

روشی سریع برای طراحی فیلترهای مایکروویو مبتنی بر روش پارامترهای S با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات

ریحانه احمدی ونهری^۱، احمد بخت افروز^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، ۲- استادیار گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
دریافت: (۹۸/۰۲/۰۴)؛ پذیرش: (۹۸/۰۷/۰۲)

چکیده

در این مقاله یک روش دقیق و مناسب برای طراحی فیلترهای موج‌بری مایکروویو مبتنی بر پارامترهای S با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ارائه شده است. از آنجایی که برای طراحی کل ساختار فیلتر تنها مشخصات تمام موج بخشی از فیلتر (یک بلوک سازنده آن) مورد نیاز است، روش پیشنهادی بسیار سریع است. در اینجا از سه الگوریتم بهینه‌سازی متفاوت شامل الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ازدحام ذرات کوانتومی (QPSO) برای به دست آوردن پاسخ فیلتری مناسب استفاده شده و عملکرد آن‌ها در طراحی فیلتر با یکدیگر مقایسه شده است. صحت سنجی این روش از طریق شبیه‌سازی تمام موج با نرم‌افزار CST برای فیلترهای دارای post، روزنه سلفی (iris) و صفحه E (Eplane) به ترتیب در باندهای فرکانسی Ku، X و W مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی

فیلترهای موج‌بری مایکروویو، روش پارامترهای S، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی ازدحام ذرات کوانتومی، بهینه‌سازی چند هدف

۱. مقدمه

در این مقاله، از یک روند طراحی مناسب مبتنی بر مشخصات تمام موج فیلتر استفاده شده است. در روش پیشنهادی، تنها بخش کوچکی از فیلتر (یک بلوک سازنده) باید شبیه‌سازی شود. نکته‌ای که در این روش در نظر گرفته می‌شود این است که بیش‌تر فیلترهای موج‌بری مایکروویو از دو بلوک سازنده اصلی تشکیل شده‌اند (شکل (۱)). یک بلوک متغیر، که در واقع موج‌بری با یک ناپیوستگی درون آن است و یک بلوک ثابت که بخشی از یک موج‌بر می‌باشد. این تقسیم‌بندی موجب می‌شود که زمان شبیه‌سازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. از آنجایی که پارامترهای S بلوک ثابت (بخش موج‌بری) به‌صورت تحلیلی قابل محاسبه است، تنها پارامترهای S بلوک متغیر باید تعیین شود. با استفاده از روش ماتریس انتقال می‌توان پارامترهای S کل فیلتر که مجموعه‌ای سری از این دو بلوک اصلی می‌باشد را تعیین نمود. برای طراحی مناسب متغیرهای فیلتر به‌منظور رسیدن به پاسخ فرکانسی مطلوب، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در اینجا، سه الگوریتم بهینه‌سازی (ژنتیک [۱۲-۷] (GA)، ازدحام ذرات [۱۵-۱۳] (PSO) و ازدحام ذرات کوانتومی [۱۶-۱۹] (QPSO)) به‌کاررفته و عملکرد آن‌ها در طراحی فیلتر

فیلترها در جداسازی یا جمع سیگنال‌ها، شبکه‌های تطبیق امپدانس، شبکه‌های تاخیردهنده زمانی و ساختارهای کندکننده موج به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. روش‌های متداول طراحی فیلترهای مایکروویو مبتنی بر مدل‌های مدار معادل می‌باشد [۲]. مشکل این روش‌ها عدم قطعیت در مدل مداری برای هر بلوک سازنده فیلتر است. در فرکانس‌های موج میلی‌متری، ضخامت محدود ناپیوستگی‌های درون موج‌بر و برهم‌کنش مدهای مرتبه بالاتر بین آن‌ها اهمیت بسیاری دارد. بنابراین، نادیده گرفتن آن‌ها در روند طراحی اثر نامطلوبی در پاسخ فرکانسی فیلتر خواهد داشت [۳-۴].

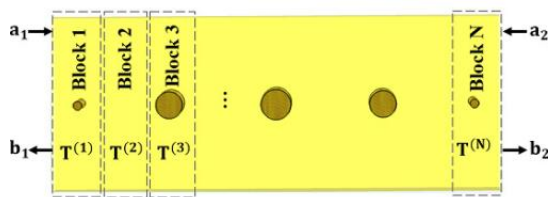
برای رفع این مشکل، لازم است طراحی بر اساس تحلیل‌های تمام موج فیلتر انجام شود. به‌عنوان یک روش مستقیم، می‌توان از تحلیل‌های تمام موج کل ساختار فیلتر به همراه یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده نمود [۵-۶]. این روش با وجود دقیق بودن زمان‌بر است. زیرا در هر بار تکرار فرآیند بهینه‌سازی، لازم است کل ساختار فیلتر با یک روش عددی تحلیل شود.

مدهای مرتبه بالاتر نیز در طول موج پراکنده، اما به تدریج با عبور از درون موج پراکنده می‌شوند. در صورتی که یک فاصله محدود در دو طرف هر ناپیوستگی در نظر گرفته شود، قطعاً مدهای مرتبه بالاتر پس از عبور از این فاصله می‌شوند. بنابراین، با در نظر گرفتن این فاصله در تحلیل‌ها می‌توان با تقریب خوبی تنها اثر اولین مد غالب را نظر گرفت. در اینجا بلوک اول شامل یک ناپیوستگی به همراه فاصله اندکی در دو طرف آن و بلوک دوم به‌عنوان یک بخش موج پراکنده با طول محدود در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲) تقسیم‌بندی سه نوع فیلتر ذکر شده را بر اساس بلوک‌های سازنده آن نشان می‌دهد. بلوک‌های شماره فرد در شکل (۲) از نوع بلوک سازنده اول و بلوک‌های شماره زوج از نوع دوم هستند.

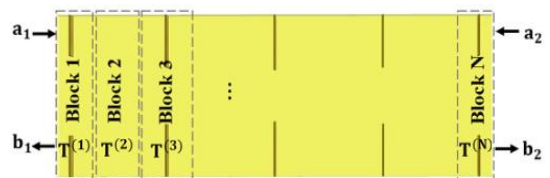
۲-۲. محاسبه پارامترهای S هر بلوک

یک روش دقیق و سریع برای تعیین پارامترهای پراکندگی، شبیه‌سازی یک بلوک سازنده به ازای مقادیر مختلفی از ابعاد ناپیوستگی به‌عنوان متغیر مسئله و یافتن پارامترهای پراکندگی اولین بلوک سازنده به ازای تمام مقادیر ممکن با استفاده از یک روش درون‌یابی می‌باشد. برای فیلترهای میکروویو شکل (۱)، متغیرهای مورد نظر مسئله (ابعاد ناپیوستگی) به ترتیب شعاع post، پهناي iris و طول صفحات فلزی درونی می‌باشد.

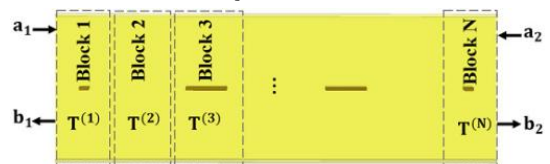
پارامترهای S بلوک سازنده دوم که شامل بخش موج پراکنده با طول محدود t می‌باشد به‌صورت تحلیلی با استفاده از تئوری خط انتقال طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است.



شکل (الف) فیلتر post



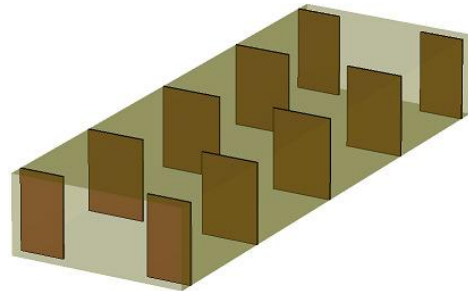
شکل (ب) فیلتر iris



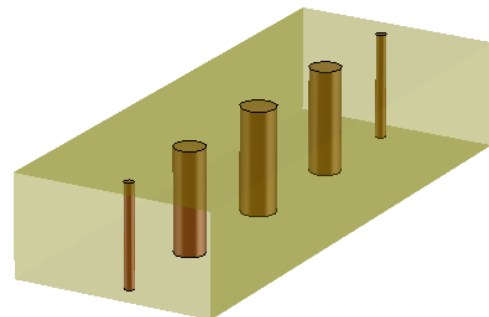
شکل (ج) فیلتر صفحه E

شکل (۲): تقسیم‌بندی فیلتر موج پراکنده به بلوک‌های سازنده آن.

