

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

بدر دریائی<sup>۱</sup>، فرزاد خواجه خلیلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، [beder@aut.ac.ir](mailto:beder@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار، دپارتمان مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی کیان، شاهین شهر، اصفهان، ایران، [khajehkhalili.edu@gmail.com](mailto:khajehkhalili.edu@gmail.com)

### چکیده

در این مقاله، به طراحی و شبیه‌سازی یک فیلتر دو باندهی پوشیدنی منعطف به‌منظور عملکرد در باندهای فرکانسی ISM پرداخته شده است. لذا به‌دلیل انجام طراحی مبتنی بر اصول پوشیدنی، علاوه بر شناخت باندهای فرکانسی مذکور، چگونگی روند طراحی فیلترهای پوشیدنی نیز بررسی گردیده است. در همین راستا، نخست، مشخصه‌های مد نظر و مطلوب یک فیلتر بررسی می‌گردد. این مشخصه‌ها شامل پارامترهای ماتریس پراکندگی (S-Parameters) و تأخیر گروه می‌باشد. در ادامه و در تبیین اهداف، با تعیین مقادیر عددی برای این مشخصه‌ها، چارچوب مقاله تعیین می‌شود. از آنجا که موضوع این مقاله، طراحی فیلترهای پوشیدنی می‌باشد، بایستی زیرلایه‌ای که این قابلیت را دارد، به‌کار گرفته شود. در همین راستا، از یک زیرلایه‌ی منعطف با جنس نمد، ضخامت 1.4 mm، ثابت عایقی 1.45 و همچنین،  $\tan(\delta) = 0.001$  استفاده شده است. با استفاده از این عایق، یک فیلتر پیشنهادی دو بانده با ابعاد  $29.4 \times 33.4 \text{ mm}^2$  طراحی گردید. باندهای فرکانسی تحت پوشش آن شامل 2.4-2.5 GHz و 5.15-5.35 GHz می‌باشد. این باندها از مقادیر استاندارد تحت پوشش ISM هستند. شایان ذکر است که در تمامی فرکانس‌های کار، شروط  $S_{11} < -10 \text{ dB}$  و  $S_{21} > +0.5 \text{ dB}$  برقرار می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** فیلتر، پوشیدنی، نمد، تشدیدگر، پارامترهای پراکندگی، عایق.

## ۱. مقدمه

فیلترها<sup>۱</sup> یکی از مهمترین ادوات و تجهیزات در مهندسی مخابرات بوده که نمونه‌ی ریزنوار<sup>۲</sup> آن، حدوداً از دهه‌ی هفتاد میلادی مورد توجه قرار گرفت [۱]. ساختارهای ریزنوار دارای اندازه‌ی کوچک، قابلیت طراحی ساده و همچنین، هزینه‌ی بسیار پایین ساخت هستند [۱]. سازه‌های ریزنوار هم‌اکنون، از محبوب‌ترین فن‌آوری‌ها برای طراحی آنتن‌ها<sup>۳</sup>، مقسم‌های توان<sup>۴</sup> و دیگر قطعات مخابراتی با اندازه‌ی کوچک و هزینه‌ی پایین هستند [۲-۴]. امروزه، برای بالا بردن کیفیت عملکرد فیلترها یعنی بهبود پاسخ فرکانسی آنها، پژوهش‌های زیادی انجام شده که شامل نتایجی نظیر افزایش پهنای باند، چند بانده‌سازی و همچنین، کوچک‌سازی اندازه‌ی آنها می‌باشد [۵-۱۰]. به‌کارگیری تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای<sup>۵</sup> [۵]، تشدیدگرهای تزویج‌شده<sup>۶</sup> [۶]، فرامواد<sup>۷</sup> [۷]، ساختارهای موجبر زیرلایه‌ی مجتمع [۸] و ...، از مهمترین روش‌های افزایش پهنای باند و همچنین، چند بانده‌سازی فیلترها هستند. از سوی دیگر، استفاده از تشدیدگرهای عایقی<sup>۸</sup> [۹]، ساختارهای فراماده [۱۰] و ...، به‌منظور افزایش ضریب کیفیت<sup>۹</sup> و دیگر مشخصه‌های فرکانسی این فیلترها نیز معرفی شده‌اند. اما به‌طور تقریبی، همه‌ی فن‌آوری‌ها و روش‌های ذکر شده، برای کاربردهای پوشیدنی<sup>۱۰</sup> و پزشکی مورد استفاده نیستند. دلیل اصلی این مسأله، سخت، خشک و غیر منعطف بودن عایق‌های مورد استفاده و همچنین، استفاده‌ی فراوان از فلزها در راستای طراحی‌ها می‌باشد. بنابراین، به‌کارگیری الیاف-ها<sup>۱۱</sup> به‌جای استفاده از عایق‌های خشک و بدون انعطاف در سازه‌های ریزنوار، گزینه‌ی مناسبی می‌باشد. لازم به‌ذکر است که تعداد زیادی از منابع و مراجع، برای طراحی آنتن‌های پوشیدنی با استفاده از الیاف ارائه شده‌اند [۱۰-۱۳]. لکن، تا به‌حال در زمینه‌ی فیلترهای پوشیدنی، تحقیقات و مطالعات بسیار اندکی انجام شده است [۱۴-۱۶]. بنابراین، این عنوان برای محققانی که در این زمینه فعالیت می‌نمایند، بسیار حائز اهمیت و البته جذاب می‌باشد. نکته‌ی دیگر قابل ذکر آن است که طراحی‌هایی که به‌منظور کاربرد در سیستم‌های مخابراتی پوشیدنی بی‌سیم پزشکی انجام می‌شوند، الزاماً بایستی در باندهای فرکانسی استاندارد ISM<sup>۱۲</sup> عمل نمایند [۱۷]. این باندها که به استاندارد صنعتی، علمی و پزشکی موسوم هستند، باندهای آزاد بوده و شامل فرکانس‌های مرکزی 0.8 GHz، 2.4 GHz و 5.2 GHz می‌باشد. مطابق آنچه که تبیین گردید، طراحی فیلتر پوشیدنی به‌کمک الیاف و البته با پاسخ فرکانسی خوب، کماکان یک چالش برای محققین می‌باشد.

