

# طراحی و شبیه‌سازی فیلتر پایین‌گذر با تلفات جایگذاری کم با استفاده از ساختار SISL

سعید دالوند<sup>۱</sup>      اکرم شیخی<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه لرستان

[dalvand.sa@fe.lu.ac.ir](mailto:dalvand.sa@fe.lu.ac.ir)

۲- دانشیار گروه مهندسی برق الکترونیک- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه لرستان

[sheikhi.a@lu.ac.ir](mailto:sheikhi.a@lu.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی یک فیلتر پایین‌گذر میکروویو با استفاده از رزوناتورهای نیم دایره‌ای و ساختارهای T شکل، استاب‌های مدار باز با بهره‌گیری از ساختار SISL<sup>۱</sup> ارائه شده است. این فیلتر بر روی زیرلایه‌های راجرز ۵۸۸۰ با استفاده از نرم افزارهای ADS و HFSS شبیه‌سازی شده است. فیلتر طراحی شده دارای تلفات جایگذاری بسیار کم و بهتر از ۰/۰۵dB، تلفات بازگشتی بهتر از ۱۸dB، فرکانس قطع برابر ۶/۴GHz، سطح تضعیف بهتر از ۲۲dB تا فرکانس ۲۰GHz، انتخاب‌پذیری مناسب و پهنای باند توقف گسترده می‌باشد. ویژگی خاص این فیلتر که آن را از فیلترهای متداول متمایز می‌نماید، عدم نیاز به جعبه محافظ تلفات تشعشعی و نصب سطحی آسان است که در کاهش وزن و ابعاد ساختار بسیار اهمیت دارد.

**واژه‌های کلیدی:** فیلتر پایین‌گذر، ساختار SISL، رزوناتور، استاب، کاواک

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.3.77

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اکرم شیخی

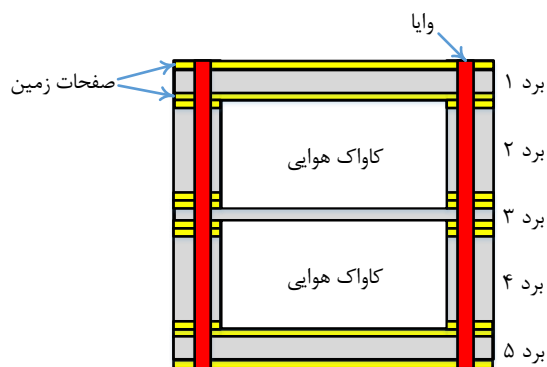
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - لرستان - خرم آباد - دانشگاه لرستان - دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه برق

## ۱- مقدمه

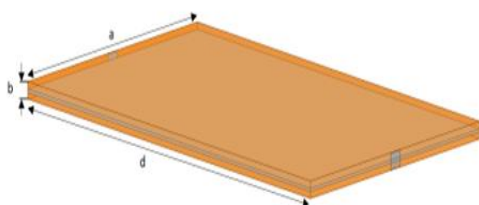
فیلترهای میکروویو [۱-۱۴] ادوات پسیوی هستند که به عنوان بخش جدایی ناپذیر مدارات و سیستم‌های میکروویو، وظیفه حذف هارمونیک‌های ناخواسته و همچنین جلوگیری از عبور سیگنال‌های ناخواسته در سیستم‌های مخابراتی را بر عهده دارند. از مشخصات مهم در طراحی فیلترها می‌توان به تلفات جایگذاری و برگشتی پایین، ابعاد کوچک، باند توقف گسترده و انتخاب‌پذیری بالا اشاره نمود. در دهه اخیر ساختارهای مختلفی برای پیاده سازی فیلترها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که یکی از جدیدترین آنها ساختار SISL می‌باشد. در [۱]، یک فیلتر پایین‌گذر با استفاده از فیلتر میان‌نگذر با فرکانس قطع ۲/۰۷GHz طراحی شده که این فیلتر دارای پهنای باند توقف نسبتاً مناسبی می‌باشد ولی از معایب این کار می‌توان به تلفات بازگشتی پایین آن اشاره نمود. فیلتر طراحی شده در [۲]، با فرکانس قطع ۳/۷۰GHz دارای پهنای باند توقف اندک و تلفات بازگشتی نامناسب است. فیلتر طراحی شده در [۳]، با فرکانس قطع ۳GHz طراحی شده و دارای تلفات کم و پهنای باند توقف مناسبی می‌باشد. فیلتر طراحی شده در [۴]، با فرکانس قطع ۲/۴۵ گیگاهرتز طراحی شده است که دارای تلفات و پهنای باند توقف گسترده می‌باشد. فیلترهای اشاره شده در بالا همگی با استفاده از ساختارهای قدیمی و تک لایه پیاده‌سازی شده‌اند که از مزایای ساختارهای SISL بی‌بهره هستند. این ساختار با توجه به حذف جعبه محافظ تلفات تشعشعی موجب کاهش چشمگیر وزن و ابعاد نهایی مدار و قابلیت مجتمع سازی می‌گردد. همچنین بهره‌گیری از این ساختار موجب کاهش تلفات جایگذاری، افزایش تلفات بازگشتی و کاهش تداخل الکترومغناطیسی ادوات میکروویو می‌گردد. از معایب فیلتر ارائه شده در [۶]، می‌توان به تلفات نامناسب آن اشاره نمود. فیلتر طراحی شده در [۷] با فرکانس قطع ۰/۱۲GHz نسبت به [۶] دارای تلفات بهتری می‌باشد ولی از معایب این فیلتر می‌توان به پهنای باند توقف باریک آن اشاره نمود. فیلتر طراحی شده در [۸] با فرکانس قطع ۴/۵GHz دارای پهنای باند توقف نامناسبی است. در این مقاله پیاده‌سازی فیلتر بر اساس ساختار SISL با توجه به مزایای گفته شده برای آن انجام گرفته است. ابتدا فیلتر تک لایه شبیه‌سازی و سپس در مراحل بعدی این فیلتر به صورت چندلایه بر روی زیرلایه راجرز ۵۸۸۰ پیاده‌سازی شده است. ابعاد کلی فیلتر نیز  $12/8 \times 16/67 \times 5/334 \text{ mm}^3$  می‌باشد که در مقایسه با ساختارهای متداول که از جعبه محافظ تلفات تشعشعی استفاده می‌کنند حجم و وزن بسیار پایین‌تری دارد. تلفات جایگذاری در حد بسیار مطلوب و بهتر از ۰/۰۵dB، تلفات بازگشتی بهتر از ۱۸dB، سطح تضعیف فیلتر بهتر از ۲۲dB، فرکانس قطع برابر ۶/۴GHz و پهنای باند توقف بیشتر از ۲۰GHz می‌باشد.