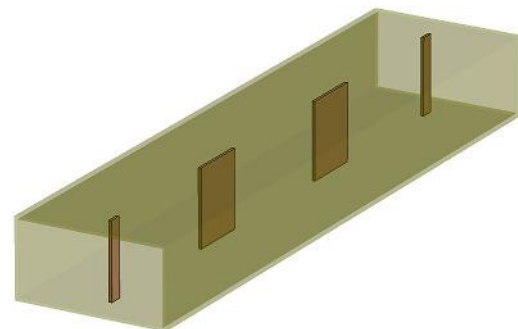
موج پراکنده بررسی شده است. در بخش ۲ مقاله تئوری طراحی فیلتر مبتنی بر روش پارامترهای S توضیح داده می‌شود. سپس در بخش ۳ از این روش برای طراحی سه نوع فیلتر میکروویو متفاوت (Eplane و iris, post) در باندهای فرکانسی Ku, X و W به همراه سه الگوریتم بهینه‌سازی شده، استفاده می‌شود. مقایسه بین این الگوریتم‌ها در بخش ۴ مقاله صورت گرفته و در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری نهایی از این پژوهش ارائه شده است.



شکل (الف) فیلتر iris



شکل (ب) فیلتر post



شکل (ج) فیلتر صفحه E

شکل (۱): سه نوع فیلتر موج پراکنده میکروویو

۲. روند طراحی

۲-۱. تقسیم‌بندی فیلتر به بلوک‌های متفاوت

به‌طور کلی فیلترهای موج پراکنده از دو بلوک سازنده اصلی (ناپیوستگی‌ها و بخش موج پراکنده) تشکیل شده‌اند. پس از تحریک موج پراکنده با مد اصلی آن، به محض برخورد میدان به ناپیوستگی،

S_{21} فیلتر می‌باشد. در این مقاله تابع هدف به صورت رابطه (۶) در نظر گرفته می‌شود [۲۲-۲۳].

$$F = \sum_{v=1}^{v_{stop}} \left\{ \frac{|S_{21,s,max}(dB)|}{|S_{21}(f_v)(dB)|} \right\}^2 + \sum_{v=1}^{v_{pass}} \left\{ \frac{|S_{21}(f_v)(dB)|}{|S_{21,p,min}(dB)|} \right\}^2 \quad (۶)$$

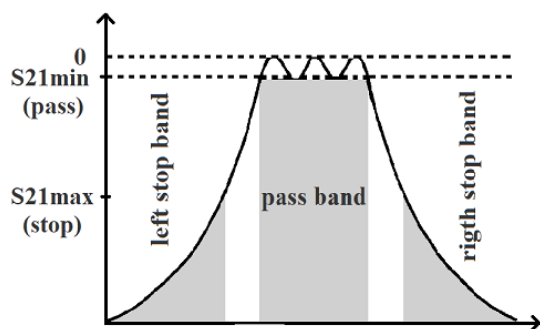
که در آن، f_v نقطه نمونه برداری فرکانسی، v_{pass} و v_{stop} تعداد نقاط نمونه برداری به ترتیب در باندهای توقف و عبور می‌باشند. $S_{21,s,max}$ و $S_{21,p,min}$ به ترتیب حداکثر تلفات عبوری باند توقف و حداقل تلفات عبوری باند عبور هستند.

هدف از بهینه‌سازی کمینه‌سازی تابع هدف می‌باشد (شکل (۳)). تابع خطای فوق یک تابع تک هدف است. به این معنی که در آن تنها S_{21} در نظر گرفته شده است. اما از آنجایی که بسیاری از مسائل چند هدف هستند به طوری که در آن‌ها لازم است چند پارامتر به طور هم‌زمان بهینه شوند، تابع خطای چند هدف تعریف می‌شود [۱۱]. در طراحی فیلتر بهتر است هر دو پارامتر S_{21} و S_{11} را در نظر گرفته و هر دو را هم‌زمان بهینه نماییم. بنابراین، می‌توان یک تابع هدف دیگر برای بهینه‌سازی S_{11} تعریف کرد و سپس این دو تابع را با یک ضریب وزنی مناسب با یکدیگر جمع نمود. تابع هدف نهایی می‌تواند به صورت رابطه (۷) تعریف شود.

$$F = w_1 \left(\sum_{v=1}^{v_{stop}} \left\{ \frac{|S_{21,s,max}(dB)|}{|S_{21}(f_v)(dB)|} \right\}^2 + \sum_{v=1}^{v_{pass}} \left\{ \frac{|S_{21}(f_v)(dB)|}{|S_{21,p,min}(dB)|} \right\}^2 \right) + w_2 \left(\sum_{v=1}^{v_{pass}} \left\{ \frac{|S_{11,p,max}(dB)|}{|S_{11}(f_v)(dB)|} \right\}^2 + \sum_{v=1}^{v_{stop}} \left\{ \frac{|S_{11}(f_v)(dB)|}{|S_{11,s,min}(dB)|} \right\}^2 \right) \quad (۷)$$

در اینجا w_1 و w_2 هر دو برابر یک در نظر گرفته شده‌اند.

در ادامه سه الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن پاسخ فرکانسی مناسب در فیلتر مورد بررسی قرار می‌گیرند. این الگوریتم‌ها عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات کوانتومی (QPSO).



شکل (۳): S_{21} فیلتر در باندهای توقف و عبور.

$$(S^{wg}) = \begin{pmatrix} 0 & e^{-jk_z t} \\ e^{-jk_z t} & 0 \end{pmatrix} \quad (۱)$$

k_z ضریب انتشار می‌باشد.

۳-۲. به دست آوردن ماتریس S کل فیلتر

به طور کلی می‌توان گفت که هر فیلتر از تعدادی از این بلوک‌های سازنده که به صورت متوالی پشت سرهم قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. بنابراین، پارامترهای پراکنندگی نهایی کل ساختار فیلتر با استفاده از روش ماتریس انتقال تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، اگر دو بلوک با ماتریس‌های $S^{(1)}$ و $S^{(2)}$ سری شده باشند، پارامترهای S کل سیستم به صورت روابط (۵-۲) محاسبه می‌شود.

$$S_{11}^{total} = S_{11}^{(1)} + S_{12}^{(1)} \cdot [(U) - S_{11}^{(2)} S_{22}^{(1)}]^{-1} S_{11}^{(2)} S_{21}^{(1)} \quad (۲)$$

$$S_{12}^{total} = S_{12}^{(1)} \cdot [(U) - S_{11}^{(2)} S_{22}^{(1)}]^{-1} S_{12}^{(2)} \quad (۳)$$

$$S_{21}^{total} = S_{21}^{(2)} \cdot [(U) - S_{22}^{(1)} S_{11}^{(2)}]^{-1} S_{21}^{(1)} \quad (۴)$$

$$S_{22}^{total} = S_{22}^{(2)} + S_{21}^{(2)} \cdot [(U) - S_{22}^{(1)} S_{11}^{(2)}]^{-1} S_{22}^{(1)} S_{21}^{(2)} \quad (۵)$$

که در آن، U ماتریس یکانی می‌باشد. برای تعیین پارامترهای پراکنندگی یک فیلتر شامل N بلوک، از روابط فوق استفاده می‌شود. به این صورت که ابتدا بلوک ۱ ($S^{(1)}$) و بلوک ۲ ($S^{(2)}$) را در نظر گرفته و پارامترهای $S^{(total)}$ نهایی محاسبه می‌شود. در گام دوم $S^{(total)}$ و $S^{(3)}$ به صورت دو بلوک سری در نظر گرفته می‌شوند و این روند تا آنجایی ادامه می‌یابد که ماتریس S کل فیلتر محاسبه گردد.

۴-۲. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتدا یک تابع هدف (خطا) مبتنی بر پارامترهای مسئله تعریف می‌شود [۷، ۸، ۱۳]. هدف الگوریتم بهینه‌سازی مینیمم کردن تابع هدف با تغییر مقادیر متغیرهای مسئله می‌باشد. برای این منظور تعدادی جواب (متغیرهای مسئله) به صورت تصادفی در نظر گرفته شده و تابع هدف به ازای هر کدام از آن‌ها محاسبه می‌شود. در هر تکرار، پاسخ‌های جدید با توجه به پاسخ‌های قبلی بسته به نوع الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌گردد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که مقادیر قابل قبولی برای تابع هدف مورد نظر به دست آید [۷، ۸، ۱۳].

در طراحی فیلترهای موج‌بری مایکروویو پارامترهای مسئله در فیلتر post، شعاع و فاصله post ها، در فیلتر iris پهنا و فاصله بین iris ها و در فیلترهای Eplane طول و فاصله صفحات فلزی درونی می‌باشند (شکل (۱)). تابع هدف اصلی برای طراحی فیلتر همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، پاسخ فیلتر یا

۲-۴-۱. الگوریتم ژنتیک (GA)

تعیین می‌شود. در یک جهش باینری بیت یک به صفر و بیت صفر به یک تغییر پیدا می‌کند.

مراحل ذکرشده در الگوریتم ژنتیک برای ایجاد فرزندان (ایجاد کروموزوم‌های جدید) تا زمان رسیدن به یک شرط قطع ادامه می‌یابد [۷ و ۹].

