Applied Physics B*, vol. 68, no. 6, pp. 1085–1094, 1999.
- [۵] سجاد راستی، سامیه مطلوب، علی رستمی، مدل سازی و امکان سنجی شناسایی ریزگردهای آلاینده هوا مبتنی بر طیف سنجی تراهرتز در حوزه زمان، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، صفحات ۱۳۹۶، ۱۴۳۰-۱۴۲۱
- [6] Y. C. Shen, T. Lo, P. F. Taday, B. E. Cole, W. R. Tribe, and M. C. Kemp, "Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 24, p. 241116, 2005.

- International Conference of the IEEE*, vol. 1, pp. 1302–1305, 2004.
- [34] C. Winnewisser, F. Lewen, and H. Helm, "Transmission characteristics of dichroic filters measured by THz time-domain spectroscopy," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 66, no. 6, pp. 593–598, 1998.
- [35] K.-E. Peiponen, A. Zeitler, and M. Kuwata-Gonokami, *Terahertz spectroscopy and imaging*, vol. 171. Springer, 2012.
- [36] A. Ebrahimi, S. Nirantar, W. Withayachumnankul, M. Bhaskaran, S. Sriram, S. Al-Sarawi, D. Abbott, "Second-order terahertz bandpass frequency selective surface with miniaturized elements," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 761–769, 2015.
- [37] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons, 1999.
- [38] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [39] A. I. Zverev, *Handbook of filter synthesis*. Wiley, 1967.
- [40] R. F. Harrington, *Time-harmonic electromagnetic fields*. McGraw-Hill, 1961.
- [41] Y.-J. Chiang, C.-S. Yang, Y.-H. Yang, C.-L. Pan, and T.-J. Yen, "An ultrabroad terahertz bandpass filter based on multiple-resonance excitation of a composite metamaterial," *Applied Physics Letters*, vol. 99, no. 19, p. 191909, 2011.
- [28] K. Sarabandi and N. Behdad, "A frequency selective surface with miniaturized elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 5, pp. 1239–1245, 2007.
- [۲۹] فرهاد خسروی افوسی، محمدنقی آذرمنش، جواد نورینیا، به کارگیری ساختارهای EBG به منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویته آنتن میکرواستریپ، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحات ۸–۱، ۱۳۹۲
- [30] M. Salehi and N. Behdad, "A second-order dual X-/Ka-band frequency selective surface," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 785–787, 2008.
- [31] X.-D. Hu, X.-L. Zhou, L.-S. Wu, L. Zhou, and W.-Y. Yin, "A miniaturized dual-band frequency selective surface (FSS) with closed loop and its complementary pattern," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1374–1377, 2009.
- [32] J.-S. Li, Y. Li, and L. Zhang, "Terahertz Bandpass Filter Based on Frequency Selective Surface," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 3, pp. 238–241, 2018.
- [33] K. Humphreys, J. P. Loughran, M. Gradziel, W. Lanigan, T. Ward, J. A. Murphy, and C. O'sullivan, "Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering," *26th Annual*