

# طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک فیلتر دو باندهی پوشیدنی با زیرلایه‌ی نمد برای کاربرد در سیستم‌های پزشکی

فرزاد خواجه خلیلی<sup>(۱)</sup> - امید خوب‌نشان<sup>(۲)</sup> - مهسا خنجری<sup>(۲)</sup>

(۱) مربی - دپارتمان مهندسی برق، موسسه آموزش عالی کیان، شاهین شهر، اصفهان، ایران

(۲) موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۰

**خلاصه:** در این مقاله، یک فیلتر دو باندهی پوشیدنی به منظور عملکرد در باندهای فرکانسی مخابراتی استاندارد سیستم موقعیت جهانی و بلوتوث طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. در این فیلتر، بازه‌های فرکانسی ۱/۶۷۸ GHz - ۱/۵۶۳ GHz و ۲/۴۸ GHz - ۲/۴ GHz محقق شده است. این دو باند فرکانسی به‌طور گسترده، در طراحی سیستم‌های مخابراتی-پزشکی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. عموماً برای طراحی ادوات پوشیدنی، از الیاف‌ها به‌جای عایق‌های مرسوم استفاده می‌گردد. از جمله‌ی این الیاف می‌توان به نمد، جین، پشم و کتان اشاره نمود. در این فیلتر، از زیرلایه‌ی نمد با ثابت عایقی ۱/۳ و ارتفاع ۲ mm استفاده شده است. در این مقاله، از نرم‌افزار تمام-موج CST Microwave Studio 2019 به منظور شبیه‌سازی کلیه‌ی ساختارها استفاده شده است. ابعاد نهائی تشدیدگرهای این فیلتر برابر  $6 \times 2 \text{ cm}^2$  یا  $0.25 \times 0.03 \lambda_g^2$  در فرکانس ۱/۵۷ GHz می‌باشد. در ادامه به‌منظور اثبات صحت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، این فیلتر ساخته شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصه‌های این فیلتر و هم‌چنین، نتایج شبیه‌سازی، تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

**کلمات کلیدی:** فیلتر، پوشیدنی، دو بانده، تشدیدگر، نمد

## Design, Simulation, and Fabrication of a Wearable Dual-Band Filter with Felt Substrate for Application in Medical Systems

Farzad Khajeh-Khalili<sup>(1)</sup> - Omid Khoubneshan<sup>(2)</sup> - Mahsa Khanjari<sup>(2)</sup>

(1) Kian Institute of Higher Education, Shahin Shahr, Isfahan, Iran

khalili.farzad@gmail.com

(2) ACECR Institute of Higher Education, Isfahan

mohammad8557978@gmail.com

mahsakhanjari7576@gmail.com

**Abstract:** In this paper, a wearable dual-band filter is designed, simulated, and fabricated to operate at GPS and Bluetooth telecommunication frequency bands. In this filter, the frequency bands of 1.563-1.678 GHz and 2.4-2.48 GHz are achieved. These two frequency bands are widely used in the design of telecommunication-medical systems. The textures are generally used in place of conventional dielectric for the design of wearable devices. These include texture, denim, wool, and felt. In this filter, a felt substrate with dielectric constant 1.3 and 2 mm height is used. In this paper, CST Microwave Studio 2019 full-wave software is used to simulate all structures. The final dimensions of the resonators of this filter are  $6 \times 2 \text{ cm}^2$  or  $0.25 \times 0.03 \lambda_g^2$  at 1.57 GHz. The filter was then fabricated to verify the simulations performed. The results of the measurement of the characteristics of this filter as well as the simulation results are in good agreement with each other.

**Index Terms:** Filter, wearable, dual-band, resonator, felt.

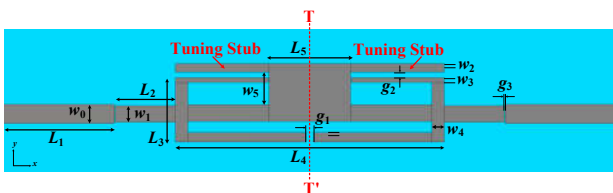
## ۱- مقدمه

فیلتر پیشنهادی معرفی می‌شود. در ادامه، با ارائه‌ی یک روش تئوری بر اساس تئوری مد زوج و فرد، چگونگی عملکرد تشدیدگرها ارائه می‌گردد. در همین بخش، توزیع چگالی جریان الکتریکی و میدان الکتریکی نیز گزارش شده است. در بخش ۳، گزارشی از تأثیر تغییرات پارامتری بر عملکرد فیلتر پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش ۴، نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصه‌های فیلتر پیشنهادی گزارش شده است. نهایتاً و در بخش ۵، با ارائه‌ی یک نتیجه‌گیری، ویژگی‌های بارز فیلتر پیشنهادی، تبیین می‌شود.

