طراحی فیلترهای توری پراشی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

عطاالله ابراهیم‌زاده شرمه[۱]، دانشیار، عباس فتح‌تبار فیروزجاه [۲]، کارشناسی ارشد، حسین علیجانزاده بورا[۳]، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - e_zadeh@nit.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل – ایران- a.fathtabar@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی اپتیک و لیزر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - اصفهان - ایران – h_alijanzadeh@ yahoo.com

چکیده: فیلترهای توری پراشی نوع جدیدی از فیلترهای نوری هستند که بر مبنای تشدیدی مود هدایت‌شده هستند و دارای کاربردهای روزافزونی در آشکارسازها، پردازشگرهای نوری، تزویج‌کننده‌ها و غیره هستند. هدف از طراحی این فیلترها انتخاب مناسب پارامترهای هندسی است. با انتخاب دقیق این پارامترها، فیلترهایی با بازدهی بالا در یک فرکانس رزونانس طراحی می‌شوند. طراحی این فیلترها با ویژگی‌های طیفی دقیق موضوعی جالب و درعین‌حال پیچیده‌ای برای بیشتر محققان است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری خفاش و با تابع هدف مناسب، یک روش جدید برای طراحی این فیلترها، در محدوده طول‌موج‌های مرئی ارائه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده دارای دقت بالا در زمان محاسبه قابل قبولی نسبت به روش‌های دیگر است.

واژه‌های کلیدی: فیلترهای نوری، پراش، توری، الگوریتم خفاش.

Design of Guided Mode Resonance Grating Filters Using Evolutionary Algorithms

A. Ebrahimzadeh, Associate Professor[1], A. Fathtabar, Master of Science[1], H. Alijanzadeh, Master of Science[2]

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: e_zadeh@nit.ac.ir , a.fathtabar@yahoo.com

2- Faculty of Optic and laser Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran, Email: h_alijanzadeh@ yahoo.com

Abstract: Reflection guided-mode resonance (GMR) grating filters are the new type of the optical filters that are based on the guided-mode resonance phenomenon and have seen increasing demands in optical detectors, optical processors, couplers and so on. Careful selection of the structural parameters yields filters with high efficiency at a desired resonance frequency and low sidebands. Design of these elements with accurate spectral properties is a difficult task and is so interesting field for many researchers. In this paper a novel method using the meta-heuristic bat algorithm (BA) and efficient objective function is proposed for designing of this filter in the visible wavelength range. Simulation results show that the proposed method has high accuracy and reasonable computation time in comparison with other methods.

Keywords: optical filters, grating, diffraction, bat algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۱۴

نام نویسنده مسئول: دکتر عطاالله ابراهیم‌زاده شرمه

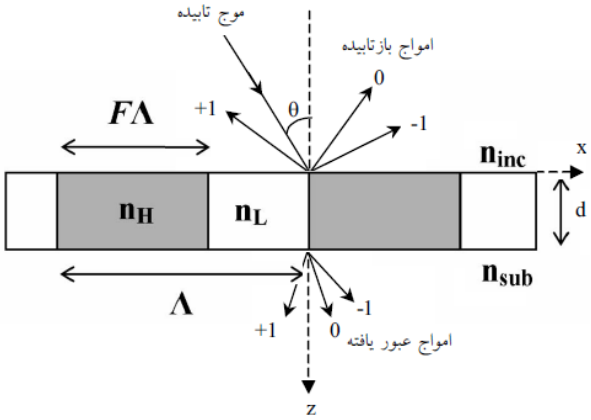
نشانی نویسنده مسئول: ایران- بابل- خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی نوشیروانی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

توری‌ها، ساختارهای تناوبی نازکی هستند که با ویژگی‌های موج‌برهای نوری ساخته می‌شوند و می‌توانند جهت طراحی فیلترهای بازتاب و عبوری در محدوده فرکانس‌های ریزموج و فرکانس‌های نوری در مدارات مخابرات نوری استفاده شوند. ازجمله کاربردهای این فیلترها می‌توان به مواردی مانند آینه‌های سرد، آشکارسازها و قطعات مورداستفاده در مخابرات نوری و پردازشگرهای نوری اشاره کرد. فیلترهای توری‌ها نیز به‌عنوان عناصر غیرفعال گوناگون نظیر تزویج کننده‌ها، منعکس‌کننده‌ها و فیلترهای طول‌موج مورد استفاده قرار می‌گیرند. تشدید مد هدایت‌شده (GMR[1]) رفتار خاصی از توری است که به‌واسطه‌ی تطبیق فاز امواج بر اساس ساختار عناصر طراحی شده و نیز زاویه موج ورودی به وجود می‌آید. این تشدید، ضرایب بازتابی را به ازای محدوده طول‌موج تابیده‌شده در توری ایجاد می‌کند [۱].

بی‌نظمی‌های توری‌های پراشی نوری، از زمانی که توسط Wood در سال ۱۹۰۲ کشف شد، مورد توجه قرار گرفته است. رفتار این بی‌نظمی‌ها به‌صورت تغییر سریع در شدت مرتبه‌های گوناگون طیفی پراشیده‌شده در باندهای خاص فرکانسی باریک مشخص می‌شود. دو نوع اساسی از اثرات غیرعادی وجود دارد، نوع Rayleigh که نوع کلاسیک از بی‌نظمی Wood است و نوع تشدید که معروفیت کمتری دارد [۲]. تحقیقات بعدی نشان دادند که توری‌های موج‌بر دی‌الکتریک دارای بی‌نظمی‌های تشدید و شامل ویژگی‌های منحصربه‌فرد انتخاب‌پذیری فرکانس و فیلترینگ هستند. بر این اساس، این ویژگی‌ها می‌توانند برای طراحی فیلترهای انعکاسی (میان‌نگذر) در حوزه‌های فرکانسی متفاوت ازجمله ریزموج و نوری مورد استفاده قرار گیرند. این نوع جدید از فیلتر بر پایه‌ی پدیده‌ی تشدید مود هدایت شده است. در این نوع فیلترها اصول پراش ساختارهای تناوبی با تئوری موج‌بر و مفاهیم تداخل فیلم نازک ترکیب می‌شود تا فیلترهایی را با بازده بالا در فرکانس مطلوب و باندهای کناری گسترده شده در سراسر یک گستره‌ی طیفی قابل‌ملاحظه، حاصل کند [۳]. یک فیلتر پراشی مطلوب می‌بایست دارای پهنای خط (پهنای کامل در نصف بیشینه) باریک، پاسخ طیفی متقارن، ضریب انعکاس ۱۰۰٪ در فرکانس مرکزی و ضریب انعکاس صفر در باند کناری باشد [۴].