۲-۴-۲. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

PSO یک روش محاسباتی تصادفی مبتنی بر حرکت و هوشمندی گروه (swarm)ها است [۱۵-۱۳]. هر گروه مجموعه‌ای از افراد (agents) یا ذرات می‌باشد که برابر تعداد متغیرهای مسئله هستند. مکان یا موقعیت هر ذره همان جواب مسئله است. هر ذره مکان و سرعت مشخصی دارد. دو پارامتر مهم در الگوریتم PSO عبارت‌اند از: $pbest$ و $gbest$ که به ترتیب بهترین مکان به‌دست‌آمده توسط هر ذره و بهترین مکان به‌دست‌آمده در کل گروه را نشان می‌دهد (بهترین مکان با توجه به میزان تابع هدف تعیین می‌گردد). الگوریتم، ابتدا با مکان‌ها و سرعت‌های رندم برای هر ذره آغاز می‌شود. این مکان‌ها به‌عنوان $pbest$ اولیه متناظر با هر ذره شناخته می‌شوند و $gbest$ نیز از بین این مکان‌های اولیه تعیین می‌گردد. سرعت ذرات در فضای جواب هر لحظه به‌هنگام می‌شود و متناسب با آن موقعیت آن‌ها نیز تغییر می‌کند. در هر مرحله تابع هدف متناظر با هر گروه از ذرات در مکان جدید محاسبه شده و با $pbest$ و $gbest$ مقایسه می‌شود. در صورتی که مقدار به‌دست‌آمده کم‌تر از مقدار متناظر $pbest$ برای هر ذره یا $gbest$ در کل گروه باشد، مکان‌های مناسب جدید جایگزین مکان‌های فعلی می‌شوند. مکان و سرعت ذرات در هر لحظه با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$V_n(t + \Delta t) = V_n(t) \times w + c_1(\phi_1)(pbest - x_n(t)) + c_2(\phi_2)(gbest - x_n(t)) \quad (8)$$

$$[\phi_i] = [\phi_1^i, \phi_2^i, \dots, \phi_N^i] \quad i = 1, 2$$

$$x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + \Delta t V_n(t)$$

که در آن، x_n و V_n به ترتیب مختصات و سرعت ذره در بعد (متغیر) n ام است. این محاسبات برای هر بعد انجام می‌شود. w یک ضریب وزنی است که به‌صورت خطی از ۰.۹ تا ۰.۴ کاهش می‌یابد. c_1 و c_2 ضرایبی هستند که نشان می‌دهند یک ذره به ترتیب چقدر تحت تأثیر بهترین مکان به‌دست‌آمده توسط خودش و بهترین مکان در کل گروه قرار دارد. ϕ_1 و ϕ_2 مقادیر رندم هستند. این روند (به‌هنگام شدن موقعیت‌ها و سرعت‌های ذرات) تا زمانی که شرط قطع برقرار شود، ادامه می‌یابد.

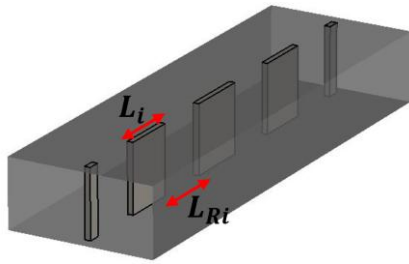
GA مبتنی بر اصل انتخاب و تکامل طبیعی است [۱۲-۷]. این روش روی گروهی (جمعیتی) از جواب‌های تصادفی عمل می‌کند. به هر کدام از اعضای جمعیت کروموزوم گفته می‌شود و هر کروموزوم بسته به تعداد متغیرهای مسئله تعدادی ژن دارد. در ادامه توضیح مختصری از GA و مراحل آن ارائه شده است.

ابتدا تعدادی کروموزوم به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شوند. سپس تابع هدف برای هر کروموزوم محاسبه شده و جمعیت بر اساس مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده مرتب می‌شود. در مرحله بعد تعدادی از کروموزوم‌ها نگه‌داشته شده (برای مثال نصف آن‌ها) و بقیه حذف می‌شوند. یک معیار دیگر در انتخاب تعدادی از کروموزوم‌ها، تعیین یک آستانه برای تابع هدف است. به این صورت که کروموزوم‌هایی که تابع هدف متناظر با آن‌ها کم‌تر از مقدار آستانه است، نگه‌داشته شده و بقیه حذف می‌شوند.

گام دوم، انتخاب جفت است. یک روش متداول برای انتخاب جفت tournament می‌باشد. در انتخاب تورنمنت، دو یا تعداد بیشتری از کروموزوم‌های باقی‌مانده به‌صورت تصادفی انتخاب شده و سپس کروموزومی که تابع هدف کم‌تری دارد به‌عنوان پدر یا مادر انتخاب می‌شود. این روند برای انتخاب هر پدر و مادر تکرار می‌شود.

گام بعد، ایجاد فرزند است. در این مرحله لازم است برخی از ژن‌های پدر و مادر به فرزندان منتقل شود. این عملیات اصطلاحاً crossover نامیده می‌شود. در این مرحله یک سری داده تصادفی به اندازه طول کروموزوم (متناسب با تعداد ژن‌ها که همان متغیرهای مسئله هستند) به‌ازای هر جفت پدر و مادر ایجاد شده و بر اساس آن، ژن‌های پدر و مادر به فرزندان منتقل می‌شود. برای مثال در حالتی که کروموزوم‌ها مقادیر باینری داشته باشند، این داده‌ها شامل تعدادی صفر و یک هستند. در crossover یک‌نواخت، تعداد بیت‌های صفر و یک ایجادشده به‌ازای هر پدر و مادر یکسان است. در صورتی که بیت یک باشد، بیت متناظر (ژن) از مادر به فرزند ۱ و بیت متناظر (ژن) پدر به فرزند ۲ منتقل می‌شود. به‌طور مشابه اگر بیت صفر باشد، بیت متناظر (ژن) از مادر به فرزند ۲ و بیت متناظر (ژن) پدر به فرزند ۱ منتقل می‌شود. در حالت غیر باینری نیز با توجه به داده‌های ایجادشده، ژن‌های پدر و مادر برای ایجاد فرزندان به‌صورت‌های مختلف با یکدیگر ترکیب می‌گردند.

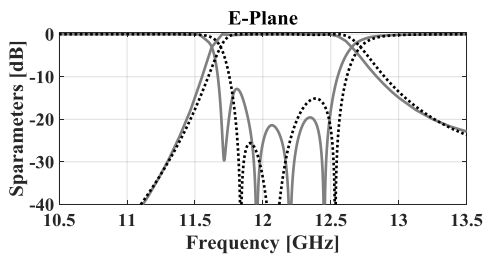
گام آخر، جهش (mutation) است. جهش باعث اعمال تغییرات تصادفی در جمعیت می‌شود. نرخ جهش بر اساس تعدادی از بیت‌ها یا مقادیری که در جمعیت تغییر خواهند کرد،



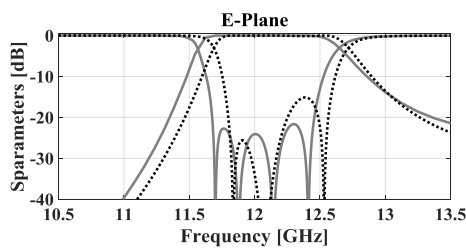
شکل (۴): ساختار فیلتر Eplane مرتبه ۴ طراحی شده.

جدول (۱): بهترین مقادیر به دست آمده برای پارامترهای فیلتر Eplane در سه الگوریتم بهینه‌سازی.

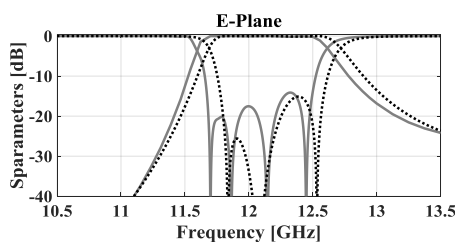
طول رزوناتورها (mm)			روش بهینه‌سازی
$L_{R2} = L_{R3}$	$L_{R1} = L_{R4}$		
۸/۹۰۶۵	۸/۹۹۰۷		GA
۸/۹۹۵۴	۹/۱۴۰۵		PSO
۸/۹۵۸۴	۹/۱۱۱۷		QPSO
طول صفحات فلزی درونی (mm)			روش بهینه‌سازی
l_3	$l_2 = l_4$	$l_1 = l_5$	
۱۰/۹۳۷	۹/۷۸۴۳	۲/۸۱۱۸	GA
۱۰/۶۱	۹/۰۹۸۳	۲/۲۸۲	PSO
۱۱/۰۱۶	۹/۷۹۱۴	۲/۹۷۷۴	QPSO



GA (الف)



PSO (ب)



QPSO (ج)

شکل (۵): پاسخ فرکانسی فیلتر Eplane. نتایج طراحی توسط روش پیشنهادی با خطوط خاکستری توپر و نتایج ارائه شده در مرجع [۲۲] با خط چین مشکی نشان داده شده است.