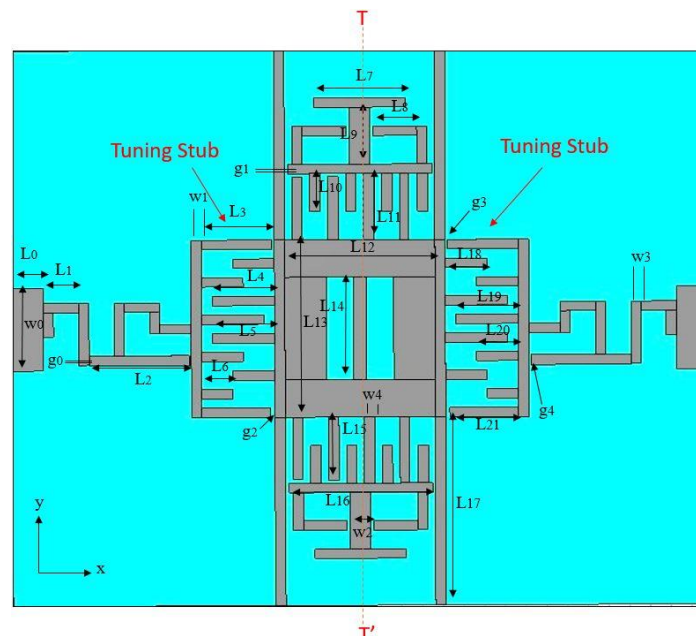
در این مقاله، یک فیلتر دو بانده‌ی پوشیدنی برای استفاده در سیستم‌های مخابراتی/پزشکی بی‌سیم ISM طراحی و شبیه‌سازی شده است. با فرض‌های تلفات بازگشتی<sup>۱۳</sup> ( $S_{11}$ ) و تلفات عبوری<sup>۱۴</sup> ( $S_{21}$ ) معادل  $S_{11} < -10$  dB و  $S_{21} > +0.5$  dB، بازه‌های فرکانسی 2.4-2.5 GHz و 5.15-5.35 GHz توسط فیلتر پیشنهادی پوشش داده شده است. به‌منظور تحقق پوشیدنی بودن، از یک عایق با جنس نمد<sup>۱۵</sup>، ثابت عایقی<sup>۱۶</sup> برابر با 1.45، ضخامتی معادل 1.4 mm و همچنین،  $\tan(\delta) = 0.001$  استفاده گردیده است. اما به‌منظور تحقق باندهای فرکانسی مذکور، از روشی موسوم به تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای یا SIR استفاده

<sup>1</sup> Filters<sup>2</sup> Microstrip<sup>3</sup> Antennas<sup>4</sup> Power Dividers<sup>5</sup> Stepped-Impedance Resonator (SIR)<sup>6</sup> Coupled Resonators<sup>7</sup> Metamaterials<sup>8</sup> Substrate Integrated Waveguide (SIW)<sup>9</sup> Dielectric Resonators<sup>10</sup> Quality Factor (Q Factor)<sup>11</sup> Wearable<sup>12</sup> Textures<sup>13</sup> Reflection Coefficient<sup>14</sup> Insertion Loss<sup>15</sup> Felt<sup>16</sup> Dielectric Constant

شده است. ابعاد نهایی این فیلتر برابر با  $29.4 \times 33.4 \text{ mm}^2$  یا  $0.11 \times 0.12 \lambda^2$  در فرکانس مرکزی 2.4 GHz می‌باشد. شایان ذکر است که  $\lambda$  طول موج در فرکانس مزبور است. ابعاد کوچک، پاسخ فرکانسی مناسب و همچنین، تأخیر گروه<sup>۱۷</sup> کم از جمله-ی مهمترین مزایای فیلتر پوشیدنی پیشنهادی می‌باشد.