Moshev و Popov در سال ۱۹۸۵ یک ساختار رزونانسی شامل یک توری سطح برجسته‌ی شیشه‌ای را که با یک لایه‌ی فیلم نازک به‌دست‌آمده از یون Ag^+ پوشیده شده بود؛ ساختند. موج‌بر غیرمسطح حاصل (یعنی با مرزهای غیرصفحه‌ای) بازده انعکاس تقریباً ۳۵٪ را در حوزه‌ی طیف نوری به نمایش گذاشت. با یک طراحی مشابه،



شکل ۱: توری پراش و هارمونیک‌های آن [۵]

Avrutsky و Sychugov در سال ۱۹۸۹، ضریب انعکاس بیشینه‌ای تقریباً معادل با ۷۰٪ را در طول‌موج لیزر He-Ne با یک توری موج‌دار Sio2-Nb2o5 روی یک زیرلایه‌ی Caf2 به دست آوردند. Avrutsky و همکارانش در سال ۱۹۹۰، پاسخ فیلتر GMR را از یک توری موج‌بر (با ضریب شکست n=۲) که در یک ماده با n=۱/۵ محصور شده بود به دست آوردند. بازده‌ی پیک TE به‌دست‌آمده در این فیلتر در حوزه‌ی طیف مرئی تقریباً ۹۵٪ و ضریب انعکاس باند کناری غیرمتقارن و زیاد بود. Peng و Morris در سال ۱۹۹۸ از یک توری فوتورزیست روی یک موج‌بر از جنس Si3N4 استفاده کردند که به بازده پیک تقریباً ۹۲٪ برای امواج تابشی پلاریزه شده‌ی TE در محدوده نزدیک مادون‌قرمز دست یافتند. Sharon و همکارانش، مدولاسیون نور را در طول‌موج ۱/۵۵μm در یک لایه‌ی توری موج‌بر InP/InGaAsP به‌وسیله‌ی مدولاسیون ضریب شکست موج‌بر به نمایش گذاشتند. این موج‌بر پاسخ با بازده تقریباً ۸۵٪ و ضریب انعکاس باند کناری تقریباً ۱/۵٪ را حاصل کرد. یک فیلتر GMR با توری سطح برجسته‌ای از جنس Si بر روی زیرلایه‌ای از جنس یاقوت کبود توسط Brundrett و همکارانش در سال ۱۹۹۸ مورد استفاده قرار گرفت تا پیک ضریب انعکاس گسترده‌ای معادل با ۸۰٪ در طول‌موج تشدید ۱/۶۸ μm به دست آید. Magnusson و همکارانش در سال ۱۹۹۸ بازده تشدید تقریباً معادل با ۹۴٪ را با اشعه‌ی لیزری که به‌صورت TM پلاریزه شده بود، در زاویه‌ی تابشی بروستر با یک توری فوتورزیست سطح برجسته روی یک لایه‌ی موج‌بر HFO2 به دست آوردند [۵].

در سال ۲۰۰۰، S.Tibuleac و R.Magnusson، فیلترهای باند پایه‌ی GMR را با یک برنامه‌ی بهینه‌سازی جدید که بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک بود طراحی کردند. این فیلترها در طول‌موج‌های مرئی، نزدیک مادون‌قرمز و دور از مادون‌قرمز طراحی شده بودند. تحقیق‌های مشابهی توسط Johnson و Abushagur در سال ۱۹۹۵، قابلیت یک الگوریتم

میکروژنتیک را برای یافتن فیلترهای انعکاسی GMR اثبات کرده است. Zuffada و همکارانش در سال ۱۹۹۸ از الگوریتم ژنتیک برای طراحی فیلترهای باند پایه‌ی GMR ریزموج استفاده کردند [۶]. در سال ۲۰۰۷ شکوه صارمی از الگوریتم اجتماع پرندگان جهت فیلتر GMR استفاده کرد [۷].

در این مقاله، سعی شده است تا با استفاده از این روش، ضرایب انعکاسی فیلتر مطلوب مشخص شود. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش مشخصات هندسی ساختار توری را برای داشتن طیف بازتاب مطلوب تعیین نمود. در بخش دوم تحلیل RCWA جهت بررسی میدان در توری ارائه می‌شود. بخش سوم به معرفی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی اختصاص دارد. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد. نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه می‌شود.

۲- روش تحلیل دقیق موج تزویج‌شده

برای توصیف فیلترهای موج‌بر توری رزونانسی، از آنالیز موج ترویج‌شده‌ی دقیق (RCWA[۲]) استفاده می‌شود. از حل معادلات ماکسول[۳] در نواحی مختلف فضا و اعمال شرایط مرزی در این معادلات، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی به دست می‌آید. تحلیل فضای حالت و تکنیک مختصر کردن ماتریس‌ها رهیافت این روش جهت به دست آوردن مجهول‌های مجموعه معادلات دیفرانسیل است [۸]. حل کامل این معادلات، فرکانس تشدید دقیق را برای یک زاویه‌ی دلخواه تابشی تعیین نموده و میزان بازدهی پراش[۴] فیلتر را ارائه می‌دهد. روش RCWA برای ساختارهای توری چندلایه دارای هر تعداد لایه‌ی دی‌الکتریک یا فلز، بیان می‌شود. توری پراشی محصورشده در بین لایه‌ها می‌تواند دارای شکل تناوبی دلخواه و با ساختار صفحه‌ای یا سطح برجسته باشد [۹]. وقتی یک فیلتر GMR با یک اشعه‌ی نور تابشی در مقادیر خاص فرکانس و زاویه‌ی تابشی، نوردهی می‌شود؛ قسمتی از اشعه مستقیماً عبور می‌کند، قسمتی منعکس می‌شود و قسمتی در داخل موج‌بر به دام می‌افتد. مدولاسیون تناوبی توری (تفاوت بین ثابت‌های دی‌الکتریک مواد توری)، این ساختار را دچار نشتی می‌سازد به‌طوری‌که از انتشار ثابت مدها در موج‌بر جلوگیری کرده و این موج الکترومغناطیسی تابشی به دام افتاده را، با مدهای موج‌بر قابل‌تحمل به‌وسیله‌ی ساختار، در زیرلایه و لایه‌ی پوششی تزویج می‌کند. این تزویج درواقع همان تزویج سطحی است و چون این نوع تزویج، جهت انتشار را هم تغییر می‌دهد، پراش نیز نامیده می‌شود و درنتیجه مرتبه‌های پراش را تولید می‌کند. به‌محض این‌که فرکانس به فرکانس تشدید نزدیک می‌شود، تغییرات سریعی در فازهای امواج پراشیده‌شده در توری یا همان مرتبه‌های پراش رخ خواهد داد. این مرتبه‌ها مستقیماً با بخش منعکس‌شده و عبورکرده نور تداخل پیدا می‌کند تا تغییرات سریعی را در شدت میدان‌های الکترومغناطیسی خارجی، نسبت به فرکانس یا زاویه‌ی تابش موج تابشی ایجاد کند و طیف انعکاس یا عبوری با دامنه‌ی بالا را به نمایش گذارد [۳، ۴]. درصورتی‌که برجستگی‌های توری به شکل مستطیلی باشد، به آن، توری باینری می‌گویند. مطابق شکل ۱، طراحی فیلترهای انعکاسی، شامل تعیین پارامترهای فیلتر مانند ضخامت d، دوره تناوب Λ، ضرایب شکست ناحیه‌ی توری و محیط (شامل n_L، n_H، n_{sub} و n_0)، فاکتور کامل f (کسری از توری که به‌وسیله‌ی ماده‌ای با ثابت دی-الکتریک بالاتر پر شده است) و نیز وابسته به نوع پلاریزاسیون و زاویه‌ی تابش θ است. فیلترهای GMR معمولاً در محدوده زیر طول‌موج استفاده می‌شوند که در این محدوده دوره تناوب Λ کوچک‌تر از طول‌موج تابشی λ است. در ساختارهای زیر طول‌موج که در آن فیلتر فقط مرتبه‌های پراش در حال انتشار صفر-ام را می‌پذیرد؛ انرژی مد هدایت‌شده که به خارج از توری پراشیده می‌شود؛ می‌تواند فقط در طول مسیر موج تابشی قرار گیرد و از طریق این تزویج، یک تشدید شکل می‌گیرد. این تشدید می‌تواند در یک طول‌موج، زاویه و پلاریزاسیون خاص به ضریب انعکاس نزدیک به ۱۰۰٪ در یک پهنای باند طیفی خیلی باریک، منجر شود. طول‌موج تشدید اساساً توسط دوره تناوب توری و قطبش موج تعیین می‌شود [۹، ۱۰]. یک فیلتر میان‌نگذر پراشی مطلوب می‌بایست دارای پهنای خط باریک، پاسخ طیفی متقارن، ضریب انعکاس ۱۰۰٪ در فرکانس مرکزی و ضریب انعکاس صفر در باند کناری باشد. پهنای خط فیلتر به پارامترهای زیر بستگی دارد [۴]:

