

# طراحی نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانه‌ای زنجیره‌ای ( $CM_{1-r}$ -TPNF) برای به کارگیری در افزاره‌های ریزساختار پزشکی

فریبا سعید<sup>۱</sup>  
حسن فاطمی<sup>۲</sup>

## خلاصه

**مقدمه:** در این مقاله به طراحی پالایشگر جدیدی به نام نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانه‌ای زنجیره‌ای ( $CM_{1-r}$ -TPNF) پرداخته شده است که به دلیل داشتن عملکرد گذردهی زیر طول موجی امواج الکترومغناطیس می‌توان آن را در ابعاد هندسی بسیار ریز، در مقیاس نانومتر، طراحی و تولید کرد و در ساخت ابزار ریزساختار دقیق پزشکی مانند MEMS ها به کار گرفت.

**روش بررسی:** این نانوپالایشگر با مدل‌سازی به روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) در فضای مجازی طراحی و شبیه‌سازی شده و بررسی عملکرد آن با استفاده از اصل برهم‌نهی صورت گرفته است. برای اطمینان درستی نتایج با نتایج حاصل از روش هم‌ارزمداری (ECM) مقایسه شده است.

**یافته‌ها:**  $CM_{1-r}$ -TPNF از کنارهم قرار گرفتن زنجیروار  $r$  نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانه‌ای شکل می‌گیرد و در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ نانومتر تا ۵ میکرومتر کاربرد دارد و می‌تواند هم نواحی بسیار باریک میان‌گذر و هم پهنای بسیار وسیع میان‌گذر را با دقت بالا تولید نماید که فرآیند مربوط به هر دو مورد در مثال‌هایی آورده شده است.

**نتیجه‌گیری:** باتوجه به ویژگی‌های  $CM_{1-r}$ -TPNF استفاده از آن در ساخت ابزار دقیق و ریزساختار فوتونیک بسیار مناسب است. در بیناب گذردهی نسبی، آن دو فاکتور شدت دامنه و پهنای باریکه گذردهی به هم وابسته‌اند که می‌توان برحسب مورد و برای کاربردهای گوناگون یکی را نسبت به دیگری در اولویت قرار داد. البته بر اثر افزایش درصدی موج رفتاری نوسانی پلکانی و عملکردی کاواک‌گونه خواهند داشت.

**واژه‌های کلیدی:** نانوپالایشگرهای پلاسمونیک، نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چنددندانه‌ای، روش تفاضل محدود در حوزه زمان

۱. کارشناس ارشد فوتونیک گرایش الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
۲. استادیار فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

نویسنده مسئول: فریبا سعید، تلفن ۰۹۱۳۳۴۰۶۴۹۰  
پست الکترونیک: fariba.saeed@gmail.com

## مقدمه

انسان از دیرباز تاکنون سعی در هرچه کوچک‌تر کردن ابعاد هندسی ابزار تبدیل و انتقال انواع انرژی‌ها برای کاربردهای گوناگون داشته است. عواملی چون شتاب انقلاب صنعتی، رشد فناوری‌های نانو و همچنین دست‌یافتن به تکنولوژی ساخت افزاره‌های نانو اپتیکی زمینه را برای گسترش صنایع پیشرفته ساخت مکانیزم‌های ریزساختار تبدیل و یا انتقال انرژی حاصل از امواج الکترومغناطیس فراهم آورده است. بدیهی است ضرورت استفاده از این مکانیزم‌ها در بسیاری از حوزه‌های کاربردی همچون پزشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این مقاله به معرفی نوع جدیدی از نانوپالایشگرهای پلاسمونیک پرداخته شده است که برای به‌کارگیری در ساخت دستگاه‌های دقیق پزشکی طراحی شده و با شبیه‌سازی در فضای مجازی چگونگی عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

