

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 به علاوه، دامنه موج عبوری بالایی با حدکثر صافی فوق‌العاده‌ای در مقایسه با کارهای پیشین به دست آمده است. همچنین، مدار معادل این ساختار استخراج شده است. مقایسه انجام‌شده بین مدل مداری و شبیه‌سازی تمام موج، بیانگر تطابق خوب نتایج به دست آمده است. به علاوه، 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 ترانزیت یکی از مباحث پرطرفدار در رشته‌های فیزیک و موج و میدان به شمار می‌رود که پیشرفت‌های چشم‌گیر اخیر، شاهی بر این موضوع است [۲۰]. امواج ترانزیت که در محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ ترانزیت 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 فرایه‌بند [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 ترانزیت [۹، ۱۰]، جاذب [۱۱]، حسگر [۱۳، ۱۲] و فیلتر [۱۴] اشاره نمود.

فیلترها از جمله ابزارهای پرکاربرد در زمینه مخابرات به شمار می‌روند. فیلترهای مورد استفاده در محدوده فرکانسی ترانزیت 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 ترانزیت 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 ترانزیت داشته‌اند، به‌طوری‌که از این ساختارها در طراحی فیلترهای فضایی که از مهم‌ترین ابزارهای حوزه ترانزیت 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 ترانزیت 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 $\lambda/4$ 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 [۲۸، ۲۷]. با توجه به دو شرط بالا ساختاری چندلایه با الگوهایی متقارن که ابعادی در حد $\lambda/4$ کوچک‌تر دارد، مد نظر است.

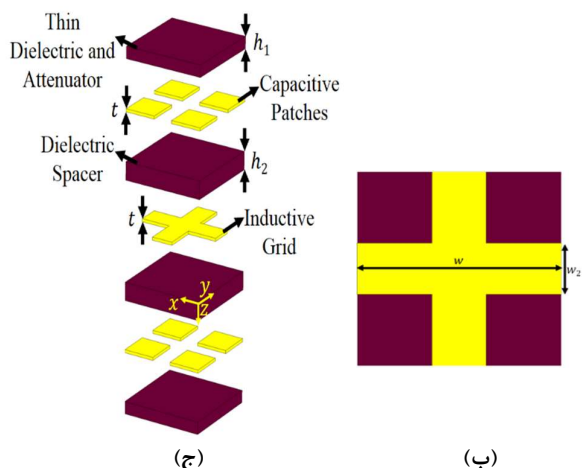
در سال‌های اخیر کاربردهای گوناگونی از ساختارهای سطوح فرکانس‌گزین در محدوده فرکانسی گیگاهرتز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌است [۲۹]. همچنین، فیلترهای فضایی بسیاری با توجه به شرایط

ذکرشده، در محدوده فرکانسی میکروویو طراحی و پیشنهاد شده‌است [۳۱، ۳۰، ۲۸]. اما تعداد این کارها برای محدوده فرکانسی ترانزیت ناچیز است و هنوز زوایای پنهانی از این ساختارها در محدوده فرکانسی ترانزیت 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 ترانزیت 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 [۳۵، ۳۴]. 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 ترانزیت 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.

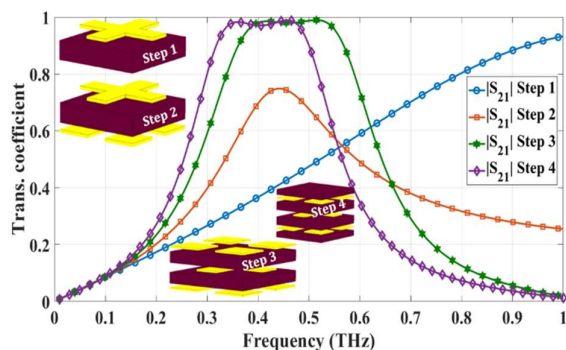


شکل (۱): (الف) نمای دوبعدی لایه پیچ خازنی (ب) نمای دوبعدی لایه شبکه سلفی (ج) نمای سه بعدی کلی ساختار و طرز قرارگرفتن لایه‌ها