در PSO چند شرط مرزی وجود دارد که با توجه به آن سرعت ذرات تغییر می‌کند. این شرایط عبارت‌اند از: دیوارهای جاذب (مرزی که در آن سرعت صفر می‌شود)، دیوارهای بازتابی (مرزی که در آن علامت (جهت) سرعت تغییر می‌کند و ذره به فضای جواب باز می‌گردد) و دیوارهای نامرئی (ذرات می‌توانند بدون محدودیت حرکت نمایند. البته ذراتی که از فضای جواب خارج می‌شوند برای محاسبه تابع هدف در نظر گرفته نمی‌شوند). [۱۳-۱۵]

۲-۴-۳. الگوریتم ازدحام ذرات کوانتومی (QPSO)

QPSO برخلاف PSO که رفتار آن بر اساس قوانین نیوتن است (PSO کلاسیک)، از قوانین مکانیک کوانتومی پیروی می‌کند [۱۶-۱۹]. در مکانیک کوانتومی طبق اصل عدم قطعیت نمی‌توان مکان و سرعت یک ذره را به طور هم‌زمان تعیین نمود. در این الگوریتم تعدادی چاه پتانسیل مانند چاه پتانسیل دلتا، هارمونیک اسیلاتور و مربعی وجود دارد. در این روش ابتدا یک چاه پتانسیل مناسب به مرکز بردار P انتخاب می‌شود. مقدار P به صورت [۱۶]

$$P = \frac{\phi_1 p_{best} + \phi_2 g_{best}}{\phi_1 + \phi_2} \quad (9)$$

تعریف می‌شود. ϕ_1 و ϕ_2 ضرایب رندم هستند [۱۶ و ۱۷].

پس از حل معادله شرویدینگر برای تعیین تابع موج و در نتیجه تابع چگالی احتمالی مکان ذره، از شبیه‌سازی مونت کارلو یا هر روش اندازه‌گیری دیگری برای قرار دادن تابع موج در ناحیه مطلوب استفاده می‌شود. در این مقاله چاه پتانسیل دلتا در نظر گرفته شده است. بنابراین، مکان جدید ذره با استفاده از رابطه (۱۰) تعیین می‌شود [۱۷].

$$x_{k+1} = P \pm \frac{\ln(1/u)}{2g \ln(\sqrt{2})} |x_k - P| \quad (10)$$

که در آن، u عددی تصادفی با توزیع یکنواخت و g عددی تصادفی با مقدار بیشتر از یک است [۱۶-۱۹].

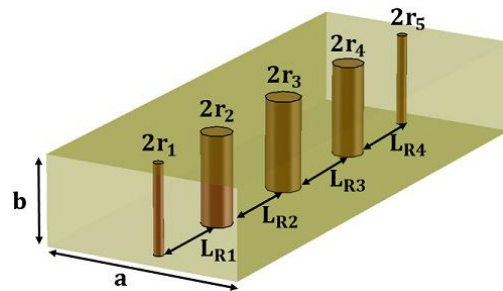
۳. نتایج

در این قسمت برای بررسی صحت روش طراحی مطرح شده، ابتدا یک فیلتر نوع Eplane مرتبه ۴ (شکل (۴)) که در مرجع [۲۲] طراحی و ساخته شده با روش پیشنهادی طراحی و شبیه‌سازی شده و نتایج پاسخ فرکانسی فیلتر و پارامترهای طراحی آن توسط سه الگوریتم بهینه‌سازی مطرح شده به ترتیب در شکل (۵) و جدول (۱) ارائه و با نتایج مرجع [۲۲] مقایسه شده است.

در ادامه، سه نوع فیلتر مایکروویو نشان داده شده در شکل (۱)، طراحی شده‌اند. مقادیر پارامترهای فیلتر بر اساس بهترین مقدار به دست آمده تابع هدف در هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. پس از یافتن بهترین مقدار متغیر مورد نظر از طریق روند طراحی ذکر شده، فیلتر به صورت تمام موج در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی می‌شود. نتایج روش طراحی و شبیه‌سازی که در ادامه ارائه می‌شود، تطبیق بسیار خوبی دارند.

۳-۱. فیلتر post

این نوع فیلتر همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است از تعدادی post (استوانه) سلفی تشکیل شده است. نحوه قرارگیری آن‌ها در ساختار مورد بررسی در این مقاله به این صورت است که همگی در مرکز و با فواصل مناسب از یکدیگر در طول موج قرار دارند. فیلترهای دارای post مرکزی اغلب به دلیل سادگی در



شکل (۶): ساختار فیلتر post و پارامترهای طراحی آن.

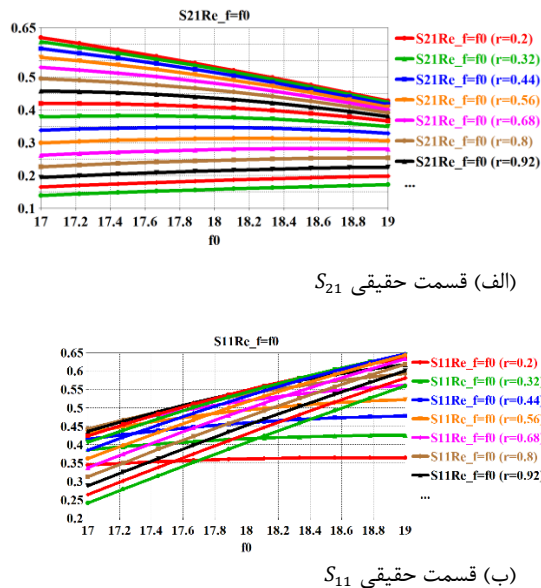
جدول (۲): بهترین مقادیر به دست آمده برای پارامترهای فیلتر دارای post در بهینه‌سازی تک هدف.

طول رزوناتورها (mm)			روش
$L_{R2} = L_{R3}$	$L_{R1} = L_{R4}$		بهینه‌سازی
۷/۲۲۳	۶/۷۹۱		GA
۷/۲۳۷	۶/۸۴۷		PSO
۷/۲۳۷	۶/۸۴۸		QPSO
شعاع post ها (mm)			روش
r_3	$r_2 = r_4$	$r_1 = r_5$	بهینه‌سازی
۱/۴۹۲	۱/۳۸۶	۰/۶۵۲	GA
۱/۵۰۳	۱/۳۹۴	۰/۶۷۰	PSO
۱/۵۰۴	۱/۳۹۴	۰/۶۷۱	QPSO

ساخت در مقایسه با نوع چند post یا iris مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰].

در این مقاله یک فیلتر دارای post مرتبه چهار در باند فرکانسی Ku طراحی شده است که باند عبور آن از ۱۷ GHz تا

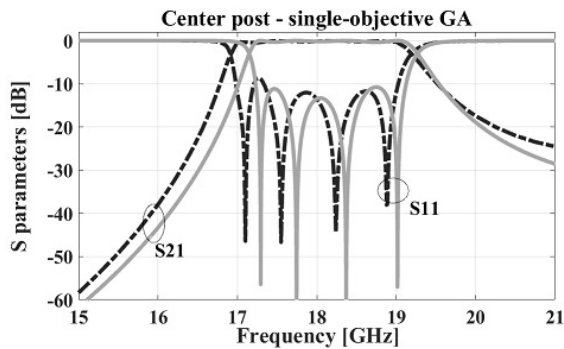
در ابتدا به عنوان نمونه برای یک بلوک از این فیلتر (یک post) نمودار قسمت حقیقی S_{21} و S_{11} در باند عبور فیلتر در شکل (۷) نشان داده شده است. نمودارهای باند توقف سمت چپ و راست نیز به دست آمده که برای اختصار در اینجا ارائه نشده است.



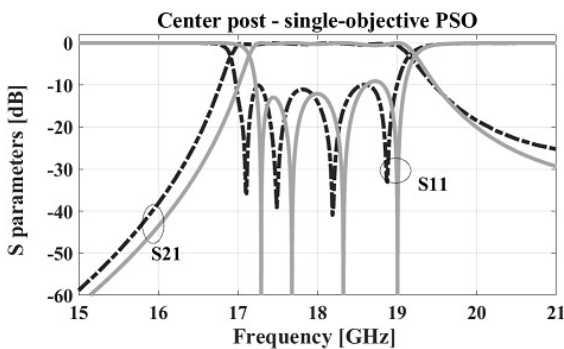
شکل (۷): نمودار قسمت حقیقی S_{21} و S_{11} در یک بلوک سازنده فیلتر post در باند عبور فیلتر بر اساس تغییرات شعاع post.

برای رسیدن به پاسخ فرکانسی مطلوب سه الگوریتم بهینه‌سازی (GA، PSO و QPSO) در این روش اعمال شده‌اند. همچنین به منظور مقایسه بهینه‌سازی‌های تک هدف و چند هدف، هر دو رویکرد در طراحی یک فیلتر دارای post در نظر گرفته شده و پارامترهای S مربوط به هر حالت رسم شده است.