## ۲- فیلتر دوباندهی پوشیدنی پیشنهادی

پیکربندی فیلتر پوشیدنی دوباندهی پیشنهادی، در شکل (۱) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، فیلتر پیشنهادی از دو تشدیدگر امپدانس پله‌ای با شماره‌های ۱ و ۲ تشکیل شده است. این تشدیدگرها، دو باند فرکانس کاری مطلوب یعنی استانداردهای سیستم موقعیت جهانی و بلوتوث را محقق می‌کنند. عایق مورد استفاده از جنس نمد، با ثابت عایقی (ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی)  $1/3$  و ضخامتی برابر  $2 \text{ mm}$  است. بر اساس اطلاعات گزارش شده برای عایق مذکور، این نمد از نوع نمد صنعتی می‌باشد که در طراحی و ساخت قطعات صنعتی درجهت جذب بهتر روغن، ضربه-گیری، فیلترکردن هوا، عایق‌های حرارتی، عایق‌های صوتی و ... نیز به-وفور، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌منظور انجام کلیه‌ی شبیه‌سازی‌های لازم، از نرم‌افزار تمام-موج<sup>۱۶</sup> CST Microwave Studio 2019 استفاده شده است. ابعاد مشخص شده‌ی فیلتر پیشنهادی در شکل (۱) بر حسب میلی‌متر عبارت هستند از:  $L_1 = 28.2$ ,  $w_5 = 8$ ,  $w_4 = 3$ ,  $w_3 = 1.1$ ,  $w_2 = 2$ ,  $w_1 = 4$ ,  $w_0 = 4.65$ ،  $L_2 = 14.8$ ,  $L_3 = 15.6$ ,  $L_4 = 66$ ,  $L_5 = 20$ ,  $g_1 = 2$ ,  $g_2 = 1.4$  و  $g_3 = 0.2$ .



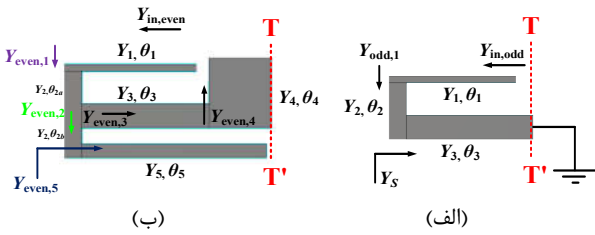
شکل (۱): پیکربندی فیلتر پوشیدنی پیشنهادی

Fig. (1): Configuration of the proposed wearable filter

پارامترهای پراکندگی<sup>۱۷</sup> فیلتر پیشنهادی ( $S_{11}$  و  $S_{21}$ )، در شکل (۲) گزارش شده است. مشاهده می‌گردد که این فیلتر، به‌خوبی باندهای فرکانسی استانداردهای سیستم موقعیت جهانی و بلوتوث را پوشش می‌دهد. این باندهای فرکانسی به‌ترتیب  $1/563 - 1/678 \text{ GHz}$  و  $2/48 - 2/48 \text{ GHz}$  هستند. لازم به ذکر است که از دو استاب به-منظور تنظیم‌پذیری فرکانس‌های کار استفاده شده است. این دو استاب بر اساس مرجع [۶]، طراحی شده و فرکانس‌های  $1/57 \text{ GHz}$  و  $2/4 \text{ GHz}$  را حاصل می‌نمایند. در ادامه، تشدیدگرهای نامبرده معرفی می‌شوند.

فیلترها، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین قطعات در طراحی سیستم‌های مخابراتی هستند. نمونه‌ی ریزنوار<sup>۱</sup> آنها که تقریباً از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی پرطرفدار شده‌اند، دارای ابعاد کوچک، قابلیت طراحی ساده و هزینه‌ی ساخت پایین هستند [۱]. ساختارهای ریزنوار کماکان، از جمله‌ی پرطرفدارترین فن‌آوری‌ها برای ساخت آنتن‌ها، مقسم‌های توان<sup>۲</sup> و دیگر ادوات مخابراتی با ابعاد کوچک و هزینه‌ی کم هستند [۲-۴]. در طی سالیان اخیر، پژوهش‌های فراوانی نیز در راستای بهبود عملکرد فیلترهای ریزنوار از جمله افزایش پهنای باند، چند بانده‌سازی و هم‌چنین، کوچک‌سازی ابعاد آنها انجام شده است [۵-۱۲]. راه-کارهایی نظیر استفاده از تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای<sup>۳</sup> [۵]، تشدیدگرهای تزویج‌شده<sup>۴</sup> [۶]، افزایش تعداد تشدیدگرها و اضافه‌نمودن استاب‌ها<sup>۵</sup> [۷]، تشدیدگرهای چندمدی<sup>۶</sup> [۸]، فرامواد<sup>۷</sup> [۹]، ساختارهای موج‌بر زیرلایه‌ی مجتمع<sup>۸</sup> [۱۰] و ... از جمله‌ی روش‌های افزایش پهنای باند و یا چند بانده‌سازی هستند. از طرفی، به‌منظور افزایش ضریب کیفیت این فیلترها، استفاده از تشدیدگرهای عایقی [۱۱]، ساختارهای فراماده [۱۲] و ... نیز معرفی شده‌اند. اما تقریباً تمامی فن‌آوری‌ها و روش‌های فوق، برای کاربردهای پوشیدنی<sup>۹</sup> و پزشکی مورد استفاده نیستند. علت عمده‌ی این محدودیت نیز استفاده از عایق‌های غیرمنعطف و خشک است. لذا، در طی سالیان اخیر، به‌جای استفاده از عایق‌های خشک و ضخیم و بدون انعطاف مرسوم در ساختارهای ریزنوار، استفاده از الیاف‌ها<sup>۱۰</sup> متداول شده است [۱۳-۱۵]. البته بیشتر این مراجع، برای طراحی آنتن‌های ریزنوار ارائه شده‌اند. در زمینه‌ی فیلترهای پوشیدنی تاکنون، تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است [۱۴]. لذا، این موضوع یکی از به‌روزترین و ارزشمندترین موضوعات برای محققین و علاقه‌مندان به این زمینه است.