در حال حاضر نانوپالایشگرهای پلاسمونیک<sup>۱</sup> میان‌گذر و میان‌نگذر به دلیل داشتن عملکرد گذردهی زیر طول موجی<sup>۲</sup> امواج الکترومغناطیس آن‌ها در بسیاری از صنایع پیشرفته فوتونیک کاربردی فراوان دارند. باتوجه به همین ویژگی می‌توان این پالایشگرها را در ابعاد هندسی بسیار ریز، نانومتر، کوچک‌تر از طول موج ورودی و بدون ایجاد پدیده پراش و اتلاف انرژی حاصل از آن [۲ و ۱] طراحی و اجرا کرد تا نواحی میان‌گذر بسیار باریک<sup>۳</sup> و میان‌نگذر بسیار وسیع<sup>۴</sup> را در محدوده‌های فرکانسی مورد نظر و با دقت مطلوب تولید نمایند [۳]. لذا باتوجه به ضرورت رشد فن‌آوری‌های به‌کاررفته در ساختار ابزار و ادوات پزشکی دقیق و کم‌حجم، مانند MEMS، می‌توان از این ویژگی در زمینه طراحی و تولید این افزاره‌ها بیش‌ازپیش بهره برد. از این بین، نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چند دندانه‌ای و یا M-TPNFs<sup>۵</sup> برای تولید نواحی گذردهی و یا پالایشی محدوده مادون قرمز که برای تشخیص و درمان برخی بیماری‌ها حائز اهمیت است، مناسب به نظر می‌آیند. اما، درصد زیادی از آن‌ها (چه از نوع میان‌گذر یا میان‌نگذر) قادر به تولید محدوده‌های کاربردی کامل نیستند. بنابراین برای رفع این عیب به طراحی نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چند دندانه‌ای زنجیره‌ای یا CM<sub>1-r</sub>-TPNF<sup>۶</sup> پرداخته شده است که می‌توانند ضمن ایجاد نواحی گذردهی یا پالایشی مورد نظر به اصلاح و بهینه‌سازی دقیق این محدوده‌ها بپردازند.

## روش بررسی

مدل‌سازی عددی محیط پلاسمونیک به روش عددی اختلاف محدود در حوزه زمان یا FDTD<sup>۷</sup> [۴-۶] با دقت  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2\text{nm}$  انجام شده است و در مرحله کدنویسی به دلیل تقارن ساختار هندسی مسئله بدون اینکه در نحوه عملکرد این افزاره اختلالی ایجاد شود، محاسبات در فضای دوبعدی انجام شده است تا طراحی و اجرای برنامه‌ها زمانبری کمتری داشته باشند. قسمتی از این مراحل با کمک محیط نرم‌افزاری Meep<sup>۸</sup> [۷] که توسط دانشگاه MIT به صورت کد باز<sup>۹</sup> و مناسب برای محیط‌های پلاسمونیک ارائه شده، صورت گرفته است.

بررسی‌های مربوط به نحوه عملکرد CM<sub>1-r</sub>-TPNF و چگونگی ایجاد، اصلاح و بهینه‌سازی بیناب‌های گذردهی نسبی پالایشگر براساس مدل دروده-لورنتس<sup>۱۰</sup> [۸-۱۰] و با استفاده از اصل برهم‌نهی<sup>۱۱</sup> به‌طور هم‌زمان انجام پذیرفته است و برای اطمینان از درستی عملیات، نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از روش مدل هم‌ارزمداری یا CEM<sup>۱۲</sup> که براساس تئوری خطوط انتقال مخابراتی عمل می‌کند [۱۴-۱۱]، تطبیق داده شده است [۱۵].

در روش عددی، اختلاف محدود در حوزه زمان دو معادله کرل ماکسول به‌همراه معادله چگالی شار به‌شکل تفاضل محدود در هر دو حوزه فضا و زمان تبدیل می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. در این معادلات میدان الکتریکی و مغناطیسی برحسب میدان‌ها در زمان قبلی در هر لحظه محاسبه و بازنویسی می‌شوند. اگر k نشان‌دهنده موقعیت و nt نماد زمان باشند، معادلات (۱) و (۲) فرم اختلاف محدود در حوزه زمان مؤلفه X آن‌ها هستند. به‌طور مشابه این معادلات برای پنج مؤلفه باقی‌مانده نیز نوشته شده است و برای گام‌های زمانی بعدی و نقاط مکانی دیگر فضا در زمان واحد حل می‌شوند.

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) = E_x^{n-\frac{1}{2}}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} [H_y^n(k+\frac{1}{2}) - H_y^n(k-\frac{1}{2})] \quad (1)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(k+\frac{1}{2}) = H_y^n(k+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_x^{n+\frac{1}{2}}(k+1) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)] \quad (2)$$

در مدل هم‌ارزمداری که براساس تئوری خطوط انتقال مخابراتی عمل می‌کند و هم‌ارزمداری ساختار پالایشگرها را شبیه‌سازی می‌کند، ماتریس

1. Plasmonic Nano Filter
2. Sub-Wavelength
3. Narrow-band
4. Broad-band
5. Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters

6. Chain Cascaded Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters
7. Finite Diference Time Domain Method
8. MIT Electromagnetic Equation Propagation
9. Open Source

10. Drude-Lorentz model
11. Super position principle
12. Circuit Equivalent Method

به بیان ساده می‌توان اصل برهم‌نهی به‌طور هم‌زمان را مجموع و یا هم‌پوشانی هم‌زمان تأثیر دو یا چند عامل اثرگذار را در یک موقعیت دانست که در برخی از پدیده‌های فیزیکی صادق است.