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 عمل کرد ساختار، مکمل لایه صلیبی شکل در زیر ساختار اولیه قرار داده می‌شود. با افزایش تعداد لایه‌ها تعداد المان‌های راکتیو موجود در ساختار افزایش می‌یابد که سبب ایجاد یک رزونانس در حوالی فرکانس 0.45 THz می‌شود. با افزایش درجه آزادی ساختار، می‌توان فرکانس‌های قطع بالا و پایین را با تغییر ابعاد لایه‌های موجود کنترل نمود. این مساله، به کمک شبیه‌سازی پارامتری ساختار، بررسی شده و بهترین مقادیر جهت پارامترهای مداری، انتخاب شده‌اند. در مرحله سوم، یک لایه مکمل صلیبی دیگر در بالای لایه صلیبی با فاصله h_2 (شکل (۲)) قرار می‌گیرد. حضور این لایه سبب بهبود صافی باند ضریب عبور ساختار و همچنین افزایش میزان عبور می‌شود. بدین‌وسیله، مشخصات فیلتر پیشنهادی در خارج از باند عبور نیز بهبود می‌یابد و ضریب کیفیت ساختار اصلاح می‌گردد.



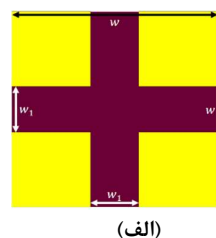
شکل (۲): ضریب انتقال برای مراحل تکاملی ساختار براساس ابعاد ذکر شده در جدول (۱)

۲- مراحل طراحی فیلتر پیشنهادی

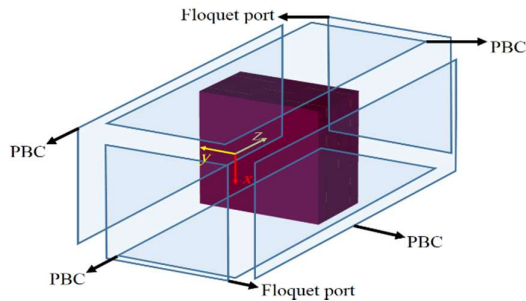
الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دلیل زمان‌بر بودن و عدم تضمین حصول بهترین پاسخ، دارای معایبی هستند. به‌علاوه با تغییر مشخصات فیلتر دلخواه، الگوریتم بهینه‌سازی را باید مجدداً اجرا نمود. جهت از بین بردن این معایب، نقطه شروع اولیه در بهینه‌سازی بسیار مهم است. بدین‌منظور در ابتدا، به مطالعه سلول واحد‌های مختلف پرداخته می‌شود و عمل کرد آن‌ها بررسی می‌شود. 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 می‌کند که p تناوب ساختار و λ_g طول موج فرکانس مرکزی پاسخ مورد نظر است. سپس، با ترکیب مناسب سلول‌های واحد، تقریبی از ساختار نهایی را به دست آورده می‌شود که به‌عنوان نقطه شروع در الگوریتم بهینه‌سازی وارد می‌شود. با بهینه‌سازی ابعاد این ساختار، نتیجه نهایی حاصل می‌شود. از مزایای این روش نسبت به بهینه‌سازی مطلق ساختار بدون حدس اولیه مناسب، می‌توان به این موارد اشاره نمود: زمان کمتر پردازش الگوریتم، تضمین حصول پاسخ مناسب، و قابلیت تعمیم به ساختارهای فیلتری دیگر به دلیل توجیحات فیزیکی فراهم شده. در پایان پس از مشخص شدن ابعاد کلی ساختار، با در نظر گرفتن پاسخ فرکانسی موردنظر، ضخامت مناسب با استفاده از جست‌وجوی فرکانسی به دست می‌آید.

سلول واحد فیلتر پیشنهادی، متشکل از سه لایه فلزی است که به‌وسیله لایه‌های دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند. لایه فلزی وسط یک مدل صلیبی شکل است که به‌وسیله دو لایه دی‌الکتریک در بالا و پایین از لایه‌های فلزی دیگر جدا شده‌است. دو لایه فلزی مشابه بالا و پایین، مکمل لایه صلیب هستند. علاوه بر لایه‌های دی‌الکتریک جداکننده، دو لایه دی‌الکتریک دیگر به‌منظور ایجاد تضعیف موردنظر در خارج از باند عبور، در بالا و پایین ساختار قرار گرفته‌اند. نمای سه‌بعدی و دوبعدی ساختار پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده‌است. مقادیر عددی پارامترهای مربوط به این ساختار که پس از بهینه‌سازی حاصل شده، در جدول (۱) آورده شده‌است.