در این مقاله، یک فیلتر پوشیدنی برای کاربرد در سیستم‌های سیستم موقعیت جهانی<sup>۱۱</sup> و بلوتوث<sup>۱۲</sup> شبیه‌سازی و ساخته شده است. با فرض  $S_{11} < -10 \text{ dB}$  و  $S_{21} > +0/5 \text{ dB}$  باندهای فرکانسی  $1/5 - 1/6 \text{ GHz}$  و  $2/4 - 2/48 \text{ GHz}$  پوشش داده شده است. لازم به ذکر است که  $S_{11}$  تلفات بازگشتی و  $S_{21}$  تلفات عبوری هستند. الیاف استفاده شده در این فیلتر، از نوع نمد<sup>۱۳</sup> است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصه‌های این فیلتر، تناسب خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. میزان تلفات عبوری در فرکانس‌های  $1/57 \text{ GHz}$  و  $2/4 \text{ GHz}$  به‌ترتیب برابر با  $0/2 \text{ dB}$  و  $1 \text{ dB}$  است. هم‌چنین، تلفات بازگشتی در فرکانس‌های فوق برابر  $19 \text{ dB}$  و  $33 \text{ dB}$  است. ابعاد تشدیدگرهای مورد استفاده در این فیلتر برابر با  $2 \times 6 \text{ cm}^2$  یا  $0/25 \times 0/3 \lambda_g^2$  در فرکانس  $1/57 \text{ GHz}$  است. نکته‌ی شایان توجه آن است که به‌کارگیری روش‌های مرسوم در طراحی ساختارهای ریزنوار برای تحقق این فیلتر و تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، سادگی طراحی و مهم‌تر از همه، هزینه‌ی بسیار کم برای ساخت با استفاده از نمدهای موجود در بازار، از جمله‌ی مهم‌ترین مزایای فیلتر پوشیدنی پیشنهادی است. هم‌چنین، فیلتر پیشنهادی، در ماژول‌های پزشکی نظیر GDMM<sup>۱۴</sup> و یا SLECGBD<sup>۱۵</sup> نیز قابل استفاده است [۱۶]. در این مقاله و در بخش ۲، پیکربندی



شکل (۴): (الف) مد فرد و (ب) مد زوج تشدیدگرهای پیشنهادی  
Fig. (4): (a) Odd mode, (b) Even mode of proposed resonators

با توجه به شکل (۴-الف)، برای مد فرد داریم:

$$Y_{in,odd} = Y_1 \frac{Y_{odd,1} + jY_1 \tan(\theta_1)}{Y_1 + jY_{odd,1} \tan(\theta_1)} \quad (1)$$

$$Y_{odd,1} = Y_2 \frac{Y_S + jY_2 \tan(\theta_2)}{Y_2 + jY_S \tan(\theta_2)} \quad (2)$$

$$Y_S = -jY_3 \cot(\theta_3) \quad (3)$$

برای مد زوج نیز بر اساس شکل (۴-ب) خواهیم داشت:

$$Y_{in,even} = Y_1 \frac{Y_{even,1} + jY_1 \tan(\theta_1)}{Y_1 + jY_{even,1} \tan(\theta_1)} \quad (4)$$