## ۲- ساختار خط انتقال SISL

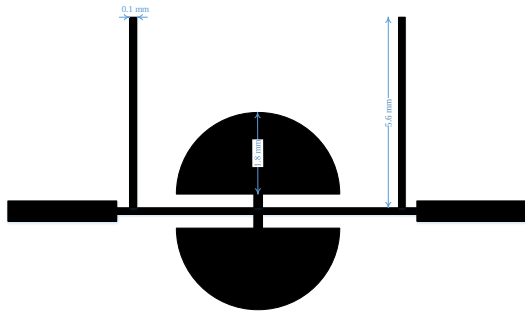
در طراحی ادوات میکروویو از خطوط انتقال مختلفی مانند خطوط استریپ، میکرواستریپ، موجبر و خطوط انتقال ترکیبی مانند SISL استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر فناوری‌های جدیدی در حال پیدایش هستند تا بتوانند قابلیت مجتمع‌سازی و نصب سطحی آسان را فراهم نمایند که ساختار SISL یکی از این ساختارها می‌باشد. ساختار SISL همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده از چند لایه تشکیل می‌شود که هر لایه اصلی یا مجزا متشکل از یک دی الکتریک و دو صفحه رسانا می‌باشد، فیلتر پایین‌گذر در لایه وسط پیاده سازی می‌شود که ساختار سه بعدی لایه وسط در شکل ۲ نشان داده شده است. در لایه‌های بالا و پایین لایه اصلی به اندازه ابعاد فیلتر برش ایجاد می‌شود که حفره‌های هوایی ساختار را تشکیل می‌دهند. همچنین صفحات رسانای کل ساختار از طریق وایا به همدیگر متصل می‌شوند. در این ساختار با توجه به اینکه خط انتقال میکرواستریپ بین وایاها و دیواره‌های رسانا محصور شده است تلفات عبوری و تشعشعی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. در این ساختار با توجه به اینکه نیازی به جعبه تلفات تشعشعی با ابعاد گسترده نسبت به طول موج ساختار نمی‌باشد، در کاهش حجم و وزن نهایی فیلتر و در نهایت سیستم‌های میکروویو تاثیر بسزایی دارد. همچنین این ساختار به دلیل حذف و تضعیف سیگنال‌ها و هارمونیک‌های ناخواسته برای کاربردهای پهن باند مناسب می‌باشد زیرا در کاربردهای پهن باند با فرکانس‌های بیشتر از ۲۰GHz هارمونیک‌های ناخواسته زیادی ایجاد می‌شود.