۱- مدولاسیون توری

۲- تفاوت بین ثابت دی‌الکتریک متوسط در ناحیه‌ی توری و ثابت دی‌الکتریک محیط احاطه‌کننده

۳- فاکتور کامل توری.

درصورتی‌که توری یک ساختار تناوبی باشد که در طول صفحه‌ی موج‌بر (صفحه‌ی yz) گسترده شده است، تغییر در توزیع ضریب گذردهی الکتریکی مربوطه $\Delta\varepsilon$، توسط بسط فوریه‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta\varepsilon(\mathrm{x,y,z}) = \sum_q \Delta\varepsilon q(k)\exp(-jqkr) \quad (۱)$$

$$K=K_y e_y+K_z e_z \ , \ r=ye_y+ze_z \quad (۲)$$

رابطه‌ی بالا در لایه‌ی توری صادق بوده و در غیراین‌صورت $\Delta\varepsilon=0$ است. در معادله‌ی بالا، K بردار توری است که نسبت به صفحه (خط)

توری عمود است و با دوره تناوب اصلی Λ طبق رابطه‌ی زیر در ارتباط است:

$$|k| = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (۳)$$

ضریب $\Delta\varepsilon_q(x)$ به دامنه‌ی q-امین مؤلفه‌ی فوریه اشاره دارد.

۲-۱- پراش سطحی نور با قطبش TE

فرض کنید که موج صفحه‌ای با قطبش TE و دامنه‌ی واحد با زاویه‌ی θ از لایه اول (z<0) تابیده شود. توزیع میدان در نواحی ورودی (z<0) و خروجی (d<z) می‌تواند به ترتیب به‌صورت زیر بیان شود:

$$Ey0(x,z)=\sum_m \{\delta_{m,0}\exp[-ik_0q_{m,0}(z)] + B_{m,0}\exp[i\,k_0q_{m,0}(z)]\}x\exp(-i\,k_{xm}\,x) \quad (۵)$$

$$Ey2(x,z)=\sum_m A_{m,2}\exp[-i\,k_0q_{m,2}\,(z-d)]x \ldots \exp(-i\,k_{xm}\,x) \quad (۶)$$

که در آن:

$$Kxm = k_0(n_0\sin\theta - m\,\lambda_0/\Lambda)$$
$$q_{l,m} = (n0 - (kxm/k0)^2)^{0.5} \quad (۷)$$

در رابطه (۵)، $\delta_{0,m} = \delta[m]$ برابر با ضربه واحد است و $B_{0,m}$ دامنه میدان الکتریکی مؤلفه m-ام پراش بازگشتی و $A_{2,m}$ دامنه میدان الکتریکی مؤلفه m-ام پراش امواج پیش‌رونده در ناحیه دوم است. k_0 و λ_0 نیز به ترتیب عدد موج و طول‌موج در فضای آزاد و n_0 ضریب شکست در ناحیه‌ی ورودی است. در ناحیه توری (0<z<d) نیز می‌توان مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی E_y و میدان مغناطیسی H_x را به صورت سری فوریه بسط داد.

$$Ey = \sum_i \varepsilon_i(z)\exp[-jk\,xi\,x] \quad (۸)$$

$$Hx = -j(\varepsilon_0/\mu_0)^{1/2}\sum_i U_{xi}(z)\exp[-jkxi\,x] \quad (۹)$$

$$Hx = \frac{j}{(\omega\mu_0)}\nabla\times Ey \quad (۱۰)$$

در روابط فوق $\varepsilon_i(z)$ و $U_{xi}(z)$ به ترتیب دامنه‌های نرمال‌شده i-امین هارمونیک فضایی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند به‌گونه‌ای که دو معادله ماکسول زیر را برقرار سازند؛

$$E = j\omega\mu_0 H\times\nabla$$
$$H = -j\omega\mu_0 E\times\nabla \quad (۱۱)$$

در نتیجه روابط زیر نتیجه خواهد شد:

$$\partial\varepsilon y/\partial z = K_0\,Uxi \quad (۱۲)$$

$$\partial Uxi/\partial z = ((kxi)^2/k0)\,\varepsilon_i - k_0\sum_p \varepsilon_{(i-p)}\,\varepsilon_p \quad (۱۳)$$

با ترکیب دو رابطه اخیر شکل ماتریسی زیر حاصل می‌شود:

$$\left[\partial^2\,\varepsilon_y \Big/ \partial(z')^2\right] = [C][\varepsilon_y] \quad (۱۴)$$

در اینجا $Z'=k_0 z$ بوده و با حل رابطه (۱۴) ماتریس مشخصه‌ی C(MxM) برای مد TE با رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود که M تعداد هارمونیک‌های بسط میدان است [۹]. در این مقاله M=۲۱ در نظر گرفته شد:

$$C_{TE} = E - K_x^2 \quad (۱۵)$$

E یک ماتریس با ابعاد ۲۱×۲۱ با (m,j) المان از ضریب فوریه‌ی $\varepsilon_{(m-j)}$ و k_x یک ماتریس قطری ۲۱×۲۱ با (m,m) المان از k_{xm}/k_0 است [۱۰].