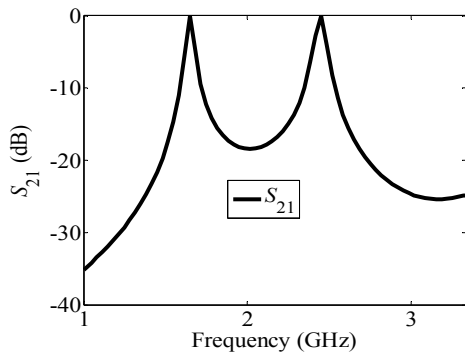
$$Y_{even,1} = Y_{even,2} + Y_{even,3} \quad (5)$$

$$Y_{even,2} = Y_2 \frac{jY_5 \tan(\theta_5) + jY_2 \tan(\theta_{2b})}{Y_2 - Y_5 \tan(\theta_3) \tan(\theta_{2b})} \quad (6)$$

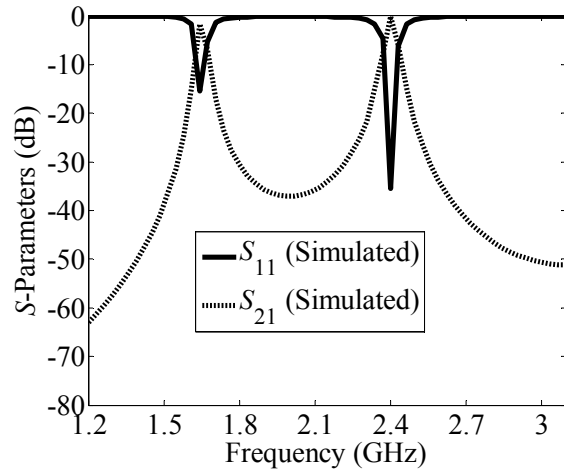
$$Y_{even,3} = Y_3 \frac{jY_4 \tan(\theta_4) + jY_3 \tan(\theta_3)}{Y_3 - Y_4 \tan(\theta_4) \tan(\theta_3)} \quad (7)$$

با توجه به تحلیل‌ها و روابط فوق‌الذکر، فرکانس‌های تشدید مدهای زوج و فرد، با حل دو معادله‌ی  $Y_{in,even} = 0$  و  $Y_{in,odd} = 0$  به دست می‌آیند. اما نکته‌ی مهم آن است که با کنار یکدیگر قرار دادن این تشدیدگرها و قرارگیری آنها در کنار دیگر بخش‌های فیلتر و نتیجتاً رخداد تزویج متقابل، نهایتاً نیاز به یک تنظیم و بهینه‌سازی نهائی نیز در ابعاد تشدیدگرها وجود دارد. این بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار CST صورت پذیرفته و ابعاد گزارش شده در بخش پیشین، حاصل شده‌اند.

ابتدا تنها، این دو تشدیدگر در کنار یکدیگر، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با صرف نظر از تزویج متقابل، پاسخ فرکانسی آنها، مطابق شکل (۵) است. مشاهده می‌شود که این دو بخش در کنار هم، قابلیت ایجاد دو باند فرکانسی را دارند. دو تشدید مذکور در فرکانس‌های ۱/۶ GHz و ۲/۵ GHz رخ داده است. علت انتخاب طرح‌های مورد استفاده از نوع تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای، آن است که بتوان با در کنار یکدیگر قرار دادن آنها و استفاده‌ی مناسب از فضا، به کوچک‌ترین ابعاد ممکن دست یافت.



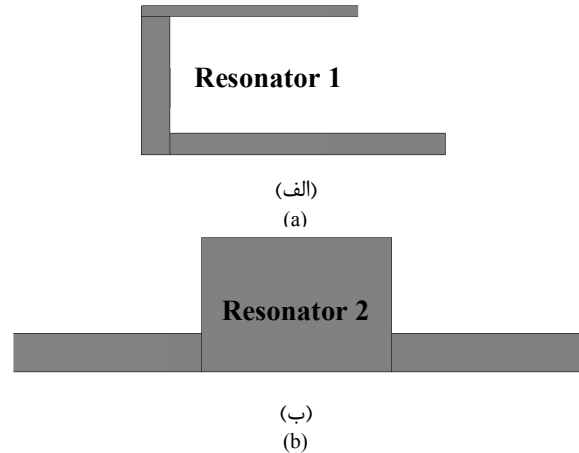
شکل (۵): پارامتر  $S_{21}$  تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای  
Fig. (5): Step impedance resonators  $S_{21}$  parameter



شکل (۲): پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی شده‌ی فیلتر پیشنهادی  
Fig. (2): Simulated scattering of the proposed filter