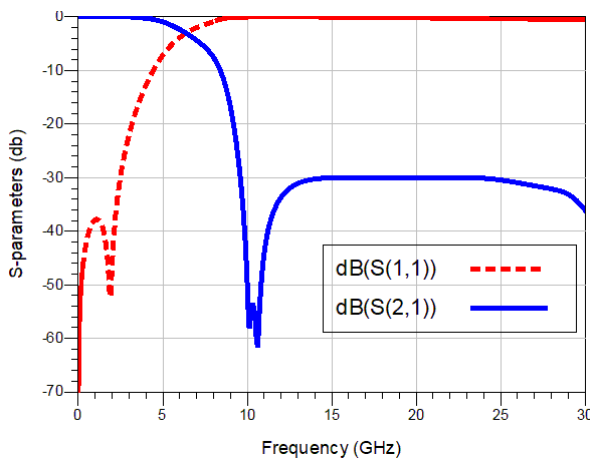
شکل(۱): شماتیک کلی از ساختار SISL



شکل(۲): شماتیک سه بعدی از لایه وسط ساختار SISL

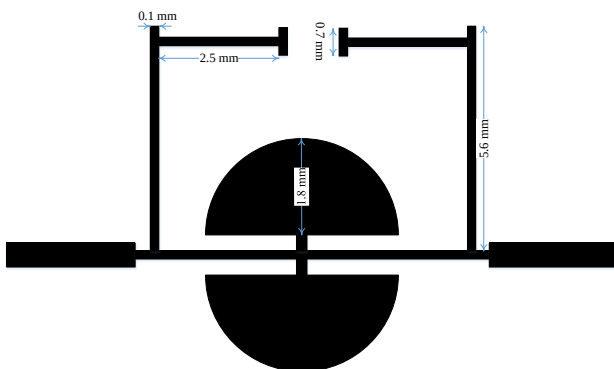


شکل (۳): شماتیک اولیه ساختار فیلتر پیشنهادی



شکل (۴): پارامترهای پراکندگی فیلتر اولیه در نرم افزار ADS

شکل ۴ نشان می‌دهد که این فیلتر دارای تلفات جایگذاری بسیار خوب در حد ۰/۰۲dB، تلفات برگشتی ۴۱/۹۵dB و سطح تضعیف بهتر از ۳۰dB می‌باشد. فرکانس قطع ۶/۴۴GHz، پهنای باند توقف بیشتر از ۳۰GHz و ولی انتخاب‌پذیری نامطلوب است. در ادامه برای بهبود انتخاب‌پذیری دو رزوناتور T شکل طبق شکل ۵ به فیلتر اضافه می‌گردد.



شکل (۵): شماتیک ساختار پیشنهادی پس از اضافه نمودن رزوناتورهای T شکل

در این ساختار به دلیل اینکه میدان‌ها از لایه وسط و از طریق شکاف های هوایی منتشر می‌شوند می‌بایست گذردهی الکتریکی این لایه از هوا بیشتر باشد، همچنین برای طراحی دقیق فیلتر SISL تعیین گذردهی الکتریکی موثر بسیار اهمیت دارد، زیرا انتخاب زیرلایه‌ای با گذردهی نامناسب به شدت بر روی پاسخ فیلتر تاثیر نامطلوب خواهد گذاشت [۹]. فرکانس رزونانس کاواک هوا یا حفره مستطیلی با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_{eff}}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (1)$$

که در آن  $f$  فرکانس تشدید،  $c$  سرعت نور،  $\mu_r$  نفوذپذیری نسبی،  $\epsilon_{eff}$  ضریب گذردهی موثر،  $a$ ،  $b$  و  $d$  ابعاد حفره هستند.  $n$  و  $l$  اعداد حالت فرکانس رزونانس هستند. ضریب گذردهی موثر از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\epsilon_{eff} = \frac{c^2}{4\pi^2 f^2 \mu_r} \left( \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2 \right) \quad (2)$$

همچنین فرکانس قطع ساختار فوق با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$f_c = \frac{c}{2a} \sqrt{1 - \frac{b}{H} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \right)} \quad (3)$$

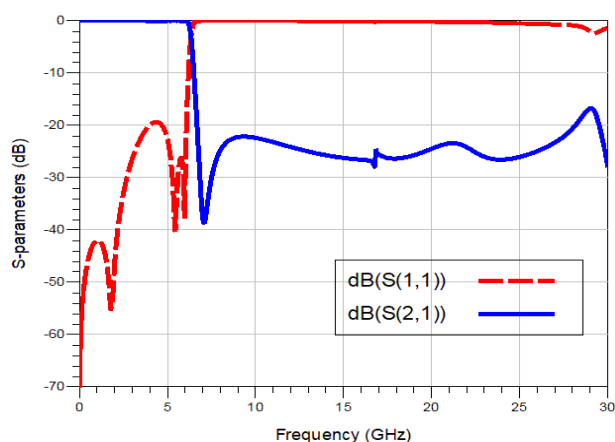
که  $c = 3 \times 10^8$  m/s،  $a$  عرض ساختار،  $b$  ارتفاع لایه سوم،  $H$  ارتفاع کاواک های هوای ساختار و  $\epsilon_r$  گذر دهی الکتریکی می‌باشند.