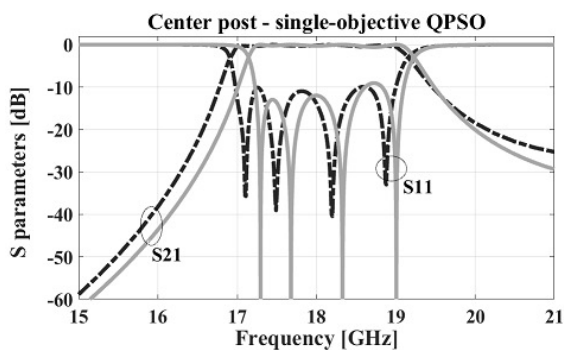
در بهینه‌سازی تک هدف، همان‌طور که در بخش ۲-۴ توضیح داده شد، تنها S_{21} فیلتر بهینه می‌شود. مطلوب است که تلفات عبوری در باندهای توقف بیش از ۲۰ dB و در باند عبور کم‌تر از ۱ dB باشد. بنابراین، در این طراحی، پارامترهای $S_{21,smax}$ و $S_{21,pmin}$ به ترتیب ۲۰ و ۱ انتخاب می‌شوند. جدول (۲) مقادیر متغیرها (ابعاد فیلتر) به ازای بهترین تابع هدف



GA (الف)



PSO (ب)



QPSO (ج)

شکل (۸): پاسخ فرکانسی فیلتر دارای post در بهینه‌سازی تک هدف. نتایج شبیه‌سازی تمام موج با خطوط خاکستری توپر و نتایج روش پارامترهای S با خطچین مشکی نشان داده شده است.

۳-۲. فیلتر iris

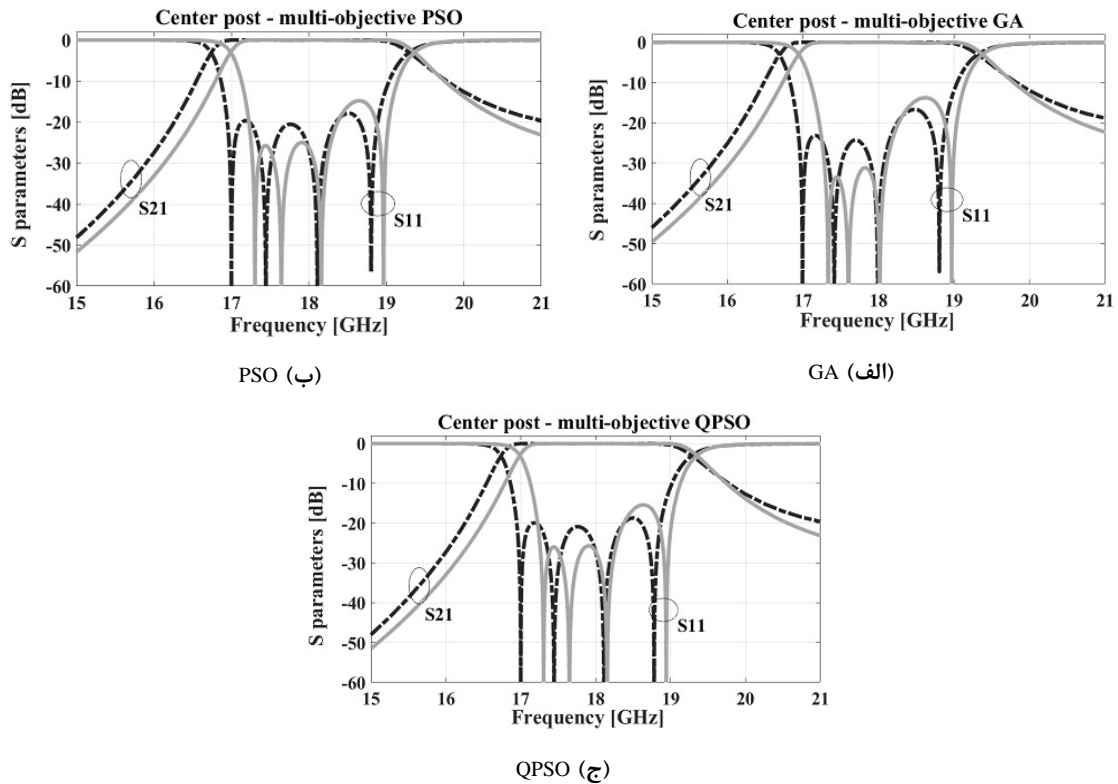
این نوع فیلتر شامل روزنه‌های سلفی در طول موج‌بر است. در ساختار نشان داده شده در شکل (۱۱)، هر بلوک ناپیوستگی از دو iris با پهنای یکسان تشکیل شده است.

به‌دست‌آمده در GA، PSO و QPSO تک هدف برای فیلتر post مرکزی و شکل (۸) پاسخ فرکانسی (S_{11} و S_{21}) متناظر با هر یک را به ترتیب نشان می‌دهد. هر شکل شامل نتایج شبیه‌سازی تمام موج (خطوط توپر خاکستری) و نتایج روش پارامترهای S پیشنهادی (خطچین‌های مشکی) می‌باشد. ملاحظه می‌شود که نتایج پارامترهای S تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارند. بیش‌ترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و روش طراحی با هر سه الگوریتم بهینه‌سازی ابتدای باند عبور است که در آن خطای نسبی در شیف‌ت فرکانسی حدود ۱/۱٪ می‌باشد. واضح است که S_{21} فیلتر طراحی شده به معیار مطلوب طراحی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌رسد. اما S_{11} این فیلترها در باند عبور حدود ۱۰ dB- است که در بیش‌تر کاربردها مطلوب نیست. بنابراین، بهتر است که S_{11} و S_{21} هر دو در یک بهینه‌سازی چند هدف به جای تک هدف، بهینه شوند.

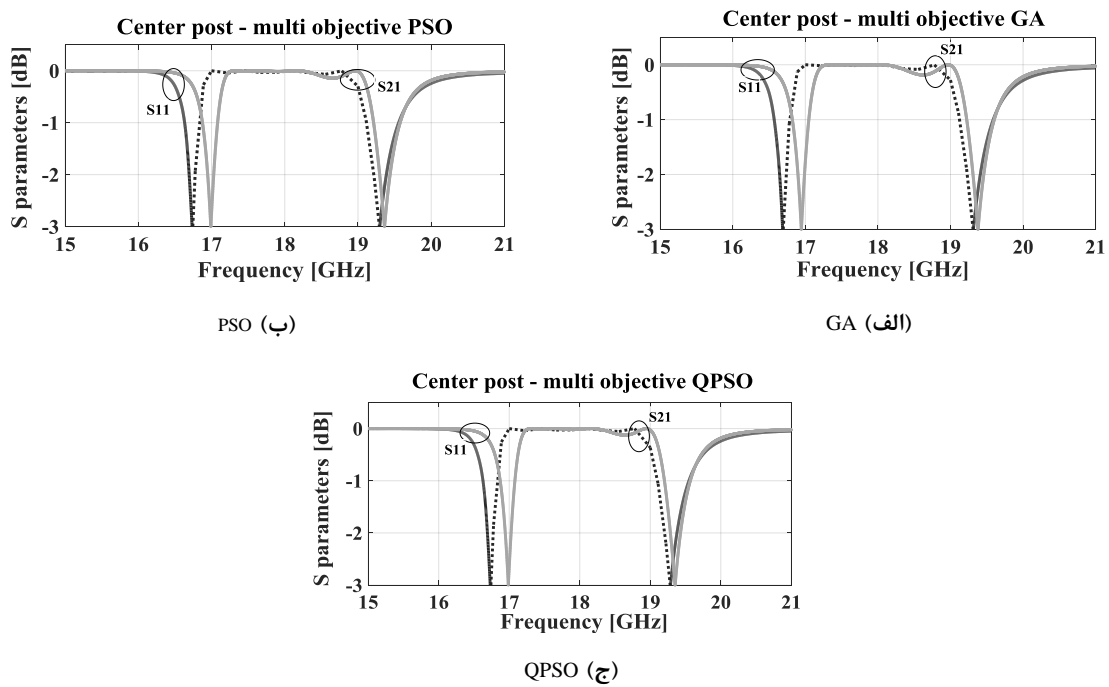
در بهینه‌سازی چند هدف، رابطه (۷) به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود (بخش ۲-۴). بنابراین، علاوه بر شرایطی که قبلاً برای S_{21} مطرح شد، مطلوب است که تلفات بازگشتی در باند عبور بیش‌تر از ۲۰ dB و در باندهای توقف کم‌تر از ۱ dB باشد. جدول (۳) مقادیر متغیرهای متناظر با بهترین تابع هدف به‌دست‌آمده در GA، PSO و QPSO چند هدف را برای فیلتر post مرکزی نشان می‌دهد. S_{11} و S_{21} فیلتر دارای post مرکزی با بهترین تابع هدف به‌دست‌آمده در الگوریتم‌های چند هدف به ترتیب در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. بدیهی است که علاوه بر برقراری شرط S_{21} ، S_{11} فیلتر در باند عبور در مقایسه با نتایج بهینه‌سازی تک هدف (شکل (۸)) به زیر ۱۸ dB- می‌رسد. شکل (۱۰) نیز بزرگنمایی نمودارهای ارائه‌شده در شکل (۹) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان تلفات عبوری در باند عبور کم‌تر از ۱ dB می‌باشد.