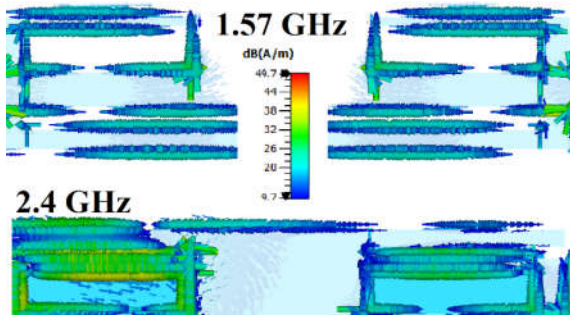
### ۲-۱- تحلیل تشدیدگرهای استفاده‌شده

در این بخش، به معرفی تشدیدگرهای مورد استفاده پرداخته می‌شود. در شکل (۳)، هر دو تشدیدگر پیشنهادی، نمایش داده شده‌اند. همانطور که مشخص است، هر دو این ساختارها، از نوع تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای هستند. بر اساس تحلیل‌هایی که در مرجع [۵] با توجه به تحلیل مدهای زوج و فرد انجام شده است، به سادگی و با تغییر ابعاد تشدیدگرها، می‌توان فرکانس تشدید هر یک را تنظیم نمود. در ادامه، با تحلیل مد زوج و فرد، به ارائه‌ی یک تحلیل تئوری و نظری پرداخته می‌شود.



شکل (۳): تشدیدگرهای مورد استفاده در فیلتر پیشنهادی  
Fig. (3): Resonators used in the proposed filter

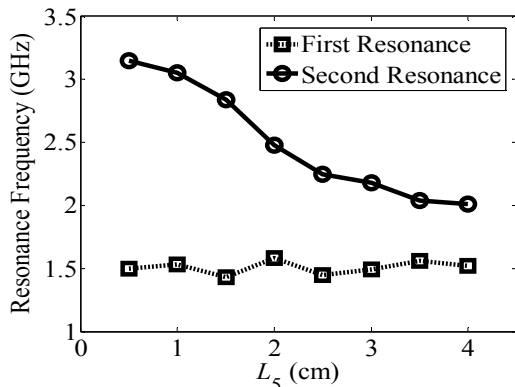
با توجه به شکل (۱)، مشاهده می‌گردد که ساختار شامل تشدیدگرهای پیشنهادی، حول خط  $TT'$  متقارن هستند. لذا، می‌توان توسط روش تحلیل مد زوج و فرد، فرکانس‌های تشدید را تعیین نمود. در شکل (۴)، مدار معادل مد زوج و مد فرد برای تشدیدگرهای مذکور ترسیم شده است.



(ب)

(b)

شکل (۶): (الف) توزیع میدان الکتریکی و (ب) توزیع جریان سطحی  
Fig. (5): (a) Electric field distribution, (b) Surface current distribution

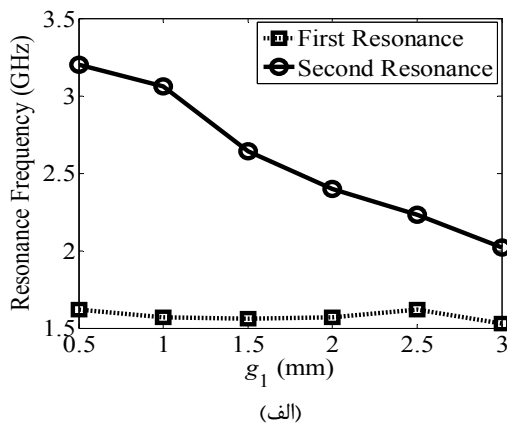


شکل (۷): تغییر محل فرکانس‌های تشدید به‌ازای تغییرات  $L_5$

Fig. (7): Change the location of resonance frequencies for  $L_5$  changes

#### ۴- ساخت و نتایج حاصل از اندازه‌گیری

در انتها و پس از شبیه‌سازی و گزارش‌های ارائه‌شده، فیلتر پیشنهادی ساخته شد و نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصه‌های آن، به‌دست آمد. نتایج اندازه‌گیری، توسط Agilent network analyzer HP8722ES حاصل شده است. عکس فیلتر پوشیدنی دو باندهی پیشنهادی ساخته شده در نماهای بالائی و پایینی، در شکل (۹) نشان داده شده است. ابعاد نهائی فیلتر برابر  $10 \times 4 \text{ cm}^2$  یا  $10 \times 4 \lambda_g^2$  است.  $g_1$  طول موج در فرکانس  $1/57 \text{ GHz}$  است. در ورودی و خروجی فیلتر به‌منظور اندازه‌گیری مشخصه‌های آن، از دو کانکتور SMA، مدل R127632001 و تولید شرکت Radiall استفاده شده است.