## ۲. فیلتر دو باندهی پوشیدنی پیشنهادی

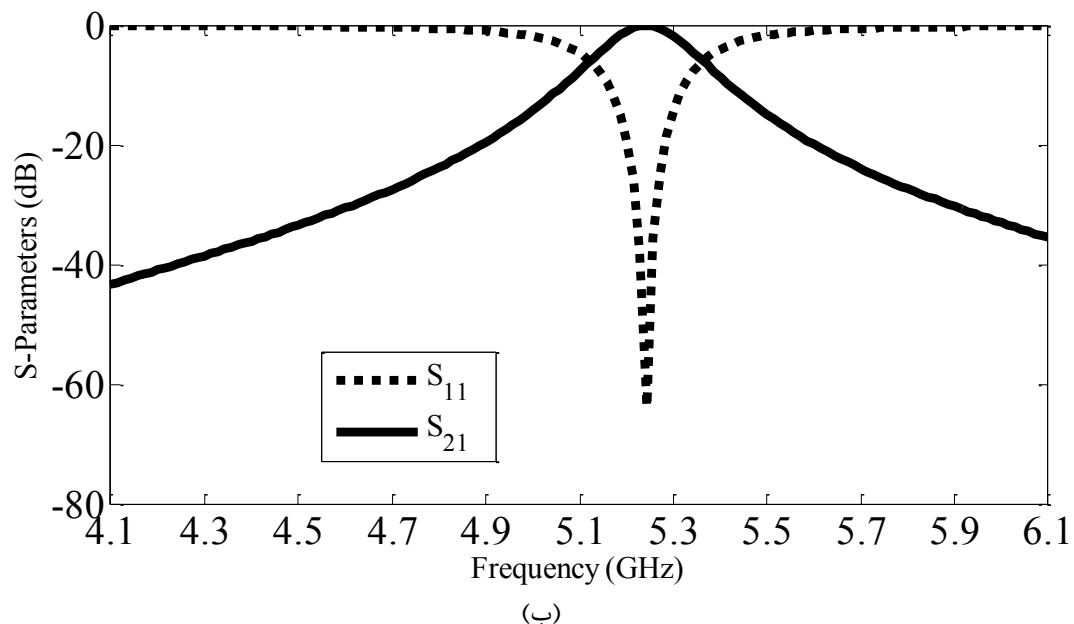
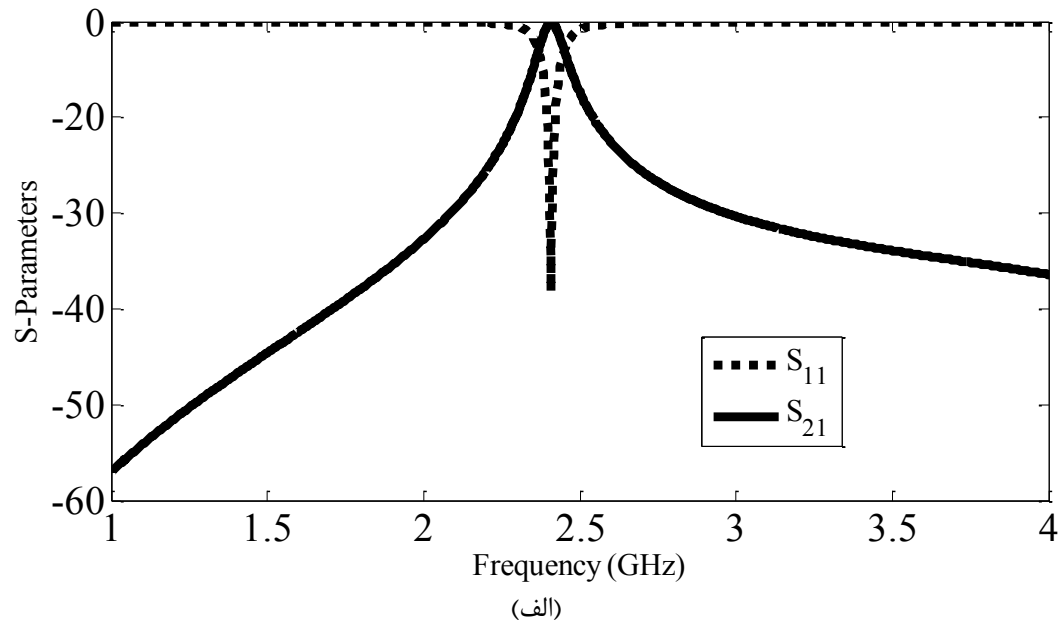
در شکل ۱ پیکربندی فیلتر پوشیدنی دو باندهی پیشنهادی نمایش داده شده است. در راستای طراحی و شبیه‌سازی فیلتر پیشنهادی از نرم‌افزار CST Studio Suite 2021 استفاده شده است. این فیلتر دارای یک صفحه‌ی فلزی در پایین‌ترین لایه می‌باشد. این صفحه، نقش زمین فیلتر را بازی می‌کند. بر روی زمین، یک لایه‌ی عایقی از جنس نمد با ثابت عایقی برابر با 1.45 و ضخامتی معادل 1.4 mm قرار گرفته است. این عایق با توجه به منعطف‌بودن آن، فیلتر پیشنهادی را به گزینه‌ی مناسبی جهت استفاده در سیستم‌های مخابراتی/پزشکی تبدیل کرده است. مطابق شکل ۱، ابعاد کلی و نهایی این فیلتر برابر با  $29.4 \times 33.4 \text{ mm}^2$  یا  $0.11 \times 0.12 \lambda^2$  در فرکانس مرکزی 2.4 GHz می‌باشد. همانگونه که مشخص است، ابعاد این فیلتر کوچک بوده و شرایط مساعدی دارد. اما با دقت در شکل ۱، مشاهده می‌گردد که هر دو دهانه، به‌طور مستقیم به مابقی ساختار متصل نیست. این امر که به‌نوعی استفاده از روش تزویج می‌باشد، به‌منظور ایجاد صفرهای انتقال و بهبود ضریب کیفیت فیلتر انجام پذیرفته است [۸]. همچنین، از دو استاب تنظیم (Tuning Stub) نیز به‌منظور تنظیم نمودن باندهای فرکانسی تحت پوشش استفاده گردیده است. اندازه‌های مشخص‌شده‌ی فیلتر پیشنهادی در شکل ۱ که همگی بر حسب میلی‌متر هستند، عبارتند از:  $w_0=4.4$ ,  $w_1=0.5$ ,  $w_2=1$ ,  $w_3=0.5$ ,  $w_4=0.5$ ,  $L_0=1.5$ ,  $L_1=1.7$ ,  $L_2=4.8$ ,  $L_3=3.4$ ,  $L_4=3$ ,  $L_5=3$ ,  $L_6=1.5$ ,  $L_7=4.4$ ,  $L_8=2.1$ ,  $L_9=3$ ,  $L_{10}=2$ ,  $L_{11}=3.5$ ,  $L_{12}=7.2$ ,  $L_{13}=9.4$ ,  $L_{14}=5.44$ ,  $L_{15}=3.35$ ,  $L_{16}=11.18$ ,  $L_{17}=10$ ,  $L_{18}=2$ ,  $L_{19}=3$ ,  $L_{20}=2$ ,  $L_{21}=3.3$ ,  $g_0=0.2$ ,  $g_1=0.2$ ,  $g_2=0.2$ ,  $g_3=0.1$  و همچنین  $g_4=0.1$ . لازم به‌ذکر است که این ابعاد، به‌منظور تحقق باندهای فرکانسی مد نظر یعنی 2.4-2.5 GHz و 5.15-5.35 GHz تعیین شده‌اند. روش محاسبه منطبق بر تحلیل‌های پارامتری به‌کمک مراجع [۵] و [۹] می‌باشد.