جدول (۳): بهترین مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترهای فیلتر دارای post در بهینه‌سازی چند هدف.

طول روزنه‌ها (mm)		روش بهینه‌سازی	
$L_{R2} = L_{R3}$	$L_{R1} = L_{R4}$		
۷/۱۵۵	۶/۷۲۳	GA	
۷/۱۶۶	۶/۷۱۱	PSO	
۷/۱۷۲	۶/۷۰۹	QPSO	
شعاع post ها (mm)		روش بهینه‌سازی	
r_3	$r_2 = r_4$		$r_1 = r_5$
۱/۳۶۵	۱/۲۰۹	۰/۳۹۱	GA
۱/۳۹۶	۱/۲۳۹	۰/۴۲۸	PSO
۱/۳۹۷	۱/۲۳۷	۰/۴۲۲	QPSO



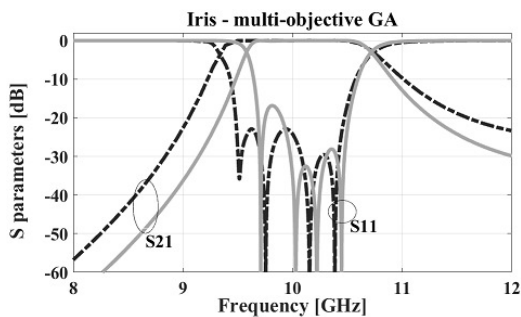
شکل (۹): پاسخ فرکانسی فیلتر دارای post در بهینه‌سازی چند هدف. نتایج شبیه‌سازی تمام موج با خطوط خاکستری توپر و نتایج روش پارامترهای S با خط‌چین مشکی نشان داده شده است.



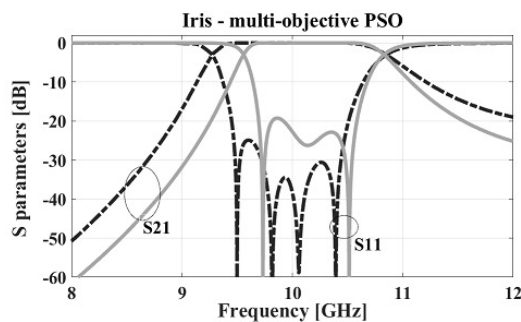
شکل (۱۰): بزرگنمایی نمودارهای شکل (۹).

رزوناتورها می‌باشد (شکل (۱۴)). ابعاد موجبر $a=2.54$ mm و $b=1.27$ mm انتخاب می‌شوند. ضخامت صفحه فلزی دورنی 0.05 mm است. مشابه بخش‌های قبل ساختار متقارن در نظر گرفته می‌شود.

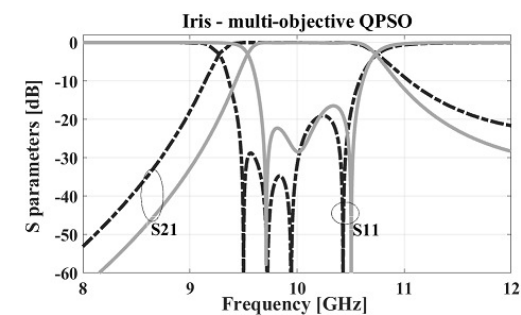
جدول (۴) مقادیر پارامترها به ازای بهترین تابع هدف محاسبه شده در GA، PSO و QPSO چند هدف برای فیلتر صفحه E و شکل (۱۵) نیز پاسخ فرکانسی (S_{11} و S_{21}) مربوط به هر حالت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نتایج روش پارامترهای S در هر سه الگوریتم تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارند. همچنین S_{11} این نوع فیلتر در باند عبور بهتر از دو فیلتر قبلی می‌باشد. افت کم‌تر از 1dB پاسخ‌های فرکانسی فیلتر در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



GA (الف)

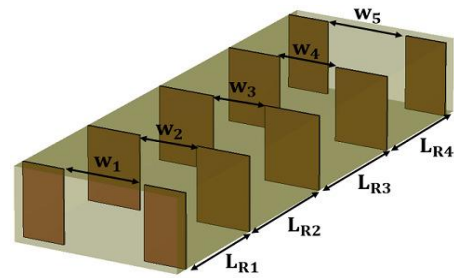


PSO (ب)



QPSO (ج)

شکل (۱۲): پاسخ فرکانسی فیلتر دارای iris در بهینه‌سازی چند هدف. نتایج شبیه‌سازی تمام موج با خطوط خاکستری توپر و نتایج روش پارامترهای S با خط چین مشکی نشان داده شده است.



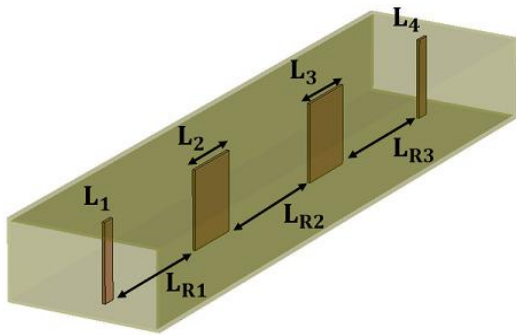
شکل (۱۱): ساختار فیلتر دارای iris و پارامترهای طراحی آن.

در شکل (۱۱) یک فیلتر روزنه سلفی مرتبه چهار با پنج جفت iris در طول موجبر در باند فرکانسی X با باند عبور ۹/۵ تا ۱۰ GHz، باند توقف سمت چپ زیر ۸/۵ GHz و باند توقف سمت راست بالای ۱۱/۵ GHz طراحی شده است. ابعاد موجبر $a=2.54$ mm و $b=1.27$ mm می‌باشد. ضخامت iris 0.05 mm در نظر گرفته شده است. در فیلتر روزنه سلفی، پارامترهای بهینه‌سازی پهنای iris و طول رزوناتورها می‌باشد. مانند فیلتر بخش قبل در اینجا نیز فیلتر متقارن در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که تلفات عبوری و تلفات بازگشتی هر دو در پاسخ فیلتر اهمیت دارند، تمرکز این بخش روی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدف است.

جدول (۳) مقادیر پارامترهای فیلتر مورد نظر به ازای بهترین تابع هدف به دست آمده در GA، PSO و QPSO و شکل (۱۲) پاسخ فرکانسی (S_{11} و S_{21}) برای فیلتر روزنه سلفی به ازای هر حالت را به ترتیب نشان می‌دهد. مشابه فیلتر دارای post، بیش‌ترین اختلاف فرکانسی بین نتایج شبیه‌سازی و روش طراحی برای هر سه الگوریتم در ابتدای باند عبور است که در آن خطای نسبی در شیفت فرکانسی حدود 2% (۲۰۰ GHz) می‌باشد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که S_{21} فیلتر روزنه سلفی در باند عبور بالای -1dB و S_{11} تقریباً در کل فرکانس‌های باند عبور زیر -۲۰ dB می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین شبیه‌سازی و روش پارامترهای S وجود دارد. شکل (۱۳) تلفات عبوری کم‌تر از ۱ dB پاسخ‌های فرکانسی در باند عبور را نشان می‌دهد.

۳-۳. فیلتر صفحه E

در این نوع فیلتر همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است صفحات فلزی که روی یک زیرلایه دی‌الکتریک هستند در صفحه E موجبر مستطیلی قرار می‌گیرد. علاوه بر هزینه کم در ساخت، این فیلتر تلفات عبوری کمی در باند عبور دارد [۲۱]. در اینجا یک فیلتر مرتبه سه برای باند فرکانسی W با باند عبوری از ۷۶/۶ GHz تا ۷۷/۴ GHz، باند توقف سمت چپ زیر ۷۵/۸ GHz و باند توقف سمت راست ۷۸/۲ GHz طراحی می‌شود. پارامترهای بهینه‌سازی مورد نظر، طول صفحات فلزی درونی و طول

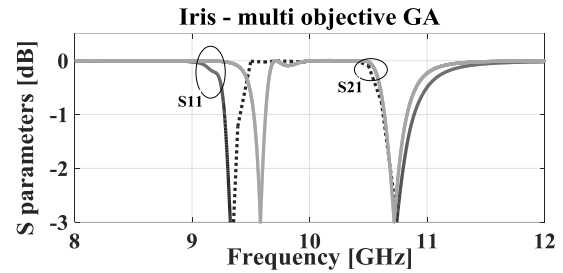


شکل (۱۴): ساختار فیلتر صفحه E و پارامترهای طراحی آن.