روال طراحی تکاملی مرحله به مرحله فیلتر موردنظر به‌همراه نمودارهای مربوط به هر مرحله، در شکل (۲) آورده شده‌است. در مرحله اول، یک لایه دی‌الکتریک به‌همراه لایه صلیبی شکل در نظر گرفته شده‌است. با توجه به نتایج شکل (۲)، یک صفر انتقال در فرکانس‌های پایین تحت‌تأثیر خاصیت سلفی لایه صلیبی ایجاد شده‌است.



(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 الکتریکی نسبی ماده دی‌الکتریک است [۳۸]. ظرفیت سلفی و خازنی این لایه‌ها براساس روابط (۲ و ۱) قابل محاسبه می‌باشند [۲۷].

$$L_T = \mu_0 \mu_r h \quad (1)$$

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

در این رابطه $\mu_0 \mu_r$ بیانگر ثابت نفوذپذیری مغناطیسی ماده دی‌الکتریک است. همچنین، $\epsilon_0 \epsilon_r$ نشان‌دهنده ثابت گذردهی الکتریکی ماده دی‌الکتریک هستند. باتوجه‌به مطالب ذکرشده و مدل‌های مداری ارائه‌شده برای هر قسمت از ساختار و ساده‌سازی‌های در نظر گرفته‌شده، می‌توان در نهایت 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:

$$C_1 = \frac{q_1}{\omega_0 r_1 Z_0 \delta'} \quad (3)$$

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 در نظر گرفتن اثر تزویج بین لایه‌ها حاصل می‌شود.

در نهایت، 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. در واقع، قراردادن این لایه بیشتر نقش محافظت از لایه‌های طلا در سطح خارجی ساختار را بر عهده دارد [۳۶].

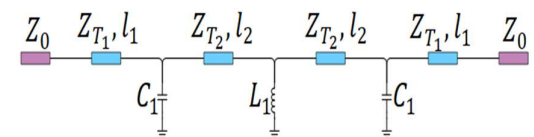
سلول واحد پیشنهادی دارای ماهیتی تناوبی می‌باشد و دوره تناوب آن در دو جهت x و y است. شرایط مرزی به‌کاررفته در شبیه‌سازی این فیلتر، شرایط مرزی متناوب به‌همراه تحریک فلوکه بوده‌است. در شکل (۳) مشخصات مربوط به شبیه‌سازی ساختار به تفصیل ارائه گردیده‌است. لایه‌های فلزی به‌کاررفته در این ساختار از جنس طلا با مقدار هدایت الکتریکی S/m $4/1 \times 10^7$ (معادل با مقاومت سطحی $0.2 + j0.22 \Omega/square$) 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 خواهند شد. 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 مدار معادل ساختار

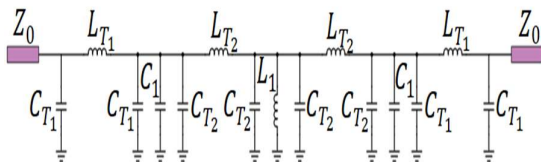
از آنجاکه ساختار فیلترهای فضایی به‌گونه‌ای است که شاید نتوان دید مناسبی از لحاظ شهودی یا عمل‌کرد فیلتری ساختار دریافت نمود، نیاز به وجود ابزاری چون مدار معادل ساختار به شدت احساس می‌شود. با استفاده از مدار معادل می‌توان رفتار فیلتر فضایی، تغییر پارامترهای هندسی، و تأثیر لایه‌های مختلف را به‌راحتی توجیه نمود. باتوجه‌به روند طراحی و فرض‌های در نظر گرفته‌شده، 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 پیچ‌های 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.