شکل ۱- پیکربندی نهایی فیلتر دوباندهی پوشیدنی پیشنهادی.

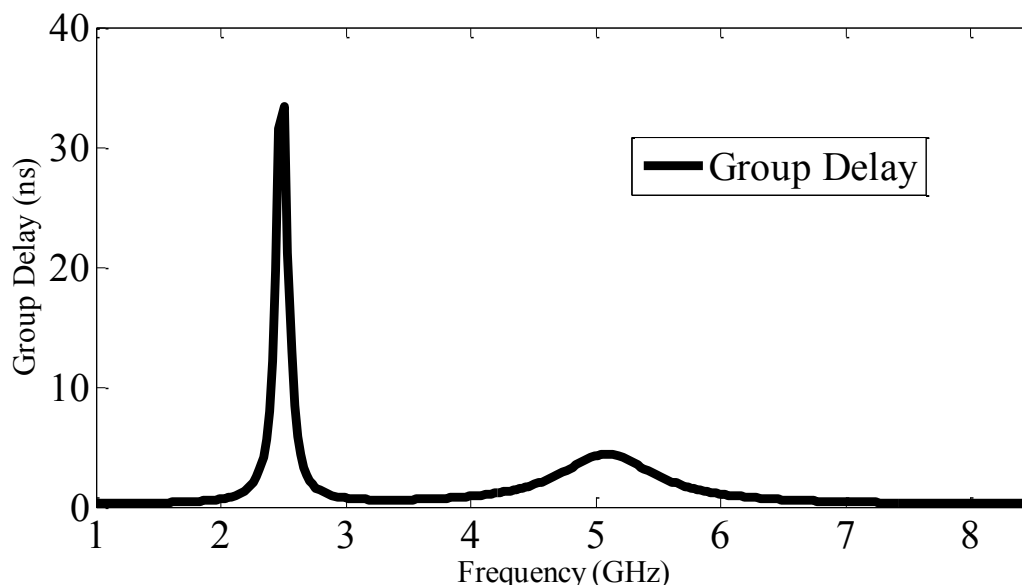
<sup>17</sup> Group Delay

پارامترهای پراکندگی<sup>۱۸</sup> فیلتر پیشنهادی ( $S_{21}$  و  $S_{11}$ )، در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، این فیلتر، به‌خوبی باندهای فرکانسی 2.4-2.5 GHz و 5.15-5.35 GHz از ISM را پوشش داده است. توجه گردد که شرط-های  $S_{21} > +0.5$  dB و  $S_{11} < -10$  dB برای تحقق باندهای فرکانسی مد نظر می‌باشد. مؤلفه‌ی مهم مورد بررسی دیگر، تأخیر گروه می‌باشد. این مشخصه به‌ازای فرکانس‌های مختلف در شکل ۳ نمایش داده است. مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تأخیر در فرکانس 2.4 GHz رخ داده که تنها برابر با 34.86 ns می‌باشد. لازم به‌ذکر است که این مقدار، برای کاربرد در فرکانس‌های میکروویوی، مقدار بسیار مطلوبی می‌باشد. در ادامه، چگونگی عملکرد تشدیدگرهای این فیلتر به‌منظور تحقق باندهای فرکانسی فوق، تشریح می‌گردد.



شکل ۲- پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی شده‌ی فیلتر دو بانده‌ی پوشیدنی پیشنهادی؛ (الف) باند فرکانسی اول و (ب) باند فرکانسی دوم.

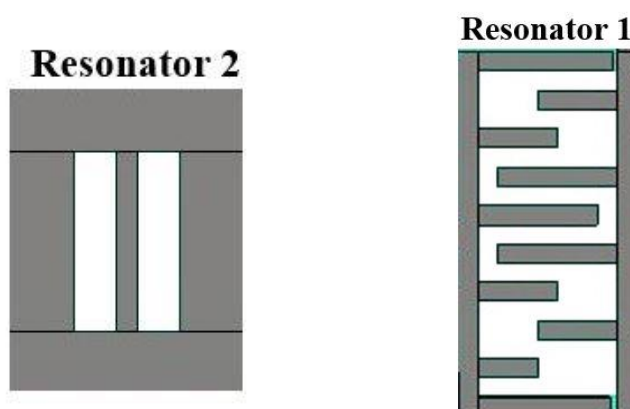
<sup>18</sup> Scattering Parameters (S-Parameters)



شکل ۳- تأخیر گروه فیلتر پوشیدنی دو باندهی پیشنهادی.