(الف)

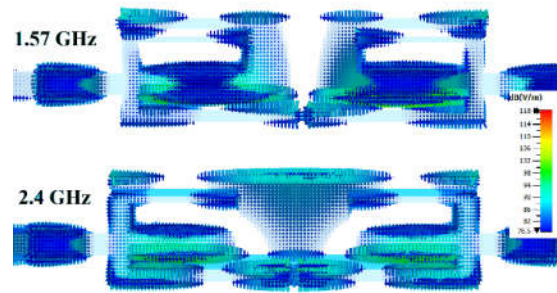
#### ۲-۲- توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان

در این بخش، به ارائه‌ی توزیع میدان الکتریکی و هم‌چنین، چگالی جریان سطحی به‌منظور تعیین بخش‌های کلیدی در تعیین فرکانس‌های کار پرداخته می‌شود. در ابتدا و در شکل (۶-الف) میدان الکتریکی برای هر دو فرکانس  $1/57 \text{ GHz}$  و  $2/4 \text{ GHz}$  نمایش داده شده است. در شکل (۶-ب) نیز، چگالی جریان برای دو فرکانس مذکور ارائه شده است. با توجه به شکل (۶-الف)، با ایجاد میدان بین تشدیدگرها، تزویج متقابل قابل توجهی حاصل شده است که می‌تواند در راستای بهبود پاسخ فرکانسی یا به‌عبارتی، بهبود شرایط تلفات بازگشتی و تلفات عبوری، مؤثر باشد. با توجه به شکل (۶-ب)، مشاهده می‌شود که تشدیدگر ۱ در راستای ایجاد باند فرکانسی اول (سیستم موقعیت جهانی) و هم‌چنین، تشدیدگر ۲ برای ایجاد باند فرکانسی دوم (بلوتوث)، مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند.

#### ۳- گزارش تغییرات پارامتری

اکنون به‌منظور توجیه بهتر رفتار فرکانسی هر یک از تشدیدگرها، چند گزارش پارامتری از تغییر ابعاد آنها و تأثیر آن بر پارامترهای پراکندگی فیلتر پیشنهادی، ارائه می‌شود. در شکل (۷)، تأثیر تغییرات پارامتر  $L_5$  بر محل فرکانس‌های تشدید اول و دوم را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر در پارامتر  $L_5$ ، فرکانس تشدید دوم جابجا شده و فرکانس تشدید اول، تقریباً ثابت می‌ماند.

در شکل (۸)، گزارشی از تأثیر تغییرات هر دو پارامتر  $g_1$  و  $g_2$  بر محل فرکانس‌های تشدید، ارائه شده است. با توجه به شکل (۸-الف)، با تغییر  $g_1$  از  $0.5 \text{ mm}$  تا  $3 \text{ mm}$ ، محل فرکانس تشدید اول تقریباً ثابت، اما محل فرکانس تشدید دوم، از فرکانس  $3/2 \text{ GHz}$ ، به سمت فرکانس  $2/2 \text{ GHz}$  تنزل پیدا می‌کند. در شکل (۸-ب)، تأثیر تغییرات پارامتر  $g_2$  از  $1 \text{ mm}$  تا  $2 \text{ mm}$  را بر فرکانس‌های تشدید نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با این تغییرات، محل فرکانس‌های تشدید اول و دوم تقریباً ثابت هستند.



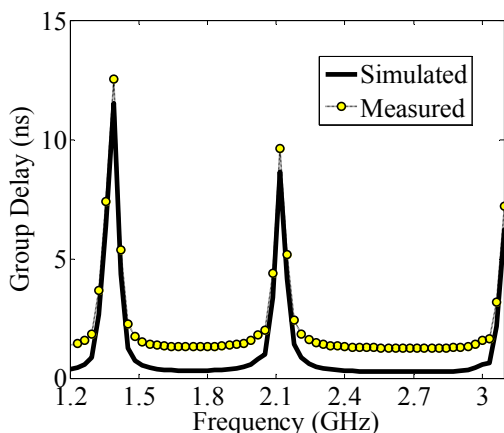
(الف)

(a)

در شکل (۱۱)، تأخیر گروه برای این فیلتر گزارش شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات این پارامتر در فرکانس‌های کار، بین ۰ تا ۰/۸ ns است. همچنین، بیشترین تأخیر در باند، برابر ۰/۸ ns برای فرکانس ۱/۵۷ GHz است. این نتایج نیز مشخصاً مورد قبول هستند. نهایتاً به‌منظور ارائه‌ی یک مقایسه‌ی جامع بین عملکرد این فیلتر و دیگر طرح‌های گزارش‌شده در مراجع معتبر، جدول (۱) تدوین شده است. مشاهده می‌گردد که فیلتر پیشنهادی، عملکرد قابل قبولی دارد. از جمله‌ی مزایای این فیلتر می‌توان به تلفات عبوری کم، ابعاد مناسب، قابلیت پوشیدنی‌بودن و همچنین، طراحی ساده اشاره نمود.