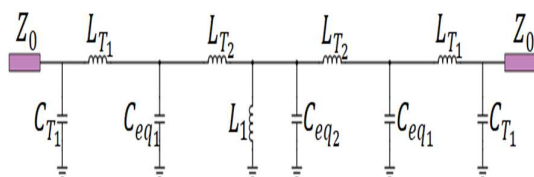
فرکانسی تراهرتز، رقم قابل قبولی است [۳۴]. به علاوه سرعت گروه نیز مشخصه‌ای از عمل کرد فیلتر است که با توجه



(الف)



(ب)



(ج)

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 تزویج 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:

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

(ب) پس از محاسبه مقادیر خازن‌ها، مقدار سلف موازی L₁ 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 تزویج بین هر طبقه است. مقادیر مربوط به k و q در جدول (۲) آورده شده است [۳۹]. این رابطه نیز با دانستن L₁ C₁ = 1/ω₀² و در نظر گرفتن اثر تزویج بین لایه‌ها از رابطه (۳) نتیجه شده است.

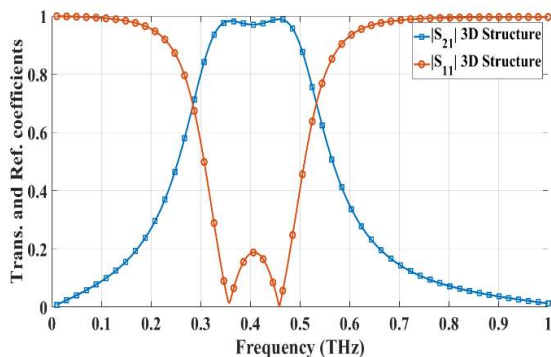
در نهایت مقدار سلف‌های ناشی از خطوط انتقال موجود از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

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

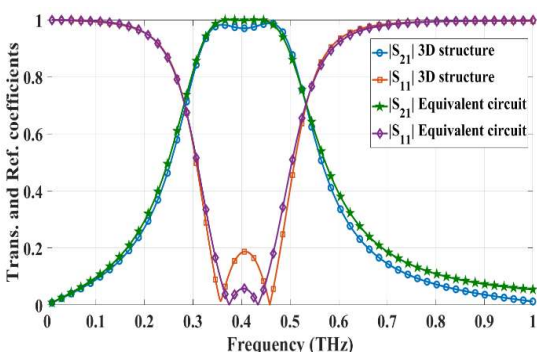
پس از معرفی روند بدست آوردن مقادیر تقریبی المان‌های مداری و محاسبه مقدار عددی پارامترها، این مقادیر به عنوان مقدار اولیه در بهینه‌ساز نرم افزار ADS (الگوریتم ژنتیک) به کار می‌روند. بهینه‌سازی با تعریف تابع هدف مناسب و با هدف رسیدن به بهترین پاسخ ممکن انجام می‌شود. لازم به ذکر است که منظور از بهترین پاسخ 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

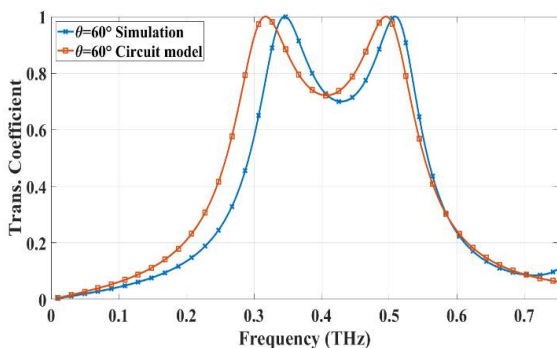
در این قسمت به بحث پیرامون نتایج مختلف ساختار پرداخته می‌شود. پارامترهای پراکندگی به دست آمده از شبیه‌سازی تمام موج ساختار در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فیلتر پیشنهادی دارای پهنای باند بسیار خوب ۶۰٪ است و از صافی بسیار خوبی در پهنای باند عبور بهره‌مند است. به علاوه، حداکثر 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 با توجه 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 شبیه‌سازی تمام موج ساختار پیشنهادی



شکل (۷): مقایسه نتایج مربوط به مدل مداری و شبیه‌سازی 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_1	۲/۱	C_{eq2}	۳۰