در این حالت میدان در لایه‌ی توری (0<z<d) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$Eyd(x,z)=\sum_m\sum_j w_{m,j}\{A_j\exp[-i\,k_0q_j\,(z-d)] + A_j\exp[-i\,k_0q_j\,(z-d)]\}x\exp(-i\,k_{xm}\,x) \quad (۱۶)$$

که Wm,j عناصر ماتریس بردارهای ویژه و q_j ریشه‌های مجذور مثبت مقادیر ویژه‌ی مرتبط با ماتریس مشخصه‌ی $C(M\times M)$ است. با اعمال شرایط مرزی در سطح مشترک لایه‌ها، یک ماتریس انتشار تعمیم‌یافته‌ی Pl(۴۲×۴۲) و ماتریس دینامیکی D(۴۲×۴۲) حاصل می‌شود. ماتریس انتشار Pl برای محیط شامل لایه‌ی توری یعنی (0<z<d) به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$P1 = \begin{bmatrix} X_1^{-1}\circ; & X_1\circ \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

ماتریس‌های X_1 (۴۲×۴۲) و جفت معکوس آن X_1^{-1}، ماتریس‌های قطری به ترتیب با (m,m) المان از $[\exp(-i\,k_0\,q_{m,d}\,d)]$ و $[\exp(i\,k_0\,q_{m,d}\,d)]$ و ∘ نیز ماتریس تهی است [۱۰]. با اعمال شرایط مرزی ماتریس دینامیک D1 و D2 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D1=[W1\;\;W1\,;\,W1Q1\;\;-W1Q1] \quad (۱۸)$$

$$D2=[W2\;\;W2\,;\,W2Q2\;\;-W2Q2] \quad (۱۹)$$

در لایه‌ی توری، W1 یک ماتریس با ابعاد ۲۱×۲۱ و (m,j) المان از Wm,d و $Q1$ هم یک ماتریس قطری ۲۱×۲۱ با (m,m) المان از $q_{m,d}$ هستند. W1 بیان‌کننده‌ی تزویج امواج هارمونیک در ناحیه‌ی توری است، بنابر این W2 به ماتریس واحد (I) تبدیل می‌شود. Q2 یک ماتریس قطری با ابعاد ۲۱×۲۱ و با (m,m) المان از $q_{m,2}$ است و

معکوس ماتریس D1 و D0 به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$D_0^{-1} = 0.5[W_0^{-1} Q_0^{-1} W_0^{-1}; W_0^{-1} - Q_0^{-1} W_0^{-1}] \quad (۲۰)$$

$$D_1^{-1} = 0.5[W_1^{-1} Q_1^{-1} W_1^{-1}; W_1^{-1} - Q_1^{-1} W_1^{-1}] \quad (۲۱)$$

که W_0^{-1} معادل با ماتریس I^{-1} و Q_0^{-1} معادل با یک ماتریس قطری در ابعاد ۲۱×۲۱ با (m,m) المان از $\frac{1}{q_{m,0}}$ است. برای حل ضرایب انعکاس و عبور کل یعنی $B_{m,0}$ و $A_{m,0}$ در این ساختار، از عبارت زیر به شکل ضرب ماتریس متوالی استفاده می‌شود [۱۰]:

$$[\Delta \quad B_0] = D_0^{-1}\left(D_1 P_1 D_1^{-1}\right) D_2 [A_2 \quad o] \quad (۲۲)$$

Δ، B_0 و A_2 بیان‌کننده‌ی بردارهای ستونی (۱×۲۱) به ترتیب متشکل از $\delta_{m,0}$، $B_{m,0}$ و $A_{2,m}$ هستند و ۰ بردار ستونی تهی است. به دلیل وجود عبارت‌های در حال رشد نمایی در x_1^{-1}، محاسبه‌ی مستقیم معادله‌ی قبل در صورت افزایش ضخامت ساختار چندلایه و بزرگ‌تر شدن بعد ماتریس، می‌تواند به سرریز عددی منجر شود. ازاین‌رو طی یک الگوریتم پایدار عددی که به روش ماتریس انتقال پیشرفته موسوم است، ماتریس انتشار P1(۴۲×۴۲) به زیرماتریس‌هایی با ابعاد ۲۱×۲۱ تقسیم شده و ماتریس x_1^{-1} در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود [۹]:

$$A_2 = a_1^{-1} X_1 a_0^{-1} \Delta \quad (۲۳)$$

$$B_0 = b_0 a_0^{-1} \Delta \quad (۲۴)$$

در این روش ماتریس‌های کمکی (۲۱×۲۱ بعدی)، a_0، a_1، b_0 و b_1 از طریق رابطه‌ی بازگشتی زیر تعیین می‌شود:

$$[a_1 \quad b_1] = D_1^{-1} D_2 [I \quad \circ] \quad (۲۵)$$

$$[a_0 \quad b_0] = D_0^{-1} D_1 [I \quad X_1 b_1 a_1^{-1} X_1] \quad (۲۶)$$

با حل این معادلات بازده پراش انعکاسی مرتبه m-ام (برای قطبش TE) را می‌توان به شکل زیر نوشت[۱۰]:

$$DE_0(m) = \left|B_{m,0}\right|^2 \mathrm{Re}\left(\frac{q_{m,0}}{q_{0,0}}\right) \quad (۲۷)$$

۳- الگوریتم خفاش

الگوریتم خفاش الگوریتمی برگرفته از طبیعت جهت حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی است که بر اساس رفتار انعکاس صدای گروهی از خفاش‌ها در سال ۲۰۱۰ بنا نهاده شد. هر خفاش از بلندی صدا و فرکانس مخصوص به خود استفاده می‌کند و برای یافتن غذا ابتدا از شدت صوت بالا و فرکانس کم شروع کرده و با توجه به این‌که تفاوت و فاصله بین غذا و موانع را می‌داند در هر مرحله وقتی به غذا نزدیک‌تر می‌شود شدت صدا را کاهش داده و فرکانس را افزایش می‌دهد. این رفتار انعکاسی خفاش‌ها با فرض‌های زیر می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی مدل‌سازی شود [۱۱]:

۱: همه خفاش‌ها از انعکاس صدا برای تعیین فاصله استفاده می‌کنند.

۲: پرواز خفاش‌ها به‌صورت تصادفی با سرعت V_i و در مکان X_i با فرکانس ثابت f_{min}، طول‌موج مختلف λ و بلندی صدا A_0 برای جستجوی طعمه صورت می‌گیرد. خفاش‌ها می‌توانند به‌طور خودکار طول‌موج (یا فرکانس) امواج پخش‌شده و نرخ امواج انتشار (R_i) را با توجه به نزدیکی هدف خود تنظیم کنند. نرخ موج می‌تواند در بازه صفر و یک باشد که صفر یعنی موجی وجود ندارد و ۱ یعنی بیش‌ترین نرخ انتشار موج به کار گرفته شده است.