### ۳- طراحی فیلتر پایین گذر پیشنهادی

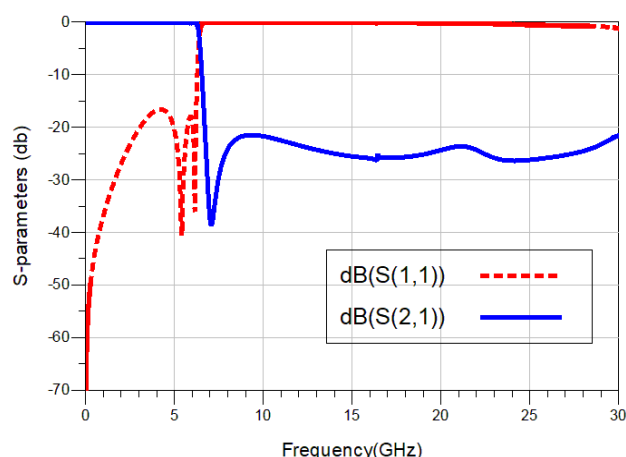
برای طراحی این فیلتر در گام نخست فیلتر را به صورت تک لایه بر روی زیرلایه راجرز ۵۸۸۰ با ضخامت ۰/۲۵۴mm که دارای گذردهی الکتریکی مناسب و تلفات پایین می‌باشد با استفاده از خطوط میکرواستریپ در نرم افزارهای ADS و HFSS طراحی و شبیه‌سازی می‌کنیم و سپس ساختار SISL در نرم افزار HFSS پیاده‌سازی خواهد شد.

#### ۳-۱- طراحی فیلتر تک لایه

در ابتدا از دو رزوناتور نیم دایره‌ای به شعاع ۱/۸ mm و دو استاب مدار باز به ارتفاع ۵/۶mm و عرض ۰/۱mm مطابق شکل ۳ برای طراحی فیلتر پایین گذر بهره می‌گیریم. نتایج شبیه سازی ساختار فیلتر اولیه در شکل ۴ مشاهده می‌گردد.



شکل (۹): پارامترهای پراکندگی فیلتر پایین گذر تک لایه در نرم افزار ADS



شکل (۶): پارامترهای پراکندگی فیلتر پس از اضافه نمودن رزوناتورهای T شکل

از شکل ۹ مشاهده می‌شود که ایجاد برش در دو نیم دایره موجب بهبود تلفات و انتخاب‌پذیری پاسخ می‌گردد. تلفات جایگذاری پیشنهادی برابر  $0.068\text{ dB}$ ، تلفات بازگشتی برابر با  $19.365\text{ dB}$ ، فرکانس قطع برابر  $6.33\text{ GHz}$ ، سطح تضعیف بهتر از  $22\text{ dB}$  و پهنای باند توقف بیشتر از  $30\text{ GHz}$  می‌باشد. مدار معادل فیلتر طراحی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ظرفیت سلفی و خازنی مدل ایده آل LC با استفاده از روابط (۴) تا (۵) محاسبه می‌شوند.

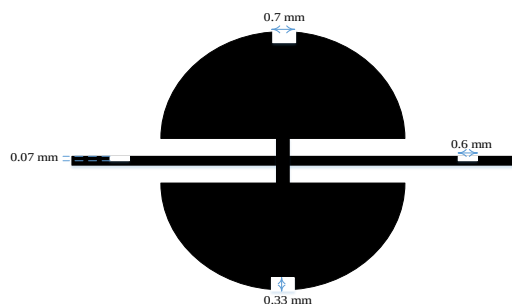
$$C = \frac{C_n}{R_o \omega_c} \quad (4)$$

$$L = \frac{R_o L_n}{\omega_c} \quad (5)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (6)$$

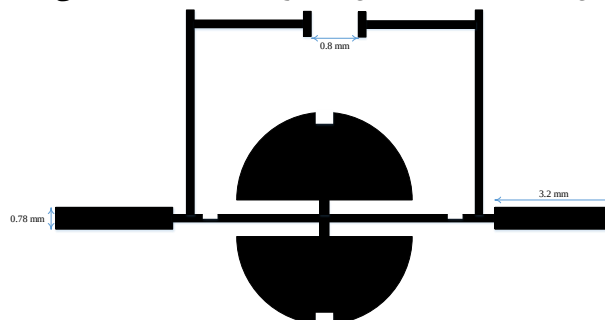
$R_o$  امپدانس مشخصه می‌باشد. با توجه به اینکه شبیه‌سازی در نرم افزار ADS در حالت ایده‌آل و زمین نامحدود انجام می‌گیرد نتایج نسبت به حالت واقعی تفاوت دارند. همچنین باتوجه به این نکته که شبیه‌سازی ساختار SISL در این نرم افزار امکان پذیر نبود فیلتر نهایی طراحی شده در بخش قبل را با نرم افزار HFSS در ابتدا به صورت تک لایه، مطابق شکل ۱۱ و در نهایت با استفاده از ساختار چند لایه SISL پیاده‌سازی کرده و نتایج حاصله را مورد بررسی و مقایسه قرار خواهیم داد. شبیه‌سازی همانند نرم افزار ADS بر روی زیرلایه راجرز  $5880$  با ابعاد  $12/8 \times 16/67 \times 0.254\text{ mm}^3$  انجام می‌گیرد.