### ۵- نتیجه‌گیری

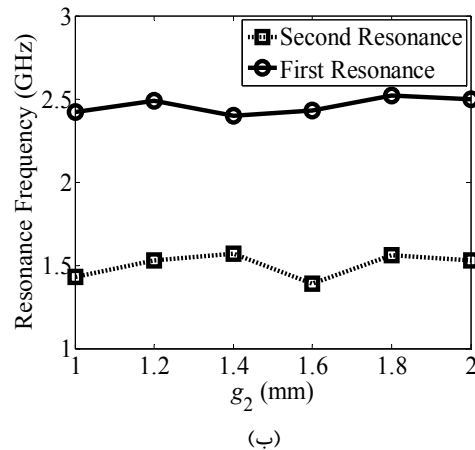
در این مقاله، یک فیلتر پوشیدنی دو بانده، با استفاده از زیرلایه‌ای از جنس نمد با ثابت عایقی ۱/۳ و ارتفاع ۲ mm برای کاربرد در سیستم‌های مخابراتی-پزشکی شبیه‌سازی و ساخته شد. ابعاد نهایی تشدیدگرهای این فیلتر برابر  $6 \times 2 \text{ cm}^2$  یا  $0.3 \lambda_g \times 0.25 \lambda_g$  در فرکانس ۱/۵۷ GHz است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصه‌های فیلتر پیشنهادی، تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. از جمله مزایای فیلتر پیشنهادی می‌توان به طراحی ساده، ارزان‌قیمت بودن و اندازه‌ی کوچک آن اشاره نمود.



شکل (۱۱): تأخیر گروه فیلتر پوشیدنی پیشنهادی  
Fig. (11): Group delay of the proposed wearable filter

پی‌نوشت:

1. Microstrip
2. Power divider
3. Step impedance resonator
4. Coupled resonators
5. Stub
6. multi-mode resonators
7. Metamaterials
8. Substrate integrated waveguide
9. Wearable
10. Textures
11. Global Position System (GPS)
12. Bluetooth
13. Felt
14. Granular Decision Making Module (GDMM)
15. Single-Lead ECG Biomedical Device (SLECGBD)
16. Full-wave
17. Scatterer

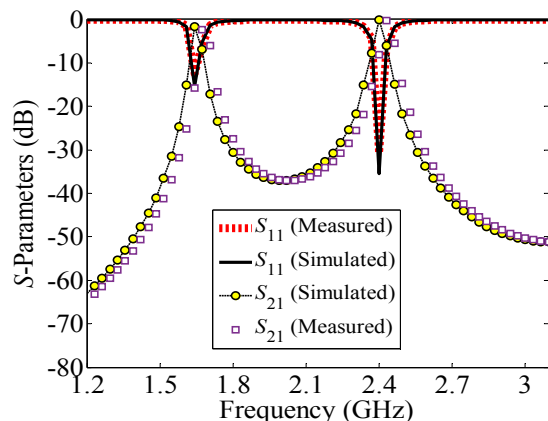


شکل (۸): (الف) تغییر  $g_1$  و (ب) تغییر  $g_2$  بر محل فرکانس‌های تشدید  
Fig. (8): (a) Effect of change of  $g_1$ , (b) and  $g_2$  parameters on the location of resonance frequencies

در شکل (۱۰)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی فیلتر پیشنهادی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تطابق مناسبی بین این دو حالت برقرار است. همچنین، برای حالت اندازه‌گیری نیز پوشش باندهای فرکانسی سیستم موقعیت جهانی محقق گردیده است. پهنای باند هر یک از باندهای عبور سیستم موقعیت جهانی و بلوتوث به ترتیب برابر ۱۱۵ MHz و ۸۰ MHz می‌باشد. در حالت اندازه‌گیری شده، میزان تلفات عبوری در فرکانس‌های ۱/۵۷ GHz و ۲/۴ GHz به ترتیب برابر با ۰/۲ dB و ۱ dB است. همچنین، تلفات بازگشتی در فرکانس‌های فوق برابر ۱۹ dB و ۳۳ dB هستند.



شکل (۹): عکس فیلتر ساخته شده‌ی پیشنهادی  
Fig. (9): A photograph of the proposed filter



شکل (۱۰): پارامترهای پراکندگی فیلتر پوشیدنی پیشنهادی  
Fig. (10): Scattering parameters of the proposed wearable filter

Table (1): Comparison of the of the proposed filter performances with other papers

جدول (۱): مقایسه‌ی عملکرد فیلتر پیشنهادی با دیگر مقالات

| مرجع      | فرکانس (GHz)    | تلفات عبوری (dB) | تلفات بازگشتی (dB) | ابعاد (mm <sup>2</sup> ) | ابعاد (mm <sup>2</sup> ) | پیچیدگی | پوشیدنی |
|-----------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|
| [۵]       | ۲/۴-۴/۵-۵/۳     | ۱/۶-۲/۳-۰/۵      | ۱۲/۱۴/۱۸           | ۰/۰۳۸                    | ۱۹۹/۲۶                   | نرمال   | خیر     |
| [۶]       | ۱/۸             | ۰/۱۶             | ۱۴                 | ۰/۰۲۴                    | ۲۰۴                      | زیاد    | خیر     |
| [۸]       | ۱/۲-۵۵/۴-۴/۵-۰۶ | ۱/۹-۱/۶-۱/۳-۱/۵  | ۱۲/۲-۱۳/۶-۱۴-۱۴/۵  | ۰/۰۲۵                    | ۹۰۱                      | نرمال   | خیر     |
| [۱۴]      | ۵/۵             | ۱/۵              | ۱۶/۷۶              | ۰/۱۲۲                    | ۶۰۴                      | زیاد    | بله     |
| این مقاله | ۱/۲-۵۷/۴        | ۱-۰/۲            | ۱۹-۳۳              | ۰/۰۶۰                    | ۱۲۰۰                     | کم      | بله     |