### ۳. تحلیل تشدیدگرهای فیلتر پوشیدنی پیشنهادی

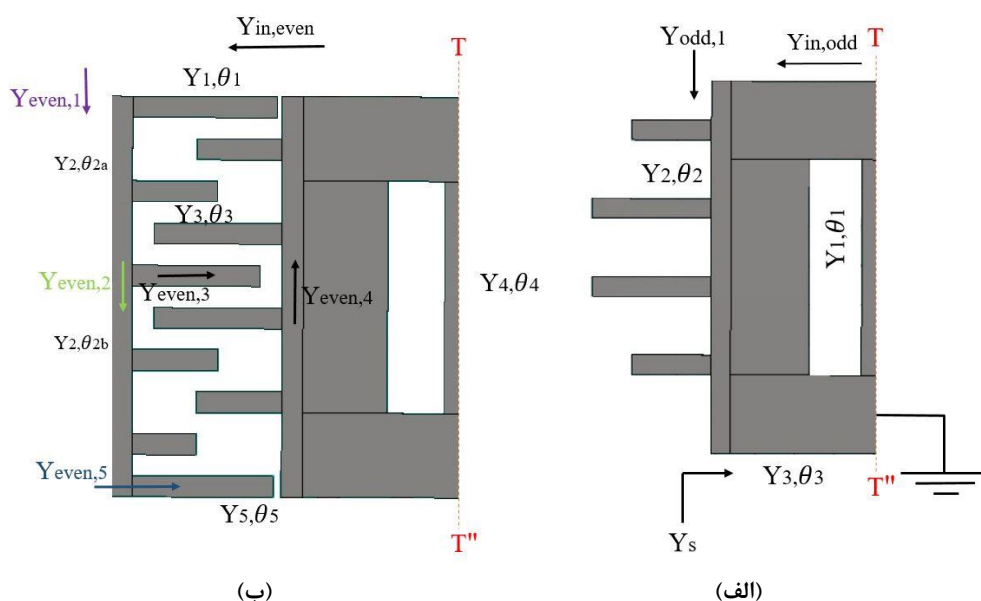
در این بخش، تشدیدگرهای به کار گرفته شده در راستای طراحی فیلتر پوشیدنی پیشنهادی بررسی و تحلیل خواهند شد. در شکل ۴، هر دو تشدیدگر پیشنهادی مورد استفاده، نشان داده شده‌اند. همانگونه که مشخص است، تشدیدگرهای ۱ و ۲ از نوع ریزنوار و پله‌ای می‌باشند. با توجه به بررسی‌هایی که در منبع [۵] در مورد تحلیل مدهای زوج و فرد<sup>۱۹</sup> انجام شده است، می‌توان دریافت که به آسانی و با تغییر کوچک در ابعاد تشدیدگرها، می‌توان فرکانس تشدید هر تشدیدگر را تنظیم نمود. در ادامه، با بررسی مد زوج و فرد، به گزارشی از یک تحلیل تئوری و نظری پرداخته می‌شود.



شکل ۴- تشدیدگرهای به کار برده شده در فیلتر پوشیدنی پیشنهادی.

در شکل ۵، نمایی از بخش‌های تشدیدگرها به منظور آماده‌سازی جهت تحلیل مد زوج و فرد ارائه شده است. شکل ۵-الف بیانگر مد زوج و شکل ۵-ب نیز معرف مد فرد ساختار پیشنهادی می‌باشد. با دقت در این شکل، مشاهده می‌گردد که ساختار تشدیدگرهای پیشنهادی، حول خط  $TT'$  ترسیم شده، متقارن هستند. بنابراین، می‌توان توسط روش تحلیل مد زوج و فرد، فرکانس‌های تشدید را مشخص نمود. حال در ادامه، تحلیل‌هایی به منظور بررسی این روش حل، ارائه می‌گردد.

<sup>19</sup> Even-Odd Mode Analysis



شکل ۵- (الف) مد فرد و (ب) مد زوج تشدیدگرهای پیشنهادی.

با دقت در شکل ۵-الف برای مد فرد، می توان نوشت:

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

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

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

برای مد زوج نیز بر مبنای شکل ۵-ب می توان بیان نمود:

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

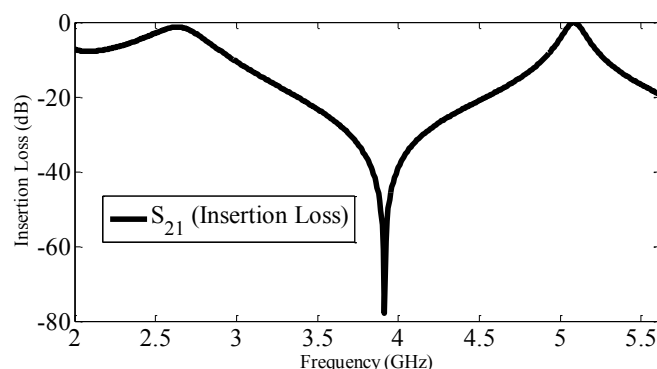
$$Y_{even,1} = Y_{even,2} + Y_{even,3} \quad (5)$$

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

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

با توجه به تحلیل‌ها و روابط بیان‌شده، فرکانس‌های تشدید مدهای زوج و فرد، با حل دو معادله  $Y_{in,even} = 0$  و  $Y_{in,odd} = 0$  به دست می‌آیند. ولی نکته‌ای قابل توجه آن است که با در مجاورت یکدیگر قرار گرفتن تشدیدگرها و استقرار آنها در کنار دیگر قسمت‌های فیلتر و در نتیجه، رخداد پدیده‌ی تزویج متقابل، در پایان نیاز به یک بهینه‌سازی نهائی نیز در ابعاد تشدیدگرها وجود دارد. این بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار CST انجام شده و ابعاد ارائه شده در قسمت قبل، به دست آمده است. اما در ابتدا تنها، این دو تشدیدگر در مجاورت یکدیگر، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با در نظر نگرفتن تزویج متقابل، پاسخ فرکانسی آنها برای مشخصه‌ی تلفات عبوری، مطابق شکل ۶ است. همانطور که مشاهده می‌شود، این دو بخش در کنار هم، توانایی ایجاد دو