۳: فرض می‌کنیم که بلندی صدا از A_0 با (مقدار بزرگ مثبت) به کمترین مقدار ثابت A_{min} قابل تغییر است. به‌طورکلی فرکانس f در محدوده‌ی $[f_{min}\ f_{max}]$ متناظر با بازه‌ی طول‌موج $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ قرار دارد. در این مقاله $A_0 = ۱$، $A_{min} = ۰،۱$ فرکانس f در محدوده‌ی [۰ ۱] مقداردهی شده‌اند. نحوه تغییر مکان‌ها و سرعت‌ها را در یک جستجو به‌صورت روابط (۲۸) تا (۳۰) مشخص می‌شود. راه‌حل‌های جدید در بازه زمانی T به‌صورت زیر به دست می‌آیند.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (۲۸)$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + \left(X_i^t - X_*\right) f_i \quad (۲۹)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad (۳۰)$$

که در آن X_i^t و V_i^t به ترتیب مکان و سرعت خفاش iام در لحظه t، V_i^{t-1} سرعت همان خفاش در لحظه قبل و β یک بردار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی [۰ ۱] است. X_* بهترین مکان (راه‌حل) کلی است که پس از مقایسه تمام راه‌حل‌ها در میان n خفاش مکان‌یابی شده است [۹]. برای جستجوی محلی نیز، یک راه‌حل از بین بهترین راه‌حل‌های فعلی انتخاب می‌شود. نحوه‌ی جستجوی محلی استفاده‌شده در این مقاله با روش جستجوی الگوریتم خفاش استاندارد متفاوت است. طبق رویکرد پیشنهادی مرجع [۱۰]، پاسخ جدید در جستجوی محلی برای هرکدام از خفاش‌ها با رابطه زیر تولید می‌شود:

$$X_{new} = X_{old} + \left(X_* - X_{old}\right)\varepsilon A^t \quad (۳۱)$$

که در آن $\varepsilon \in [-1,1]$ یک عدد تصادفی است و $A^t = \langle A_i^t \rangle$ میانگین بلندی صوت تمام خفاش‌ها، در این گام زمانی است. به ازای هر پالس، بلندی A_i^t و رتبه‌ی انتشار موج r_i نیز در هر دوره تکرار باید تغییر کنند.

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (۳۲)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^{\circ}\left(1-e^{-\gamma t}\right) \quad (۳۳)$$

کـــه در آن α و γ مقـــادیری ثابـــت هســـتند. بـــه ازای هـــر $0 < \alpha < 1$ و $\gamma > 0$ با افزایش مقـدار t، A_i^t بـه مقـدار صـفر و r_i^{t+1} به r_i° میل می‌کند. در اینجا این پارامترهای ثابت برابر با ۰/۹ در نظـر گرفته شد.

شبه‌کد الگوریتم به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۰، ۱۱]:

- *Initialize the bat population* X_i *and* V_i
- *Define pulse frequency* f_i *at* X_i
- *Initialize pulse rates* r_i *and the loudness* A_i
- *While (t < Max number of iterations)*

Generating new solution by adjusting frequency and updating velocities and locations

- *If (rand >* r_i *)*

$$X_{new} = X_{old} + \left(X_{best} - X_{old}\right)\varepsilon < A >$$

Evaluate fitness function

if (rand < A_i *&* $f\left(X_{new}\right) < f\left(X_{best}\right)$*)*

Accept the new solutions

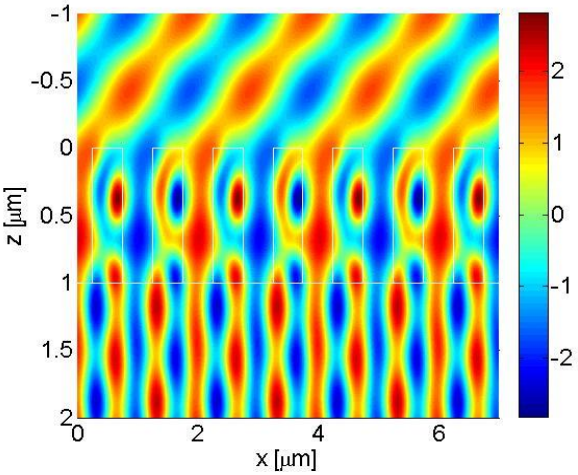
increase r_i *and reduce* A_i

- *Rank the bats and find the current best* X_{best}
- *End while*

در توضیح شبه‌کد بالا، ذکر این نکته جالب است کـه در میـان ایـن خفاش‌ها، چون انتظار می‌رود میزان نرخ ارسال پـالس افـزایش یابـد و میزان بلندی صدا پایین آید، اگر خفاشـی دارای نرخـی کمتـر از یـک مقدار تصادفی باشد بهتر است به سمت بهترین خفاش حرکـت نمایـد. همچنین اگر خفاشی پیدا شود که مقدار شایستگی آن در حرکت فعلی از مقدار شایستگی بهترین خفاش بهتر شده ولی همچنان شدت صدای آن از یک مقدار تصادفی کمتر است، این خفاش باید شدت صدای خود را کاهش و نرخ ارسال پالس را افزایش دهد. به‌بیان‌دیگـر فـاکتور نـرخ ارسال r_i و شدت صوت A_i (در عملگرهای شرطی *if*)، هوش جمعی و پایداری الگوریتم را تضمین می‌کند. تصـادفی بـودن گـام حرکـت نیـز رویکرد جستجوی کلی و ماهیت الگوریتم‌های تکاملی را نشان می‌دهد.

۴- طراحی فیلتر توری پراشی با الگوریتم خفاش

رفتار موج الکترومغناطیسی در یک فیلتر نوری در شکل ۲ نشـان داده شده است. فیلتر مورداستفاده یک توری باینری اسـت کـه دارای یـک زیرلایه و لایه پوششی است و لایه‌ی با ضریب دی‌الکتریک بالاتر درون فیلتر، هفت مرتبه در توری تکرار شده است. مطابق این شکل موج قبل از فیلتر دارای الگوی انتشار منظمی است. اما در درون فیلتر بسـته بـه پارامترهای ساختاری نظیر ضخامت توری، دوره تناوب و دیگر عناصری که در شکل ۱ نشان داده شد، این الگو تغییر یافته و بعد از فیلتـر هـم اثر آن وجود دارد. این یکی از مزایای تزویج مد هـدایت‌شـده در تـوری است که می‌توان موج را به‌صورت دلخواه هدایت نمود.