نتایج نشان داده شده در شکل ۶ مشاهده می‌دهد که انتخاب‌پذیری پاسخ به میزان چشمگیری بهبود یافته است. همچنین تغییر ایجاد شده موجب افزایش تلفات و افت سطح تضعیف می‌گردد که نامطلوب است. تلفات جایگذاری برابر با  $0.1\text{ dB}$ ، تلفات برگشتی برابر با  $16.6\text{ dB}$ ، سطح تضعیف بهتر از  $21.5\text{ dB}$  و فرکانس قطع برابر  $6.4\text{ GHz}$  می‌باشد. در ادامه مطابق شکل ۷، برای بهبود تلفات و انتخاب‌پذیری فیلتر دو برش در رزوناتورهای نیم دایره‌ای و در طول خط ایجاد می‌شود.



شکل (۷): ایجاد برش در رزوناتورهای نیم دایره ای و در طول خط

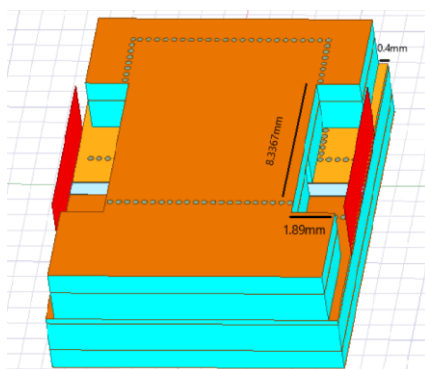
ساختار نهایی فیلتر تک لایه پس از تغییرات ایجاد شده در شکل ۸ نمایش داده شده است، همچنین پاسخ فرکانسی آن نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. ابعاد این ساختار  $12/8\text{ mm} \times 16/6\text{ mm} \times 0.254\text{ mm}$  می‌باشد.



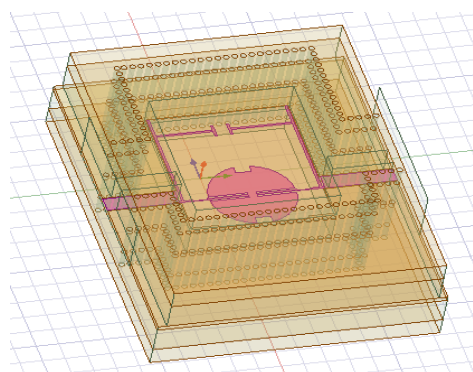
شکل (۸): ساختار نهایی فیلتر پایین گذر به همراه ابعاد آن

### ۲-۳ طراحی فیلتر به صورت چند لایه با استفاده از ساختار SISL

در این بخش با استفاده از فیلتر پایین‌گذر طراحی شده در بخش قبل و ساختار SISL به طراحی ساختار نهایی خود می‌پردازیم. برای طراحی پنج زیرلایه دی‌الکتریک از جنس راجرز ۵۸۸۰ که به ترتیب روی یکدیگر قرار گرفته‌اند با طول  $۱۲/۸\text{mm}$  و عرض  $۱۶/۶۷\text{mm}$  ایجاد می‌کنیم. ضخامت یا ارتفاع زیرلایه‌ها برای زیرلایه پنجم برابر  $۱/۰۱۶\text{mm}$ ، زیرلایه چهارم برابر  $۱/۵۲۴\text{mm}$ ، زیرلایه سوم برابر  $۰/۲۵۴\text{mm}$ ، زیرلایه دوم برابر  $۱/۵۲۴\text{mm}$  و زیرلایه اول برابر  $۱/۰۱۶\text{mm}$  می‌باشد. سپس مطابق شکل ۱۳ برای قرارگیری پورتهای موجبری برش‌هایی در طرفین خط انتقال با ابعاد مشخص شده صورت می‌گیرد. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده لایه‌های دوم و چهارم به اندازه ابعاد فیلتر از وسط برش داده می‌شوند تا حفره یا کاواک‌های هوایی ساختار را تشکیل دهند. لایه سوم یعنی لایه اصلی بین این دو لایه قرار می‌گیرد. ارتباط بین لایه‌ها از طریق وایاها برقرار می‌گردد. وایاها اتصالات عمودی بین لایه‌ها هستند که به منظور ساده‌کردن اتصال لایه‌ها استفاده می‌شوند.