## References

- [1] V. Crnojevic'-Bengin, *Advances in Multi-Band Microstrip Filters*. Cambridge University Press, 2015.
- [2] F. Khajeh-Khalili, M. A. Honarvar, "Design and simulation of a Wilkinson power divider with high isolation for tri-band operation using PSO algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 6, No. 23, pp. 13-20, Nov 2015.
- [3] F. Khajeh-Khalili, M. A. Honarvar, A. Dadgarpour, B. S. Virdee, T. A. Denidni, "Compact tri-band Wilkinson power divider based on metamaterial structure for Bluetooth, WiMAX, and WLAN applications", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 33, No. 6, pp. 707-721, March 2019 (doi: 10.1080/09205071.2019.1575287).
- [4] F. Khajeh-Khalili, M. Amin Honarvar, A. Dadgarpour, "High-gain bow-tie antenna using array of two-sided planar metamaterial loading for H-band applications", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 28, No. 7, pp. 1-7, Sept 2018 (doi: 10.1002/mmce.21476).
- [5] I. Jadidi, M. A. Honarvar, F. Khajeh-Khalili, "Compact tri-band microstrip filter for Bluetooth, WiMAX, and WLAN applications", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 91, pp. 241-252, April 2019 (doi: 10.2528/PIERC19012602).
- [6] J. Dong, J. Shi, K. Xu, "Compact wideband differential bandpass filter using coupled microstrip lines and capacitors," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 29, No. 7, pp. 444-446, July 2019 (doi: 10.1109/LMWC.2019.2917778).
- [7] M. A. Honarvar, R. Sadeghzadeh, "Design of coplanar waveguide ultrawideband bandpass filter using stub-loaded resonator with notched band," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 54, No. 9, pp. 2056-2061, Sept. 2012 (doi: 10.1002/mop.26992).
- [8] M. Mirzaei and M. A. Honarvar, "Compact planar quad-band bandpass filter for application in GPS, WLAN, WiMAX and 5G WiFi", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 63, 115-121, Nov 2016 (doi: 10.2528/PIERL16092307).
- [9] M. A. G. Elsheikh and A. M. E. Safwat, "Wideband modeling of SRR-loaded coplanar waveguide", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 67, No. 3, pp. 851-860, March 2019 (doi: 10.1109/TMTT.2018.2886840).
- [10] H. Deng, Y. Zhao, Y. He, H. Liu, H. Wang, "High selectivity and common-mode suppression wideband balanced bandpass filter using slotline resonator", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 9, No. 6, pp. 508-516, April 2015 (doi: 10.1049/iet-map.2014.0146).
- [11] R. K. Jazi, M. A. Honarvar, and F. Khajeh-Khalili, "High Q-factor narrow-band bandpass filter using cylindrical dielectric resonators for X-band applications", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 77, No. 10, pp. 65-71, July 2018 (doi: 10.2528/PIERL18041007).
- [12] A. S. Noori, X. Shang, C. Guo, T. J. Jackson, P. A. Smith, M. J. Lancaster, "Microwave filters based on novel dielectric split-ring resonators with high unloaded quality factors", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 12, No. 8, pp. 1389-1394, June 2018 (doi: 10.1049/iet-map.2017.0463).
- [13] A. Vosoogh, A. Uz Zaman, V. Vassilev, J. Yang, "Zero-gap waveguide: A parallel plate waveguide with flexible mechanical assembly for mm-wave antenna applications", *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 8, No. 12, pp. 2052-2059, Dec 2018 (doi: 10.1109/TCPMT.2018.2878643).
- [14] M. Zhao and Y. Zhang, "Compact wearable 5-GHz flexible filter," *Electronics Letters*, Vol. 53, No. 10, pp. 661-663, May 2017 (doi: 10.1049/el.2017.0625).
- [15] D. K. Janapala, M. Nesasudha, T. M. Neebha, R. Kumar, "Specific absorption rate reduction using metasurface unit cell for flexible polydimethylsiloxane antenna for 2.4 GHz wearable applications", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 29, No. 9, pp. 1-12, Sept. 2019 (doi: 10.1002/mmce.21835).
- [16] Subhas C. Mukhopadhyay, *Wearable Electronics Sensors*, 1st ed., ser. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, S. C. Mukhopadhyay, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2015, Vol. 15.