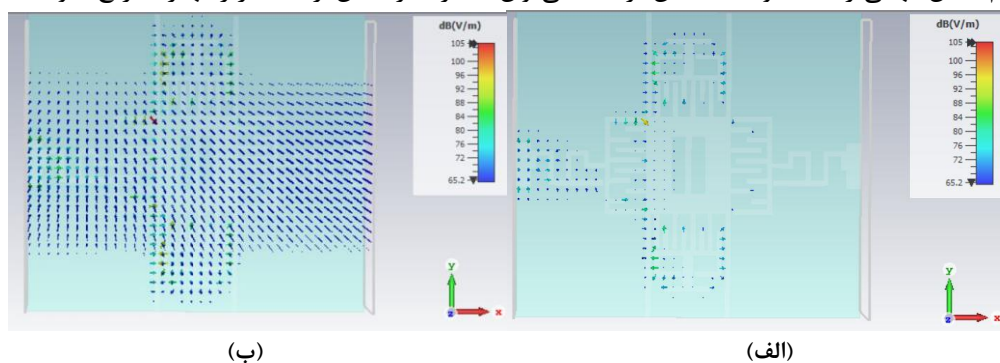
باند فرکانسی را دارند. دو تشدید ذکر شده در فرکانس‌های 2.6 GHz و 5.1 GHz به وجود آمده است. دلیل اصلی انتخاب این نوع از تشدیدگرها، آن است که بتوان با در مجاورت یکدیگر قرار دادن و به کار گیری مناسب از فضا، به کوچک‌ترین ابعاد ممکن نیز دست پیدا کرد.



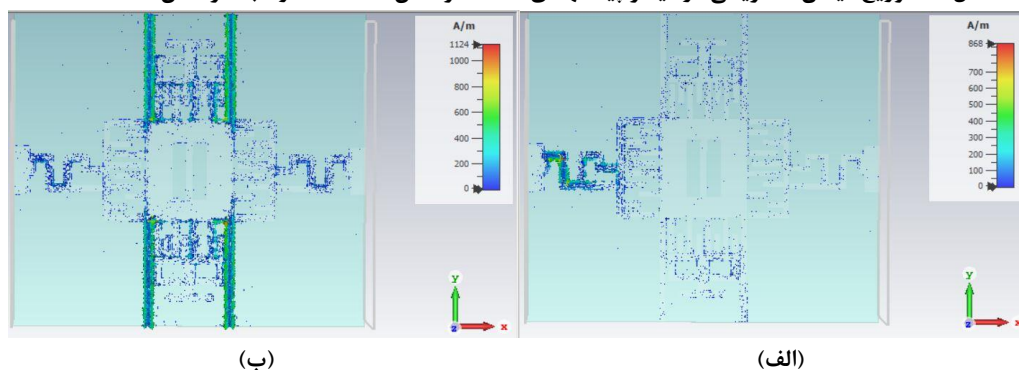
شکل ۶- تلفات عبوری تشدیدگرهای مورد استفاده به طور جداگانه.

#### ۴. بررسی توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان

در این بخش، به گزارش توزیع میدان الکتریکی و همچنین، چگالی جریان سطحی برای مشخص نمودن قسمت‌های مهم در ایجاد فرکانس‌های کار پرداخته می‌شود. در شکل ۷ توزیع میدان الکتریکی برای دو فرکانس 2.4 GHz و 5.25 GHz نمایش داده شده است. در شکل ۸، چگالی جریان برای دو فرکانس ذکر شده، گزارش گردیده است. با دقت در توزیع میدان الکتریکی، مشخص است که با تشکیل میدان بین تشدیدگرها، توزیع متقابل قابل توجهی حاصل گردیده که می‌تواند در راستای بهتر شدن پاسخ فرکانسی یا به تعبیری دیگر، بهتر شدن شرایط تلفات بازگشتی و تلفات عبوری، مفید واقع شود. اما با دقت در شکل ۸، مشاهده می‌گردد که تشدیدگر ۱ در راستای تشکیل باند فرکانسی اول و به اضافه‌ی آن، تشدیدگر ۲ برای ایجاد باند فرکانسی دوم، نقش مهمی را ایفا نموده‌اند. به این ترتیب، می‌توان عملکرد هر بخش از ساختار را بهتر تشریح نمود.



شکل ۷- توزیع میدان الکتریکی در فیلتر پیشنهادی؛ (الف) فرکانس 2.4 GHz و (ب) فرکانس 5.25 GHz.