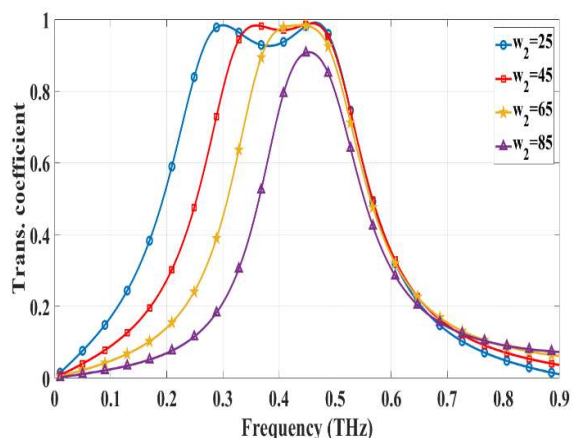
که الگوریتم موردنظر عمل کرد مناسبی جهت یافتن مقدار عددی پارامترهای مدل مداری داشته‌است.

همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد، مدار معادل در حالت تابش مایل تنها در مقدار المان‌های مداری متفاوت خواهد بود که برای اثبات این ادعا، شکل (۷) آورده شده‌است. این شکل نشان‌دهنده پارامتر انتقال ساختار در زاویه ۶۰ درجه در دو حالت شبیه‌سازی تمام موج و مدل مداری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو نمودار نزدیکی خوبی دارند و تفاوت موجود بین دو نمودار، ناشی از دقت در یافتن مقادیر المان‌های مداری است. مقادیر عناصر در زاویه ۶۰ درجه در جدول (۴) آورده شده‌است.

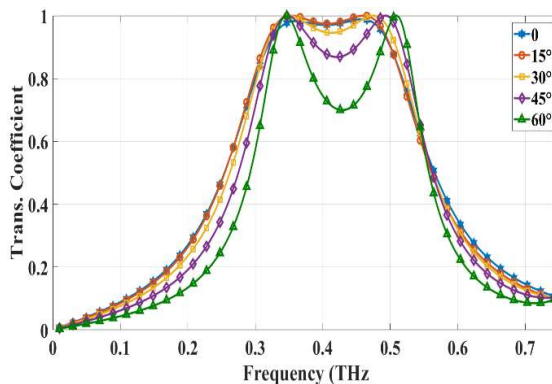
پس از بررسی نتایج مربوط به مدل مداری، حال به بررسی میزان حساسیت ساختار پیشنهادی نسبت به زاویه تابش موج پرداخته می‌شود. در شکل (۸)، نمودارهای عبور برای زوایای ۰ تا ۶۰ درجه رسم شده‌است. در سایر مقالات این بررسی تا زاویه ۴۵ درجه بررسی شده‌است. آن‌که در این مقاله نشان داده شده‌است که ساختار تا زاویه ۶۰ درجه نیز از پایداری مناسبی برخوردار است. مشاهده می‌شود که مقدار عبور در پیک‌های فرکانسی ثابت بوده و تنها میزان صافی در باند عبور کاهش می‌یابد که در بیش‌ترین زاویه، به حداقل مقدار ۰/۷ رسیده‌است. بنابراین، عبور این فیلتر به‌ازای زوایای تابش مختلف قابل قبول است. همچنین پهنای باند فیلتر به‌ازای زوایای تابش مختلف تغییر چشم‌گیری نداشته‌است.

بررسی تأثیر تغییر پارامترهای هندسی و توصیف رفتار آن‌ها با استفاده از مدل مداری ارائه‌شده 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 می‌شود. هر چه مقدار این پارامتر افزایش می‌یابد، فاصله پج‌های فلزی نسبت به هم افزایش خواهد یافت که در نتیجه این عمل، تمرکز میدان‌های الکتریکی بین دو پج فلزی کم‌تر شده و بر طبق مدل مداری ظرفیت خازنی کم می‌شود. بنابراین طبق رابطه $f_c = 1/\sqrt{LC}$ ، فرکانس رزونانس دوم به سمت فرکانس‌های بالا شیفت پیدا می‌کند. در ضمن با افزایش میزان w_1 ، میزان پهنای باند نیز افزایش می‌یابد [۴۰].