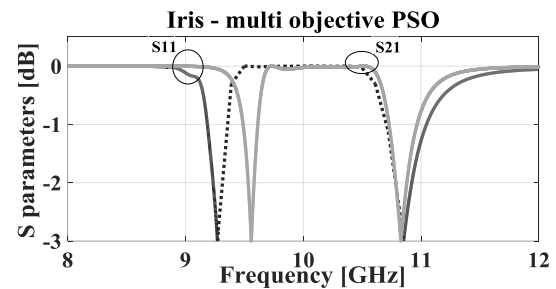
۴. مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی

با مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی مطرح‌شده در این مقاله ملاحظه می‌شود که PSO و QPSO پارامترهای کنترلی و عملگرهای کم‌تری در مقایسه با GA دارند. در GA پس از ایجاد جمعیت اولیه، ابتدا باید جفت‌های پدر و مادر انتخاب شوند. سپس عملیات crossover برای ایجاد فرزندان از ژن‌های پدر و مادر صورت می‌گیرد و در نهایت جمعیت دچار جهش می‌شود. اما در PSO تنها لازم است که موقعیت و سرعت ذرات در هر مرحله به‌هنگام شود و در QPSO نیز تنها موقعیت ذره در نظر گرفته شده و به‌هنگام می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که PSO و QPSO نسبت به GA ساده‌تر هستند. این دو الگوریتم (QPSO) گاهی به مقادیر بهتری برای تابع هدف دست می‌یابند. البته سرعت همگرایی کم‌تری نسبت به GA دارند. همچنین در برخی موارد پاسخ به‌دست‌آمده توسط آن‌ها در خارج از فضای جواب تعیین شده در مسئله قرار می‌گیرد. اما پاسخ‌های روش GA همواره در فضای جواب است.

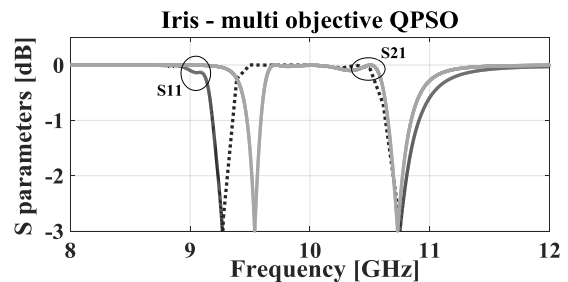
در این بخش به‌منظور مقایسه سه الگوریتم بهینه‌سازی مطرح‌شده، بهینه‌سازی چند هدف بر روی فیلتر صفحه E اعمال می‌شود. برای هر الگوریتم ۱۰۰ حالت مستقل در نظر گرفته شده است (به عبارتی هر الگوریتم ۱۰۰ بار با جمعیت‌های مستقل از هم اجرا می‌شود). هر بار اجرای الگوریتم بهینه‌سازی حداکثر شامل ۱۰۰۰ تکرار (معیاری برای همگرا شدن تابع هدف) می‌باشد. جدول (۵) مقادیر زیر ۲۰ برای تابع هدف و تعداد تکرارهایی که در آن همگرایی به مقدار مورد نظر صورت گرفته است را برای هر سه الگوریتم بهینه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود که در GA و PSO هفت حالت مستقل از اجرای الگوریتم و در QPSO ده حالت با مقادیر تابع هدف زیر ۲۰ وجود دارد. علاوه بر این واضح است که مقادیر تابع هدف PSO و QPSO همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، کم‌تر از مقادیر به‌دست‌آمده در GA هستند. همچنین تعداد تکرارهایی که در آن بهترین مقدار



GA (الف)



PSO (ب)

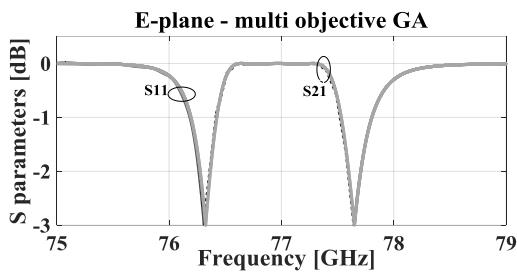


QPSO (ج)

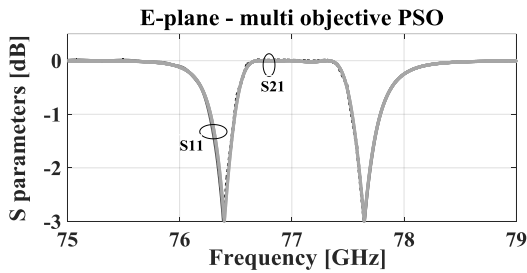
شکل (۱۳): بزرگنمایی نمودارهای شکل (۱۲).

جدول (۴): بهترین مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترهای فیلتر صفحه E در بهینه‌سازی چند هدف.

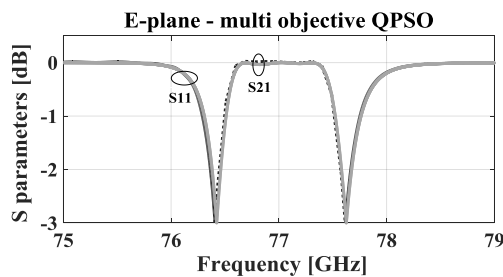
طول رزونانورها (mm)		روش بهینه‌سازی
L_{R2}	$L_{R1} = L_{R3}$	
۲/۴۴۶	۲/۴۸۲	GA
۲/۴۴۶	۲/۴۷۸	PSO
۲/۴۴۶	۲/۴۷۹	QPSO
طول صفحات فلزی درونی (mm)		روش بهینه‌سازی
$l_1 = l_4$	$l_2 = l_3$	
-۰/۲۲۷	۱/۰۲۴	GA
-۰/۲۴۲	۱/۰۵۷	PSO
-۰/۲۵۵	۱/۰۷۷	QPSO



GA (الف)



PSO (ب)



QPSO (ج)

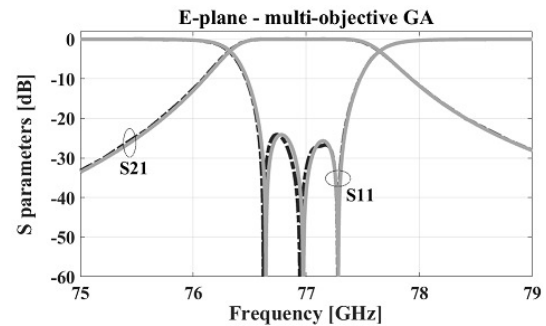
شکل (۱۶): بزرگنمایی شکل (۱۵).

جدول (۵): مقادیر تابع هدف زیر ۲۰ و تعداد تکرارهای متناظر با آن‌ها برای سه الگوریتم بهینه‌سازی در ۱۰۰ بار اجرای مستقل هر الگوریتم و حداکثر ۱۰۰۰ تکرار در هر اجرا.

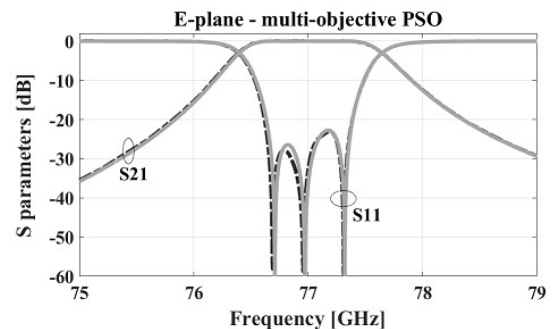
QPSO		PSO		GA	
تکرار	تابع هدف	تکرار	تابع هدف	تکرار	تابع هدف
۹۹۹	۱۵/۶۵	۹۹۹	۱۲/۵۵	۴۷۲	۱۹/۲۱
۹۹۴	۱۶/۳۴	۶۷	۱۹/۲۴	۸۸	۱۴/۵۵
۹۹۹	۱۵/۵۵	۱۱۴	۱۸/۴۰	۳۵	۱۴/۴۱
۹۹۹	۱۳/۳۷	۹۹۹	۱۲/۸۲	۲۹	۱۳/۸۵
۹۹۷	۱۳/۳۷	۹۷۸	۱۲/۶۳	۱۰۵	۱۵/۵۰
۹۴۱	۱۴/۴۹	۹۹۹	۱۲/۶۵	۸۰۲	۱۸/۷۰
۹۹۹	۱۷/۱۵	۹۹۹	۱۲/۷۴	۹۷۸	۱۳/۷۷
۹۹۷	۱۶/۷۴				
۹۹۶	۱۳/۱۷				
۹۳۹	۱۲/۷۳				

تابع هدف به دست می‌آید، نشان می‌دهد که سرعت همگرایی GA با توجه به توضیحات قبل بیش‌تر از PSO و QPSO می‌باشد.