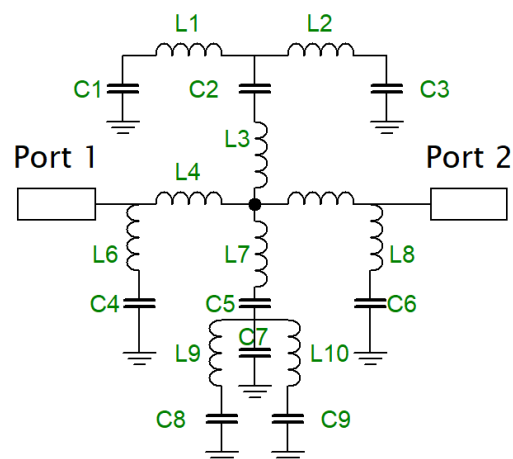


شکل (۱۳): شماتیک سه بعدی از ساختار SISL طراحی شده

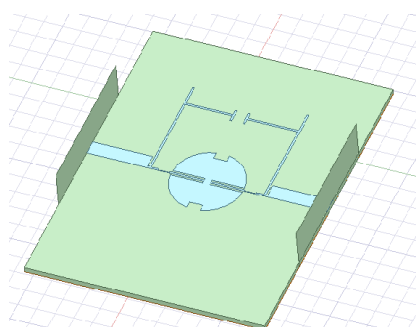


شکل (۱۴): شماتیک سه بعدی ساختار SISL با مشخص نمودن حفره های هوا و فیلتر پایین گذر

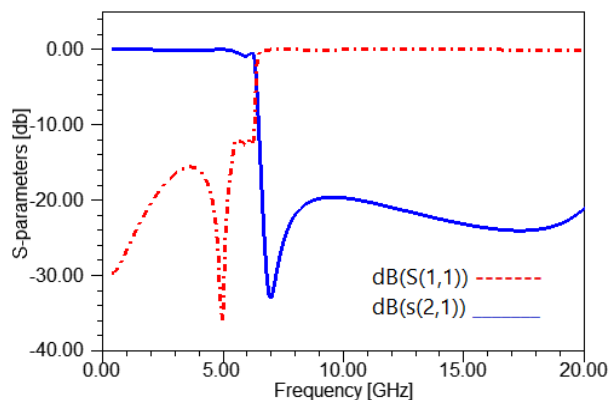
شماتیک کلی از لایه سوم و اصلی ساختار پیشنهادی که فیلتر بر روی آن پیاده‌سازی می‌شود در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل (۱۰): مدار معادل فیلتر طراحی شده



شکل (۱۱): شماتیک سه بعدی از ساختار تک لایه فیلتر پیشنهادی در نرم افزار HFSS



شکل (۱۲): پارامترهای پراکندگی ساختار تک لایه در نرم افزار HFSS

از شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد که تلفات عبوری برابر با  $۰/۳\text{dB}$ ، تلفات بازگشتی  $۱۲/۱۴\text{dB}$ ، فرکانس قطع  $۶/۳\text{GHz}$ ، سطح تضعیف بهتر از  $۲۰\text{dB}$  و پهنای باند توقف بیش از  $۱۲\text{GHz}$  می‌باشد. مشاهده می‌شود که تلفات فیلتر نسبت به نرم افزار ADS افزایش و سطح تضعیف مقدار اندکی کاهش پیدا نموده است.

همان گونه که از نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۷ مشخص است با تغییراتی که در حالت SISL نسبت به حالت تک لایه ایجاد شد می‌توان به بهبود تلفات عبوری به میزان  $0.25\text{dB}$ ، تلفات بازگشتی به میزان  $6\text{dB}$ ، سطح تضعیف  $2\text{dB}$  اشاره کرد. همچنین انتخاب پذیری پاسخ نیز به میزان جزئی کاهش یافته که قابل چشم پوشی می‌باشد.

دلیل تغییرات چشمگیر تلفات عبوری فیلتر توزیع امواج و میدان‌های الکتریکی به صورت همگن و یکنواخت می‌باشد که به دلیل وجود کاواک های هوا در ساختار می‌باشد. همچنین محصور بودن فیلتر بین لایه های متعدد و واپاهاست موجب کاهش انعکاس سیگنال و در نتیجه کاهش تلفات بازگشتی شده است. مهمتر از همه اینکه فیلتر پیشنهادی نیازی به جعبه محافظ برای کاهش تلفات تشعشعی ندارد بنابراین قابلیت نصب سطحی آسانی دارد که در کاهش وزن و ابعاد نهایی آن تاثیرگذار است. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین فیلتر پیشنهادی و برخی از کارهای پیشین آورده شده است.