شکل ۲: بررسی رفتار موج تابیده‌شده، در ساختار تناوبی فیلتر توری با قطبش TE، زاویه تابش ۳۰ درجه با n_{sub} = ۱/۵ و توری با ضرایب شکست n_L = ۱، n_H = ۲/۱ در ۷ تناوب متوالی و انتخاب مقادیر پارامترها به‌صورت f=۰/۷۵ و d=۱ μm، Λ=۰/۲۷ μm

در مورد فیلترهای نوری دو مسئله مطرح است. مسـئله اول، تحلیـل و مسئله دوم، طراحی آن است. تحلیل فیلتر هنگامی طرح مـی‌شـود کـه پارامترهای نوری فیلتر معلوم و طیف آن مجهول باشد. حل این مسئله هرچند اهمیت دارد اما عملاً کار آسانی است. در مقابل، مسئله طراحی فیلتر، علاوه بر اهمیتی که دارد مسئله‌ای بسیار دشوار است. در طراحی فیلتر پارامترهای هندسی باید به‌گونه‌ای تعیین شود که طیف انعکاسی یا عبوری فیلتر تا حد امکان بر طیف مطلـوب منطبـق باشـد. بنـابراین طراحی چنین سیستمی به یک مسئله بهینه‌سازی مـی‌انجامـد. نمـای کلی اجرای برنامه جهت یافتن پارامترهای مجهول طراحی فیلتر نـوری در جدول ۱ نشان داده شده است. مجموعه پارامترهای بهینه‌سازی به‌صورت $X = \{f, d, \Lambda\}$ در نظر گرفته شد.

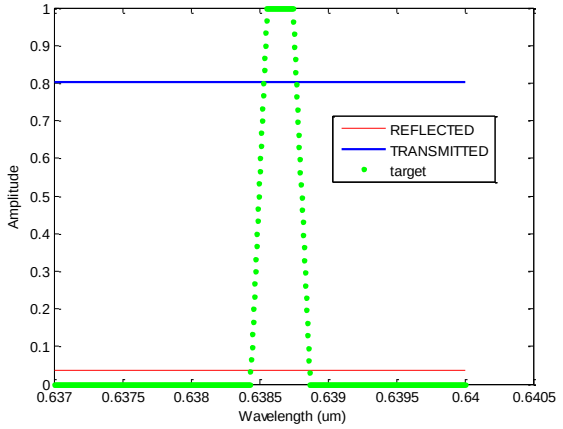
جدول ۱: روند اجرای برنامه جهت طراحی فیلتر

شروع دریافت ورودی‌های n_0, n_{sub}, n_H, n_L
تعیین محدوده متغیرهای بهینه‌سازی θ, d, f, Λ
تعیین ضرایب انعکاس‌پذیری مطلوب
مقداردهی اولیه BA
محاسبه ماتریس مشخصه C
محاسبه بردارهای ویژه و ریشه‌های مجذور مقادیر ویژه ماتریس C جهت تعیین ماتریس‌های W_1 و Q_1
محاسبه ماتریس‌های $D_0, D_0^{-1}, D_1, D_1^{-1}, D_2, Q_0, Q_0^{-1}, Q_2, W_2, W_0$
محاسبه ماتریس‌های a_0, b_0, a_1, b_1
محاسبه ماتریس‌های B_0 و A_2
تعریف تابع شایستگی
استفاده از الگوریتم خفاش و به‌روزرسانی مکان‌ها
تعیین بهترین مکان انتخابی (X)

در این مقاله تابع برازش[۵] (F) متناسب با عکس مجموع مربعات خطا و به‌صورت رابطه (۳۲) بیان می‌شود.

$$F = \frac{1}{1+\{\frac{1}{M}\sum_{\lambda_i}\left[R_{desired}-R_{design}\right]^2\}^{0.5}} \qquad (۳۲)$$

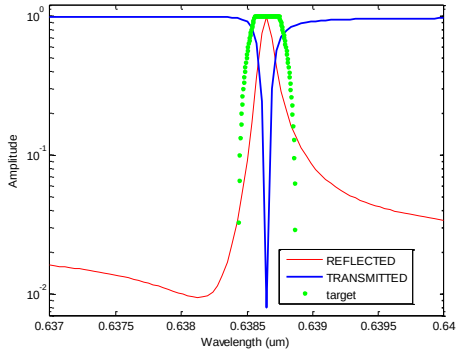
که در آن $R_{desired}(\lambda)$ مجموعه‌ی مطلوب از بازده‌های پراش انعکاسی کل و $R_{design}(\lambda)$ نمونه طراحی‌شده به‌وسیله‌ی Bat است. M تعداد نقاط طول‌موج (λ_iها) است. در تمامی فیلترهای طراحی‌شده در این مقاله، ۸۱ نقطه طول‌موج و ۲۱ مرتبه پراش در نظر گرفته شده است. طراحی این نوع فیلترها به (انتخاب درست) پارامترها خیلی حساس است [۷، ۱۴ و ۱۵]. درواقع انتخاب درست پارامترهای فیلتر در شکل طیف خروجی تأثیر مستقیم دارد. شکل ۳ عملکرد فیلتر را به ازای انتخاب پارامترهای دلخواه نشان می‌دهد. نقاط سبز رنگ طیف انعکاسی مطلوب و منحنی‌های آبی و قرمز به ترتیب ضرایب انعکاس و عبوری به ازای مشخصات داده شده است. چنانچه از این شکل برمی‌آید این نوع فیلترها وابستگی زیادی به انتخاب درست مشخصات طراحی دارند. در این مقاله فیلتر توری باینری با استفاده از الگوریتم خفاش بهبودیافته طراحی‌شده و شکل ۴ نمودار طیف خروجی طراحی‌شده را نشان می‌دهد. نمودار تابع شایستگی الگوریتم خفاش استفاده‌شده نیز در شکل ۵ رسم شده است. این شکل منحنی مقادیر حداکثر تابع شایستگی برای تکرارهای متوالی را به ازای هر بار فراخوانی تابع F نشان می‌دهد. فیلتر میان‌نگذر مطلوب دارای بازتاب کامل در پهنای خط تقریبی ۱ ns و ضرایب شکست محیط تابشی و زیرلایه به ترتیب با n_0=۱، n_{sub}=۱/۴۵ در یک توری با ضرایب شکست n_L=۱، n_H=۲/۱ است. محدوده‌ی طول‌موج‌های λ_{min}=۰/۶۳۷، λ_{max} =۰/۶۴ (برحسب میکرومتر) برای طراحی در نظر گرفته شد. بعد از رسیدن به معیار توقف الگوریتم یعنی ۵۰ مرتبه تکرار، پارامترهای طراحی به‌صورت Λ= ۰/۴۳۰۰ (μm)، d= ۰/۱۱۵۶ (μm)، f= ۰/۶۰۲۴ به دست آمده است. به‌منظور بررسی بیشتر قابلیت این الگوریتم نتایج شبیه‌سازی برای طراحی فیلتر نوری در محدوده طول‌موج تابیده‌شده با λ_{min}=۰/۴۷۹، λ_{max} =۰/۴۹۰ نیز آورده شده است. هدف، داشتن فیلتر میان‌نگذر با بازتاب کامل در پهنای خط تقریبی ۱/۵ nm و طول‌موج تشدید λ_{res} =۰/۴۸۲۸ است که در آن ضرایب شکست محیط تابشی و زیرلایه به ترتیب با n_0 =۱، n_{sub} =۱/۴۵ و ضرایب شکست توری به‌صورت n_L =۱، n_H =۱/۷۵ مقداردهی شد. پس از اجرای برنامه، مشخصات فیلتر توری به‌صورت X ={0.61,0.5490,0.3299} به‌دست‌آمده آمد. شکل ۶ طیف فیلتر میان‌نگذر را در مقیاس dB برحسب طول‌موج نشان می‌دهد.