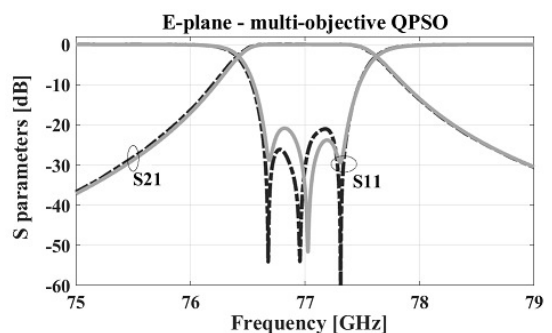
شکل (۱۷) بهترین مقادیر به دست آمده برای تابع هدف در هر اجرای مستقل الگوریتم‌های GA، PSO و QPSO را به ترتیب نشان می‌دهد. واضح است که PSO و QPSO به مقادیر مطلوب بیش‌تری (fitness ≤ 20) نسبت به GA می‌رسند.



GA (الف)



PSO (ب)



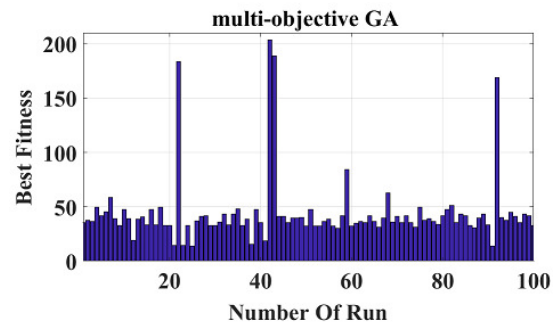
QPSO (ج)

شکل (۱۵): پاسخ فرکانسی فیلتر صفحه E در بهینه‌سازی چند هدف. نتایج شبیه‌سازی تمام موج با خطوط خاکستری توپر و نتایج روش پارامترهای S با خط چین مشکی نشان داده شده است.

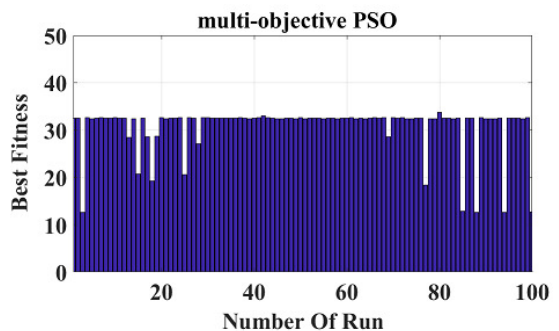
سه الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی GA، PSO و QPSO در اینجا بررسی و مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی تمام موج برای سه فیلتر مایکروویو (Eplane و iris و post) در سه باند فرکانسی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش طراحی بر مبنای پارامترهای S بسیار دقیق و سریع می‌باشد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که الگوریتم بهینه‌سازی چند هدف پاسخ فیلتر بهتری ارائه می‌دهد. در نهایت مقایسه این سه الگوریتم بهینه‌سازی نشان می‌دهد که GA نسبت به PSO و QPSO از لحاظ سرعت همگرایی عملکرد بهتری دارد. اما PSO و QPSO مقادیر بهتری برای تابع هدف ارائه می‌دهند.

۶. مراجع

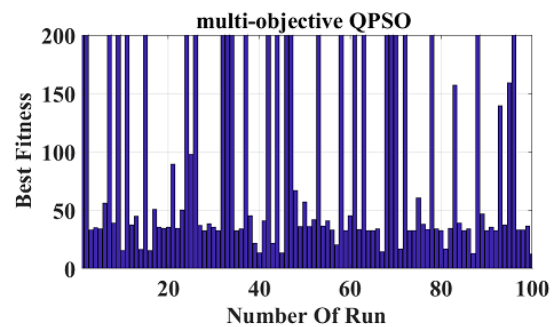
- [1] M. Khajavi, N. Khajavi, and F. Hojat Kashani, "Designing a microstrip dual-band bandpass filter (BPF) with suitable isolation between two passbands," Journal of Radar, vol. 4, no. 4, 2017. (In Persian)
- [2] G. Matthaei, E. Jones, and L. Young, "Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures (artech microwave library)," 1964.
- [3] J. S. G. Hong and M. J. Lancaster, "Microstrip filters for rf/microwave applications," vol. 167, John Wiley & Sons.
- [4] I. Hunter, "Theory and design of microwave filters," Iet, vol. 48, 2001.
- [5] M. I. Lai and S. K. Jeng, "Compact microstrip dual-band bandpass filters design using genetic-algorithm techniques," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 1, pp. 160-168, 2006.
- [6] W. Wang, Y. Lu, J. S. Fu, et al., "Particle swarm optimization and finite-element based approach for microwave filter design," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp. 1800-1803, 2005.
- [7] R. L. Haupt and D. H. Werner, "Genetic algorithms in electromagnetics," John Wiley & Sons.
- [8] J. M. Johnson and Y. R. Samii, "Genetic algorithms in electromagnetics," In: Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S. Digest, vol. 2, IEEE, pp. 1480-1483, 1996.
- [9] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, "Electromagnetic optimization by genetic algorithms," John Wiley & Sons, 1999.
- [10] A. Chipperfield and P. Fleming, "The MATLAB genetic algorithm toolbox," 1995.
- [11] C. M. Fonseca and P. J. Fleming, "Multiobjective genetic algorithms made easy: selection sharing and mating restriction," First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, 1995.
- [12] A. Chipperfield, "Genetic algorithms in engineering systems," vol. 55, Iet, 1997.
- [13] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization in electromagnetics," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 52, no. 2, pp. 397-407, 2004.



GA (الف)



PSO (ب)



QPSO (ج)

شکل (۱۷): بهترین مقدار به دست آمده برای تابع هدف در هر بار اجرای الگوریتم برای فیلتر صفحه E در بهینه‌سازی چند هدف.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای طراحی فیلترهای موج‌بری مبتنی بر پارامترهای S با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مطرح شده است. گام‌های اصلی این روش پیشنهادی عبارت‌اند از: ۱- تقسیم فیلتر به بلوک‌های سازنده دوتایی (بخش دارای ناپیوستگی و بخش موج‌بری)، ۲- محاسبه ماتریس S هر بلوک، ۳- تعیین پارامترهای S کل فیلتر با در نظر گرفتن ترکیب سری بلوک‌ها، ۴- بهینه‌سازی متغیرها برای رسیدن به پاسخ فرکانسی مطلوب فیلتر.

- [20] M. Potok, "The design of inductive post-type microwave filters," *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, vol. 18, no. 5, pp. 263-272, 1958.
- [21] J. Bornemann, R. Vahldieck, F. Arndt, et al., "Optimized low-insertion-loss millimetre-wave fin-line and metal insert filters," *Radio and Electronic Engineer*, vol. 52, no. 11, pp. 513-521, 1982.
- [22] J. Bornemann, R. Vahldieck, F. Arndt, and D. Grauerholz, "Optimized low-insertion-loss millimetre-wave fin-line and metal insert filters," *Radio and Electronic Engineer*, vol. 52, no. 11, pp. 513-521, 1982.
- [23] R. Vahldieck, J. Bornemann, F. Arndt, and D. Grauerholz, "W-band low-insertion-loss E-plane filter (short paper)," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 32, no. 1, pp. 133-135, 1984.
- [14] Y. Shi, et al., "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," In: *evolutionary computation, Proceedings of the 2001 Congress on*, vol. 1, IEEE, pp. 81-86, 2001.
- [15] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*," vol. 1, pp. 33-57, 2007.
- [16] J. Sun, B. Feng, and W. Xu, "Particle swarm optimization with particles having quantum behavior," In: *Evolutionary Computation, 2004. CEC2004. Congress on*, vol. 1, IEEE, pp. 325-331, 2004.
- [17] S. Mikki and A. A. Kishk, "Quantum particle swarm optimization for electromagnetics," *arXiv 16 preprint physics/0702214*, 2006.
- [18] W. Fang, J. Sun, Y. Ding, et al., "A review of quantum-behaved particle swarm optimization," *IETE Technical Review*, vol. 27, no. 4, pp. 336-348, 2010.
- [19] S. Yang, M. Wang, et al., "A quantum particle swarm optimization," In: *Evolutionary Computation, CEC2004. Congress on*, vol. 1, IEEE, pp. 320-324, 2004.

Fast Design of Waveguide Microwave Filters Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Based on the S-parameters Method

R. Ahmadi Vanhari, A. Bakhtafrouz^{*}

^{*} Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

(Received: 24/04/2019, Accepted: 24/09/2019)

Abstract

In this article an accurate and efficient procedure to design microwave waveguide filters is presented which is based on the S-parameters method combined with optimization algorithms. The proposed method is fast, since only the full-wave characteristics of a small part of the filter (one building block) are required to design the whole filter. Three different optimization algorithms; genetic algorithm (GA), particle swarm optimization algorithm (PSO) and quantum particle swarm optimization algorithm (QPSO) are used for tuning the filter response and their performances in filter design are compared. This approach is verified through full-wave simulation using commercial software for post filter, iris filter, and E-plane metal insert filter at Ku, X and W frequency bands, respectively.

Keywords: Waveguide Microwave Filters, S-Parameters Method, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Quantum Particle Swarm Optimization, Multi-Objective Optimization

^{*} Corresponding author E-mail: bakhtafrouz@cc.iut.ac.ir