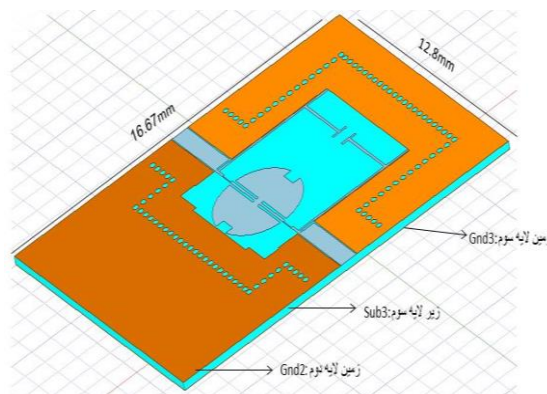
جدول (۱): مقایسه کار پیشنهادی با برخی کارهای پیشین

| تلفات برگشتی (dB) | تلفات جایگذاری (dB) | پهنای باند ناحیه توقف (GHz) | ساختار  | مراجع           |
|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------|-----------------|
| ۱۲/۸              | ۰/۸                 | ۱۰                          | تک لایه | [۱]             |
| ۱۰                | ۰/۴                 | ۴                           | تک لایه | [۲]             |
| ۱۷/۸              | ۰/۱۳                | ۱۶/۹                        | تک لایه | [۴]             |
| ۱۸                | ۰/۸۵                | ۱۷/۳۸                       | تک لایه | [۳]             |
| ۱۲                | ۰/۶۵۴۶              | ۱۰                          | SISL    | [۶]             |
| ۱۹/۵              | ۰/۳۲                | ۱/۹۲                        | SISL    | [۷]             |
| ۲۵                | ۲/۱۸                | ۶۶                          | SISL    | [۱۱]            |
| ۱۵                | ۰/۹                 | ۱۰                          | تک لایه | [۱۲]            |
| ۱۷                | —                   | ۴/۵                         | SISL    | [۸]             |
| ۱۸                | ۰/۰۵                | ۲۰                          | SISL    | ساختار پیشنهادی |

همان گونه که نتایج در جدول نشان می‌دهد فیلتر پیشنهادی دارای پهنای باند توقف گسترده و تلفات جایگذاری بسیار کم نسبت به کارهای پیشین می‌باشد، تلفات برگشتی دارای مقدار مناسب است. با توجه به حذف جعبه در ساختار پیشنهادی برای کاهش تلفات تشعشعی، این فیلتر دارای ابعاد بسیار کمتری نسبت به ساختارهای دیگر می‌باشد.

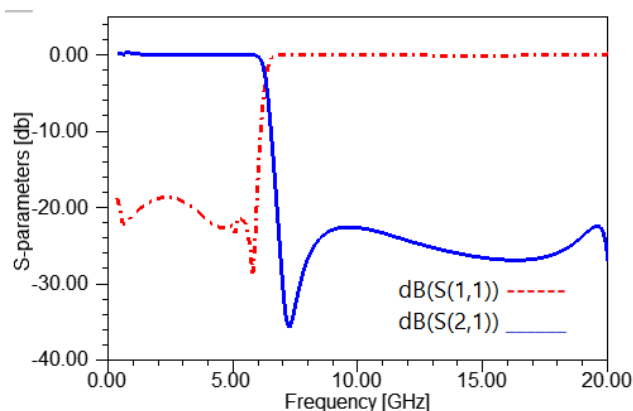
#### ۴- نتیجه گیری

همان گونه که مشاهده شد استفاده از ساختار SISL نسبت به ساختارهای رایج در طراحی مدارات میکروویو موجب کاهش چشمگیر در ابعاد نهایی، بهبود تلفات و قابلیت مجتمع سازی می‌گردد. هرچند

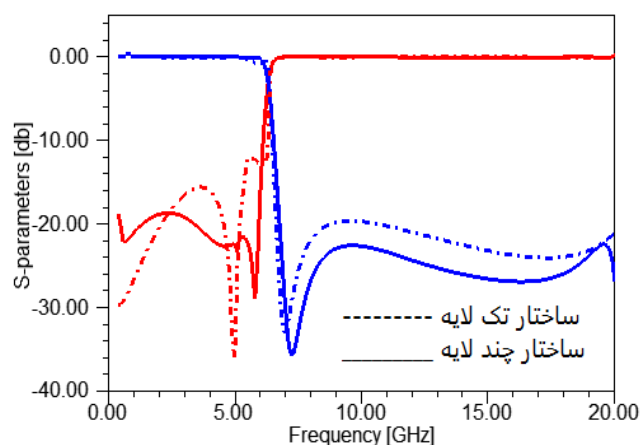


شکل (۱۵): شماتیک سه بعدی از لایه سوم

در شکل ۱۶ پاسخ فرکانسی ساختار SISL مشاهده می‌گردد. از نتایج مشاهده می‌شود که تلفات جایگذاری در حد مطلوبی و بهتر از  $0.05\text{dB}$  می‌باشد، تلفات بازگشتی بهتر از  $18\text{dB}$ ، سطح تضعیف فیلتر بهتر از  $22\text{dB}$ ، فرکانس قطع برابر  $6.4\text{GHz}$  انتخاب پذیری مناسب و پهنای باند توقف نیز بسیار گسترده می‌باشد.



شکل (۱۶): پارامترهای پراکندگی فیلتر با ساختار SISL



شکل (۱۷): پارامترهای پراکندگی فیلتر با ساختار تک لایه و ساختار SISL



[۸]. Grant, Karber. "Spurious Suppression Techniques In Integrated and Embedded Microwave Components", Oklahoma University 2021.