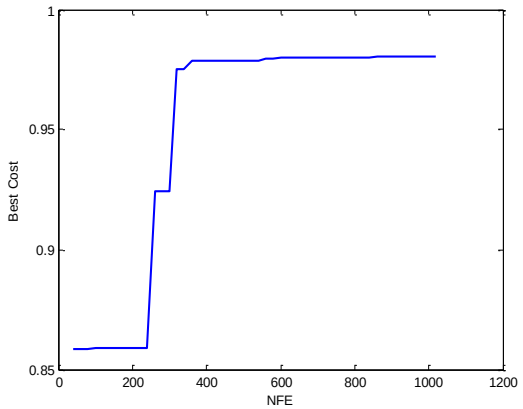
شکل ۳: ضرایب انعکاس و عبوری موج تابیده‌شده با قطبش TE در فرود عمود و با n_{sub}=۱/۵ در یک توری با ضرایب شکست n_L = 1، n_H =۱/۴۵ و انتخاب مقادیر پارامترها به‌صورت Λ=۰/۲۷ μm، d=۰/۸۳ μm و f=۰/۳۲

محیط انتقال در شبکه‌های نوری، فیبر نوری است و باند طول‌موجی که می‌توان برای ارسال اطلاعات استفاده کرد، پنجره‌های دوم و سوم

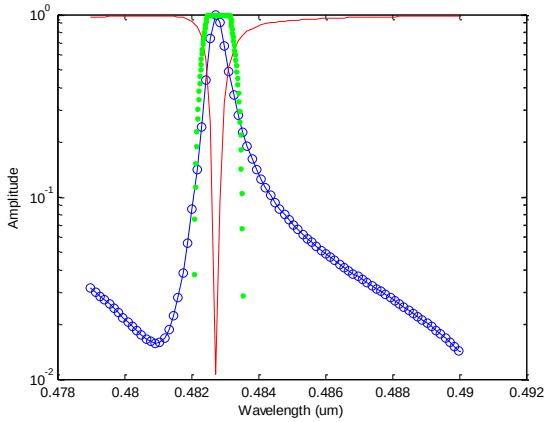
مخابرات نوری یعنی بین ۱۲۶۰ تا ۱۶۲۵ نانومتر، است. پنجره اول مخابرات نوری در طول‌موج ۸۵۰ نانومتر و پنجره‌های دوم و سوم به ترتیب در طول‌موج‌های ۱۳۰۰ نانومتر با کم‌ترین پاشندگی و ۱۵۵۰ نانومتر با کم‌ترین تلفات هستند.



شکل ۴: طیف انعکاسی و عبوری موج تابیده‌شده (در مقیاس dB) بر اساس الگوریتم خفاش بهبودیافته در فیلتری با مشخصات شکل ۳



شکل ۵: مقدار تابع شایستگی الگوریتم خفاش بهبودیافته به ازای تکرارهای متوالی

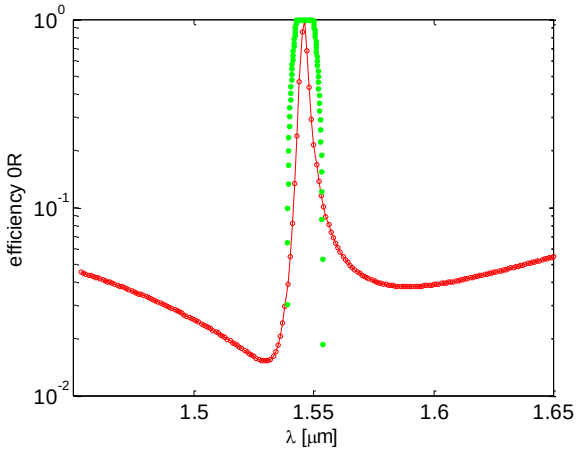


شکل ۶: ضرایب انعکاس و عبوری موج تابیده‌شده با قطبش TE در محدوده‌ی (برحسب μm) λ_{min}=۰/۴۷۹، λ_{max}=۰/۴۹۰

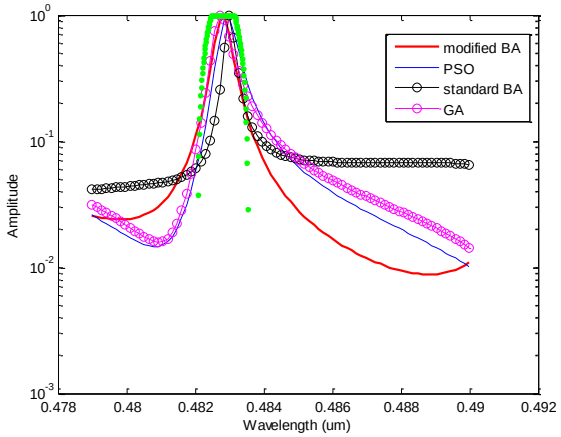
باهدف استفاده از این نوع فیلترها در کاربردهای DWDM[۶]، طراحی و بهینه‌سازی فیلتر GMR در بازه‌ی پنجره C از استاندارد DWDM یعنی در محدوده‌ی طول‌موج C-Band/1530-1565 برحسب نانومتر ارائه گردیده است. شکل ۷ نمودار طیف خروجی فیلتر طراحی‌شده را در بازه پنجره C از استاندارد DWDM نشان می‌دهد. فیلتر میان‌نگذر مطلوب با مدولاسیون تناوبی $n_L = 1$، n_H=۲/۱ و ضرایب شکست محیط تابشی و زیرلایه به ترتیب با n_0=۱، n_{sub}=۱/۵، باید دارای بازتاب کامل در پهنای خط تقریبی ns ۱ باشد. محدوده‌ی طول‌موج‌های λ_{min}=۱/۴۵۳ و λ_{max} = ۱/۶۵ برای طراحی در نظر گرفته شد. بعد از اجرا الگوریتم، پارامترهای طراحی به‌صورت $X = \{0.931, 0.7931, 0.8009\}$ به دست آمده است. به‌عنوان مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای طراحی فیلتری با مشخصات شکل ۶ با استفاده از الگوریتم‌های اجتماع پرندگان[۷] و الگوریتم خفاش استاندارد و نیز الگوریتم ژنتیک[۸] در شکل ۸ ارائه گردیده است. تعداد جمعیت در هر الگوریتم برابر با ۵۰ (کروموزوم یا ذره)، مقداردهی اولیه جمعیت به‌صورت مقادیر پیوسته و تصادفی از محدوده‌ی مجاز داده‌های ورودی بوده است. نرخ بازترکیب و جهش در الگوریتم ژنتیک به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۰۳ انتخاب شده است. با توجه به مرجع [۱۲]، W_{min}=۰/۴، W_{max}=۰/۹ و C_2= C_1=۱/۴۹۰۲ در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است طیف حاصل از طراحی فیلتر با الگوریتم مبتنی بر BA، دارای ضریب انعکاس کامل در فرکانس مرکزی بوده و ضریب انعکاس آن در باند کناری نسبت به دیگر الگوریتم‌های بررسی‌شده به صفر نزدیک‌تر (دارای افت بیشتر) است. جدول ۲ مقدار پارامترهای به‌دست‌آمده، میزان تابع شایستگی در انتهای اجرای هر الگوریتم و زمان لازم برای اجرا را، بر اساس داده‌های ورودی برنامه MATLAB در طراحی فیلتری با مشخصات شکل ۳، نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۸ و مقایسه‌ی نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشنهادی در پیدا کردن طول‌موج تشدید، بهتر از الگوریتم‌های اجتماع پرندگان، ژنتیک و الگوریتم خفاش استاندارد عمل می‌کنند. میزان ضریب انعکاس به‌دست‌آمده با الگوریتم خفاش بهبودیافته، نیز نسبت به الگوریتم PSO به طیف مطلوب نزدیک‌تر است.