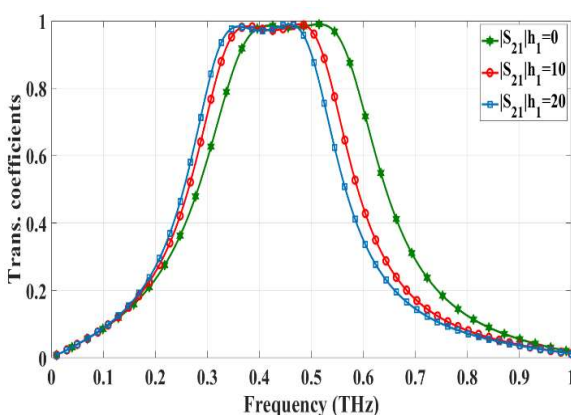
در شکل (۱۰) نتایج حاصل از تغییرات w_2 آورده شده‌است که با دقت در نتایج می‌توان دریافت که با افزایش مقدار w_2 ، عرض صلیب افزایش می‌یابد. این امر باعث کم‌شدن مسیر جریان و بنابراین کاهش میزان سلف ایجادشده در اثر لایه صلیبی شکل می‌شود. در نتیجه، فرکانس رزونانس اول طبق رابطه $f_c = 1/\sqrt{LC}$ افزایش می‌یابد. ضمناً در این حالت با تأثیر تغییر مقدار سلف، پهنای باند ساختار کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند [۴۰].



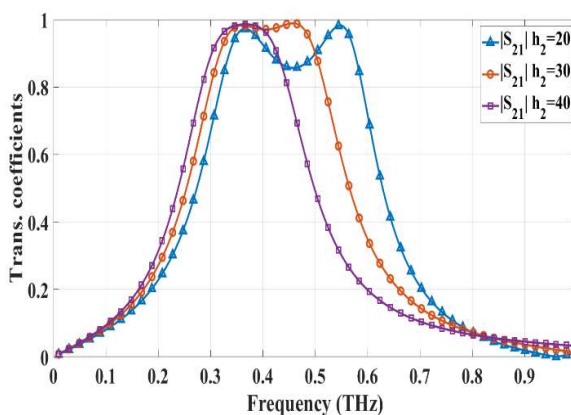
شکل (۱۰): ضریب انتقال به‌ازای مقادیر متفاوت پارامتر w_2



شکل (۸): ضریب انتقال به‌ازای زوای تابش متفاوت



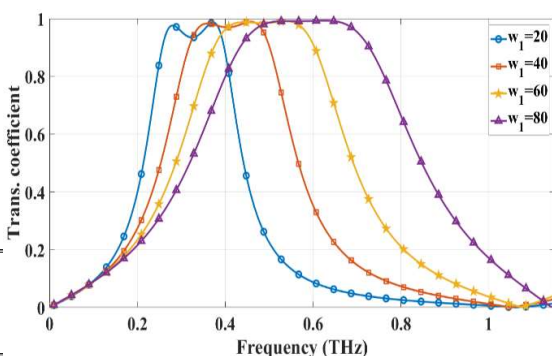
شکل (۱۱): ضریب انتقال به‌ازای مقادیر مختلف پارامتر h_1



شکل (۱۲): ضریب انتقال به‌ازای 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 به‌ازای 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 به‌دست‌آمده از کار انجام‌شده 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 انجام‌شده صورت گیرد. نتایج موجود در جدول حاکی از بهبود پارامترهای فیلتری در این ساختار نسبت به ساختارهای دیگر است.



شکل (۹): ضریب انتقال به‌ازای مقادیر متفاوت پارامتر w_1

جدول (۵): مقایسه ساختار پیشنهادی با مقالات پیشین

مرجع	پهنای باند - فرکانس مرکزی (تراهرتز)	ابعاد ($\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$) Dielectric ($\tan\delta$) (ϵ_r)	تلفات در باند عبور	بازگشت در باند عبور
[۳۶]	۴۵٪ - (۰/۴۲)	۱۳۰ × ۱۳۰ × ۱۳۰ PDMS (تلفات کم)	۰/۲	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. Cocchetti, 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. Correas-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	۲۱۰×۲۱۰×۱۳۰ Tin foil(۰/۰۰۲)(۲/۸)	(۱/۰۵) - ۴۴%	[۳۲]
کمتر از ۰/۱۶	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 ۱-۰/۱ 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 افسوسی، 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*