[۹] دالوند، س. (۱۴۰۱)، "طراحی فیلتر پایین گذر چند لایه با ساختارهای SISL"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان، خرم آباد.

[۱۰]. Priyanka jain, Shubhi jain, Manish jain, Harshal Nigam, "Low pass filter using metamaterial", Mater. Today, Vol. 66, pp. 3582-3585, 2022.

[۱۱]. Haiyang Zhang, Yongqiang Wang, Kaixue Ma, "A compact low-pass filter using a miniaturized capacitor and honeycomb cavity on substrate integrated suspended line platform", Microw. Opt. Technol. Lett., pp. 1843-1849, Jul. 2023.

[۱۲]. Deepti Gupta, Abhay Goyal, Hemant Parihar, Aastha Garg & P. K. Singhal, "Improved Design of Microstrip Low Pass Filter by Using Numerous Metamaterial Patterns", SPRINGER Evolution in Signal Processing and Telecommunication Networks, pp 127-139. 2024.

[۱۳] نوری تبار، علیرضا. شمسی، حسین. احمدی، سید آرشد. "طراحی و

ساخت فیلتر پایین گذر مایکرواستریپ فشرده با باند گذار تیز و فاکتور توقف بالا. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران". ۱۴ (۲): ۵۷-۶۴

[۱۴] جاوید، حجت اله، بنایی، علی. فردمنش، مهدی. شوبرت یورگن، بنزن

مارکو. "طراحی و ساخت فیلتر میانگذر باند باریک مایکرواستریپ ابررسانا". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۸؛ ۶ (۲): ۱۹-۲۴.

می‌توان با بهره‌گیری از ساختار SISL و ادغام آن با فرامواد و ابررساناها در طراحی ادوات میکروویو به ابعاد کوچکتری نیز دست پیدا کرد [۱۴]. فیلتر پیشنهادی در این پژوهش دارای ابعاد و تلفات مناسب، سطح تضعیف خوب و پهنای باند توقف گسترده می‌باشد. هدف اصلی از این مقاله مشخص نمودن مزایای ساختار SISL در مقایسه با ساختارهای متداول در طراحی فیلترهای پایین‌گذر می‌باشد که تغییرات ایجاد شده در پاسخ فرکانسی صحت ادعای فوق را تایید می‌کند. از ویژگی‌های فیلتر پایین‌گذر طراحی شده می‌توان به تلفات جایگذاری بسیار کم  $0.5\text{dB}$  و پهنای باند توقف گسترده بیشتر از  $20\text{GHz}$  و همچنین سطح تضعیف بهتر از  $20\text{dB}$  اشاره نمود. فیلتر پیشنهادی با توجه به وزن سبک و ابعاد کوچک و مزایایی که دارد برای کاربرد در صنایع نظامی، مخابراتی، هواشناسی و صداوسیما مناسب می‌باشد.

## مراجع

[۱]. Maoyu Fan, Kaijun Song, and Yong Fan: "Reconfigurable Low-Pass Filter With Sharp Roll-Off and Wide Tuning Range", IEEE Microw. Wirel. Compon, pp. 649-652. July 2020.

[۲]. Cox's Bazar, Bangladesh: "A Quasi-Elliptic Low Pass Filter Based On Complementary Split Ring Resonator With Sharp Selectivity and Wide Stopband", IEEE Microw. Wirel. Compon, pp. 260-263. February 2017.

[۳]. Lalit Kumar, Manoj Singh Parihar: "Compact Hexagonal Shape Elliptical Low Pass Filter With Wide Stop Band", IEEE Microw. Wirel. Compon, pp. 978-980. Dec 2016.

[۴]. Liguozhou, Zhihe Long, Hui Li, Tianliang Zhang, and Man Qiao: "Design of an Ultrawide Stopband HTS LPF Based on Interdigital Hairpin Structure", IEEE Microw. Wirel. Compon, pp. 666-668. Aug 2018.

[۵]. Qijuan He, Changjun Liu: "A Novel Low-Pass Filter with an Embedded Band-Stop Structure for Improved Stop-Band Characteristics", IEEE Microw. Wirel. Compon, pp. 890-893. Oct 2009.

[۶]. Jay W. McDaniel, Shahrokh Saeedi, Mark B. Yeary, Fellow, and Hjalti H. Sigmarsson: "A Low-Loss Fully Board-Integrated Low-Pass Filter Using Suspended Integrated Strip-Line Technology", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., Vol. 8, pp. 1948 - 1955, Nov. 2018.

[۷]. Yongqiang Wang, Ming Yu, Kaixue Ma: "A Compact Low-Pass Filter Using Dielectric-Filled Capacitor on SISL Platform", IEEE Microw. Wirel. Compon, vol. 31, pp. 21-24. Jan. 2021.

<sup>1</sup> Substrate Integrated Suspended Line