جدول ۲: نتایج طراحی فیلتر با الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم	پارامترهای به‌دست‌آمده	میزان تابع شایستگی	زمان اجرای برنامه
GA	۰/۴۴۳۶-۰/۱۴۷۳-۰/۴۳۰۲	۰/۸۹۰۵۵	۲۶۷/۶۶۷۳
PSO	۰/۴۴۲۳-۰/۱۲۶۱-۰/۴۳۰۰	۰/۸۹۸۱۶	۲۱۳/۱۷۸۶
Standard-BA	۰/۶۹۳۳-۰/۱۱۱۷-۰/۴۲۹۶	۰/۸۹۵۱۷	۲۲۰/۹۰۷۳
Modified-BA	۰/۵۸۶۵-۰/۱۲۵۸-۰/۴۳۰۰	۰/۹۸۹۴۴	۱۳۵/۶۲۵۴



شکل ۷: ضرایب انعکاس و عبوری برحسب dB برای موج تابیده‌شده با قطبش TE جهت طراحی فیلتر بر اساس استاندارد DWDM



شکل ۸: ضرایب انعکاس و عبوری برحسب dB برای موج تابیده‌شده با قطبش TE در طراحی فیلتر با الگوریتم‌های PSO، Standard BA، Modified BA و GA

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، باهدف طراحی نوع خاصی از فیلترهای توری پراشی از الگوریتم خفاش جهت یافتن پارامترهای بهینه استفاده شده است. فیلترهای GMR برای داشتن کارایی در یک طیف خاص موردنیاز وابسته به پارامترهای مختلفی هستند که جهت یافتن این پارامترها به عملیات سنگین ریاضی نیاز است و عملاً تحقق این موضوع مسئله‌ای چالش‌برانگیز است. اما با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش دست‌یابی به نتایج مطلوب در مدت‌زمان کم و با تقریب بسیار بالایی امکان پذیر خواهد بود.

نحوه‌ی جستجوی محلی الگوریتم خفاش موردبررسی در این مقاله، با رویکردی متفاوت نسبت به الگوریتم خفاش استاندارد است و با روند پیشنهادی مرجع [۱۳] یک تکنیک بهینه‌سازی تکاملی، قدرتمند و پایدار ارائه شده است که دارای توانمندی قابل‌توجه و بازده بالا جهت طراحی فیلترهای GMR انعکاسی است.

مراجع

[1] T. K. Gaylord and M. G. Moharam, “Analysis and applications of optical diffraction by gratings,” Proceedings of the IEEE, vol. 73, no. 5, pp. 894–937, 1985.

[2] R. Magnusson and S.-S. Wang, Optical guided-mode resonance filter. Google Patents, 1993.

[3] S. Tibuleac, R. Magnusson, T. A. Maldonado, P. P. Young, and T. R. Holzheimer, “Dielectric frequency-selective structures incorporating waveguide gratings,” Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 48, no. 4, pp. 553–561, 2000.

[4] C. M. Wang, J. Y. Chang, C. L. Hsu, C. C. Lee, and J. C. Yang, “Si-based guided-mode resonance filter on a micro-optical bench,” Electronics Letters, vol. 40, no. 21, pp. 1335–1336, 2004.

[5] Z. S. Liu, S. Tibuleac, D. Shin, P. P. Young, and R. Magnusson, “High-efficiency guided-mode resonance filter,” Optics letters, vol. 23, no. 19, pp. 1556–1558, 1998.

[6] S. Tibuleac and R. Magnusson, “Narrow-linewidth bandpass filters with diffractive thin-film layers,” Optics letters, vol. 26, no. 9, pp. 584–586, 2001.

[7] M. Shokooh-Saremi and R. Magnusson, “Particle swarm optimization and its application to the design of diffraction grating filters,” Optics letters, vol. 32, no. 8, pp. 894–896, 2007.

[8] T. K. Gaylord and M. G. Moharam, “Analysis and applications of optical diffraction by gratings,” Proceedings of the IEEE, vol. 73, no. 5, pp. 894–937, 1985.

[9] W. Lee and F. L. Degertekin, “Rigorous coupled-wave analysis for multilayered grating structures,” in Integrated Optoelectronics Devices, 2003, pp. 264–273.

[10] M. G. Moharam, T. K. Gaylord, E. B. Grann, and D. A. Pommet, “Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings,” JOSA A, vol. 12, no. 5, pp. 1068–1076, 1995.

[11] X.-S. Yang, “A new metaheuristic bat-inspired algorithm,” in Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010), Springer, 2010, pp. 65–74.

[12] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization.” Proc. IEEE International Conf. on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1995.

[13] T. C. Bora, L. dos S. Coelho, and L. Lebensztajn, “Bat-inspired optimization approach for the brushless DC wheel motor problem,” Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 48, no. 2, pp. 947–950, 2012.

[14] W. Chegal, H. M. Cho and Y. J. Cho, "Analysis of Guided-mode Resonant Grating Filters by Using a Rigorous Coupled-wave Method," Journal of the Korean Physical Society, vol. 59, no. 2, August 2011, pp. 326-331.

[15] M. Shokooh-Saremi and R. Magnusson, "Design and Analysis of Resonant Leaky-mode Broadband Reflectors," Journal of Mathematics, 2008.

[16] S. Saremi, S. M. Mirjalili, and S. Mirjalili, "Chaotic krill herd optimization algorithm," Procedia Technology, vol. 12, pp. 180–185, 2014.

زیرنویس‌ها

[1] Guided Mode Resonance
[2] Rigorous Coupled-Wave Analysis
[3] Maxwell
[4] Diffraction Efficiency
[5] Fitness Function
[6] Dense Wavelength Demultiplexing (DWDM)
[7] Particle Swarm Optimization: PSO
[8] Genetic Algorithm: GA