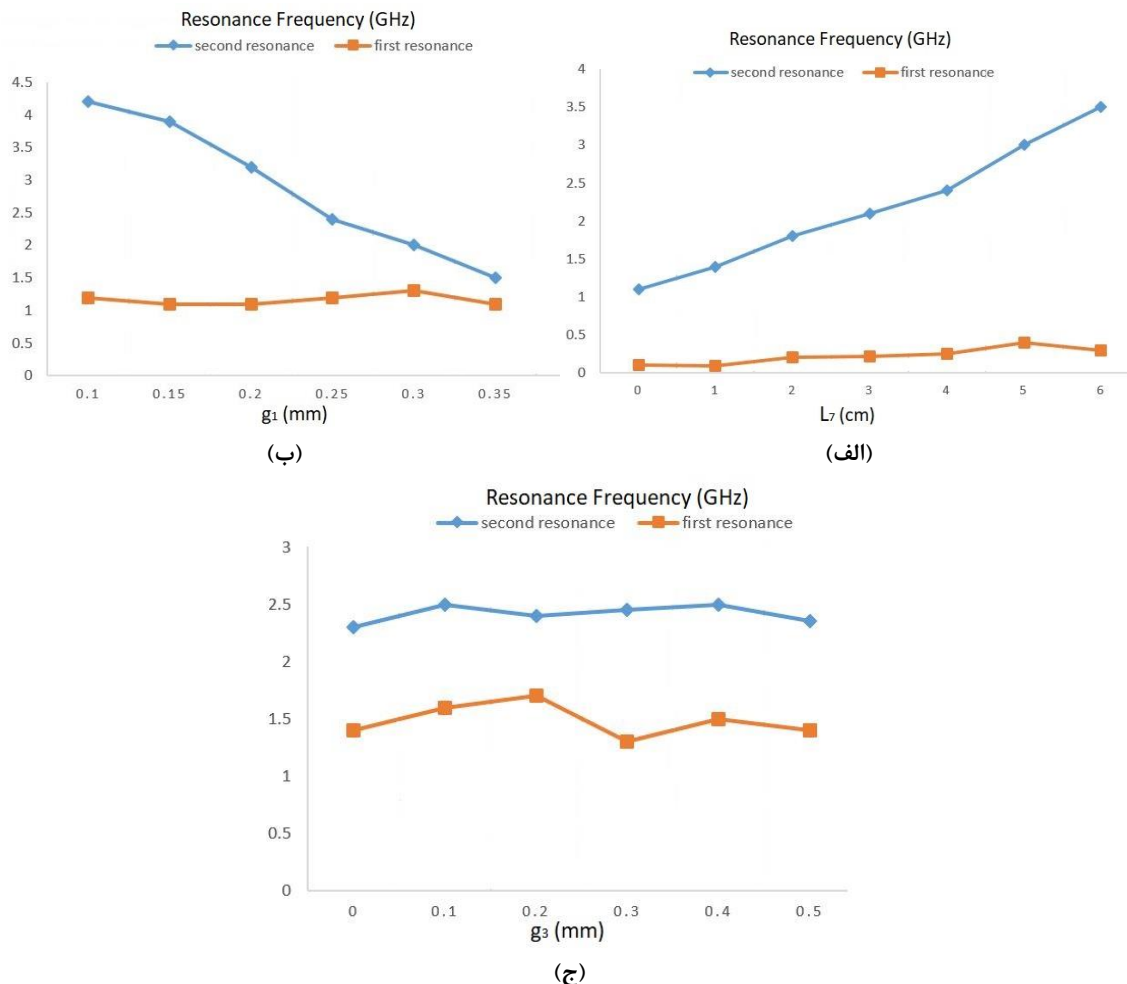
شکل ۸- توزیع چگالی جریان الکتریکی در فیلتر پیشنهادی؛ (الف) فرکانس 2.4 GHz و (ب) فرکانس 5.25 GHz.

## ۵. بررسی تغییرات پارامتری

در این بخش، به منظور ارائه‌ی توجیهات بیشتر در مورد رفتار فرکانسی فیلتر پیشنهادی و بررسی اثر بخشی هر یک از تشدیدگرها، چند گزارش پارامتری از اعمال تغییر در ابعاد و تفسیر اثر گذاشتن آن بر پارامترهای پراکندگی، ارائه می‌شود. توجه گردد که گزارش‌ها به گونه‌ای تنظیم و نرمالیزه شده‌اند که فرکانس اول در نزدیکی 1 GHz و فرکانس دوم نیز در نزدیکی 2 GHz رخ دهد.

در شکل ۹-الف، تأثیر تغییرات طول  $L_7$  بر محل فرکانس‌های تشدید اول و دوم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با تغییر بسیار کوچک در این پارامتر فرکانس تشدید دوم عوض شده و فرکانس تشدید اول، تقریباً ثابت می‌ماند. به عنوان دومین و سومین گزارش و در شکل‌های ۹-ب و ۹-ج، گزارشی از تأثیرات تغییر اندازه‌ی دو مقدار  $g_1$  و  $g_3$  بر فرکانس‌های تشدید ارائه شده است. با توجه به این گزارش‌ها، با تغییر اندازه‌ی  $g_1$  از 0.1 mm تا 0.35 mm، جای فرکانس تشدید اول به طور تقریبی می‌توان گفت ثابت می‌ماند، اما مکان فرکانس تشدید دوم، از فرکانس 4.2 GHz، به سمت فرکانس 1.5 GHz به صورت نزولی کاهش می‌یابد.

اما در شکل ۹-ج، اثر تغییرات بر اندازه‌ی  $g_3$  از 0 mm تا 0.5 mm را بر فرکانس‌های تشدید نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با این تغییر در این پارامترها، مکان فرکانس‌های تشدید اول و دوم به طور تقریبی می‌توان گفت ثابت هستند.



شکل ۹- بررسی گزارش پارامتری تغییر ابعاد بر فرکانس‌های تشدید؛ (الف) تغییرات، (ب) تغییرات و (ج) تغییرات.



## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک فیلتر پوشیدنی دو بانده برای عملکرد در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم و پوشش باندهای فرکانسی ISM و طراحی و شبیه‌سازی شده است. ابعاد این فیلتر برابر با  $29.4 \times 33.4 \text{ mm}^2$  بوده و از دو تشدیدگر برای ایجاد باندهای فرکانسی آن استفاده شده است. این فیلتر که دارای پاسخ فرکانسی مطلوب در هر دو باند تحت پوشش می‌باشد، دارای ویژگی‌های شایان ذکری از جمله ابعاد کوچک، تلفات بازگشتی و تلفات عبوری مناسب در باند و همچنین، تأخیر گروه کم می‌باشد.

## ۷. منابع و مراجع

1. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2<sup>nd</sup> Ed., Toronto: John Wiley & Sons, 1998.
2. D. M. Pozar and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.
3. F. Khajeh-Khalili, M. A. Honarvar, A. Dadgarpour, B. S. Virdee, and 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, Mar. 2019.
4. C. D. López, M. A. Mebarki, V. Desmaris, D. Meledin, A. B. Pavolotsky, and V. Belitsky, "Wideband Slotline-to-Microstrip Transition for 210–375 GHz Based on Marchand Baluns," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 307-316, May 2022.
5. J. Tang, H. Liu, and Y. Yang, "Compact Wide-Stopband Dual-Band Balanced Filter Using an Electromagnetically Coupled SIR Pair with Controllable Transmission Zeros and Bandwidths," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 11, pp. 2357-2361, Nov. 2020.
6. S. Amari, F. Seyfert, and M. Bekheit, "Theory of Coupled Resonator Microwave Bandpass Filters of Arbitrary Bandwidth," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 8, pp. 2188-2203, Aug. 2010.
7. Z. Qiao, X. Pan, F. Zhang, and J. Xu, "A Tunable Dual-Band Metamaterial Filter Based on the Coupling Between Two Crossed SRRs," *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 1-7, Jun. 2021.
8. G. Lin, Y. Dong, and X. Luo, "Miniaturized Quarter-Mode SIW Filters Loaded by Dual-Mode Microstrip Resonator with High Selectivity and Flexible Response," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 660-663, Jun. 2022.
9. I. Jadidi, M. A. Honarvar, and F. Khajeh-Khalili, "Compact tri-band microstrip filter for Bluetooth, WiMAX, and WLAN applications," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 91, pp. 241-252, Apr. 2019.
10. C. Chandan, S. Kaur, and R. K. Varshney, "High Quality Fano Resonance by Lattice Mode Coupling in Terahertz Metamaterials," in *proc. 2022 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP)*, 2022, pp. 1-2.
11. F. Khajeh-Khalili, A. Shahriari, and F. Haghshenas, "A simple method to simultaneously increase the gain and bandwidth of wearable antennas for application in medical/communications systems," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 13, no. 4, pp. 374-380 May 2021.

12. F. Khajeh-Khalili, F. Haghshenas, and A. Shahriari, "Wearable dual-band antenna with harmonic suppression for application in medical communication systems," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 126, pp. 1-8, Aug. 2020
13. F. Khajeh-Khalili and Y. Khosravi, "A novel wearable wideband antenna for application in wireless medical communication systems with jeans substrate," *The Journal of The Textile Institute*, vol. 112, no. 8, pp. 1266-1272, 2021.
14. Y. Tang, Q. Teng, L. Zhang, F. Min, and J. He, "Layer-Wise Training Convolutional Neural Networks with Smaller Filters for Human Activity Recognition Using Wearable Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 581-592, Jan. 2021.
15. D. Roggen, R. Cobden, A. Pouryazdan, and M. Zeeshan, "Wearable FPGA Platform for Accelerated DSP and AI Applications," in *proc. 2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, 2022, pp. 66-69.
16. T. L. Baldi, F. Farina, A. Garulli, A. Giannitrapani, and D. Prattichizzo, "Upper Body Pose Estimation Using Wearable Inertial Sensors and Multiplicative Kalman Filter," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 492-500, Jan. 2020.
17. Z. Duan, Y. -X. Guo, M. Je, and D. -L. Kwong, "Design and in Vitro Test of a Differentially Fed Dual-Band Implantable Antenna Operating at MICS and ISM Bands," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 5, pp. 2430-2439, May 2014.

## Design and Simulation of Flexible Wearable Dual-Band Filter with Felt Substrate for Use in Medical Systems

Bader Daryayi, Farzad Khajeh-Khalili

M.Sc., Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Beder@aut.ac.ir

Assistant Professor, Kian Institute of Higher Education, Shahin Shahr, Isfahan, Iran,  
khajehkhalili.edu@gmail.com

**Abstract**— In this paper, a wearable dual-band filter is designed and simulated to operate on ISM frequency bands. For this reason, in addition to recognizing the mentioned frequency bands, the design process of wearable filters has also been studied. In this regard, first, the desired characteristics of a filter are examined. These characteristics include scattering parameters ( $S$ -Parameters) and group delay. In the following and in explaining the objectives, by defining numerical values for these characteristics, the framework of the paper is determined. Since the subject of this article is the design of wearable filters, a substrate that has this capability should be used. In this regard, a flexible substrate with felt, thickness 1.4 mm, dielectric constant of 1.45, and  $\tan(\delta) = 0.001$  has been used. Using this dielectric, a proposed dual-band filter with dimensions of  $29.4 \times 33.4 \text{ mm}^2$  was designed. The frequency bands covered include 2.4-2.5 GHz and 5.15-5.35 GHz. These bands are standard values covered by ISM. At all operating frequencies, the conditions  $S_{11} < -10 \text{ dB}$  and  $S_{21} > +0.5 \text{ dB}$  are met.

**Key words:** Filter, Wearable, Felt, Resonator,  $S$ -parameters, Dielectric.