TPNF باشند، به ترتیب از ابتدای پالایشگر CM1-r-TPNF هر یک دارای  $n1, n2, \dots, nr$  دندانۀ عمود بر موجبر MDM که با فاصلۀ  $\Delta c_1, \Delta c_2, \dots, \Delta c_{r-1}$  از یکدیگر قرار دارند، می‌باشند. ارتفاع و پهنای دندانها و همچنین فاصلۀ بین دندانهای مجاور در هر یک از این M-TPNFها با یکدیگر برابرند. پهنای دندانها به ترتیب از ابتدای موجبر برابر  $w_{r1}, w_{r2}, \dots, w_{r1}$ ، ارتفاع دندانها  $d_1, d_2, \dots, d_r$  و فاصلۀ هر دندان با دندانۀ مجاورش  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$  تعریف شده است. اندازه فاصلۀ اولین و آخرین دندان در CM1-r-TPNF از ابتدا و انتهای موجبر L و پهنای موجبر MDM برابر با  $w$  می‌باشد. در این ساختار، ماده دی‌الکتریک (هوا) با ضریب گذردهی  $\epsilon_1$  و فلز (نقره) با ضریب گذردهی  $\epsilon_2$  معین شده‌اند.  $\epsilon_2$  از مدل دروده-لورنتس و از رابطۀ ۱ با توجه به پارامترهای تجربی به دست آمده است [۱۵، ۱۸ و ۱۹]. موج الکترومغناطیس ورودی، موج گوسی است که در محدوده طول موجهای ۴۰۰ نانومتر تا ۲ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است و می‌تواند تا محدوده ۵ میکرومتر گسترش پیدا کند.

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega - i\gamma)\omega} + \sum_{n=1}^s \frac{f_n \omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 - i\gamma_n \omega} \quad (۸)$$

## ۲. چگونگی به دست آوردن بیناب گذردهی نسبی CM1-r-TPNF

با توجه به این که بیناب گذردهی نسبی هر پالایشگر تأثیر پاسخ محیطی آن سیستم بر موج الکترومغناطیس ورودی می‌باشد و ماتریس انتقال سیستم‌های اپتیکی چندگانه از حاصل ضرب ماتریس‌های انتقال هر یک از اجزای تشکیل دهنده آن‌ها شکل می‌گیرد، اگر تأثیر برهم‌نهی همزمان r پالایشگر M-TPNF که به صورت زنجیروار چیده شده‌اند، شکل ۱ مورد نظر باشد، بنابراین می‌توان با ضرب کردن بیناب‌های گذردهی نسبی آن‌ها در یکدیگر و اضافه کردن تأثیر های شرکت کننده در ساختار هندسی پالایشگر، بیناب گذردهی نسبی آنرا به دست آورد.

با توجه به مقالاتی که پیش از این ارائه شده‌اند [۱۸ و ۲۰]، در هر پالایشگر M-TPNF هر یک از دندانها و فاصلۀ بین دندانهای مجاور،  $\Delta$ ، همانند کاواک‌های فابری- پرو با اندازه آینه‌های محدود عمل می‌کنند و می‌توانند طی فرآیند تشدید، برخی فرکانس‌ها و همچنین هارمونیک‌های آن‌ها را جذب کنند و شدت انرژی موج الکترومغناطیس را در فرکانس‌های مذکور تضعیف نمایند. البته این موضوع در CM1-r-TPNF برای  $\Delta_r$  و  $\Delta_{r-1}$  (r=1,2,3, ...) که به ترتیب فاصلۀ بین دندانها و M-TPNFها هستند نیز صادق می‌باشد.

بدیهی است سیستم مطلوب پالایشگری سیستمی است که بتواند بیشترین جذب و یا گذردهی را در محدوده‌های پالایشی مورد نظر داشته باشد. با در نظر گرفتن کاربردهای متفاوت، در مواردی لازم است در یک محدوده پالایشی گسترده تنها ناحیۀ بسیار باریکی از بازۀ

گذردهی نسبی هر یک از دندانهای M-TPNF به صورت زیر است:

(۳)

$$T = A(L)B(Z_{Tooth}^{(1)})A(\Delta_1)B(Z_{Tooth}^{(2)})A(\Delta_2)\dots B(Z_{Tooth}^{(r)})\dots A(\Delta_{M-1})B(Z_{Tooth}^{(M)})A(L)$$

$$A(z) = \begin{pmatrix} \exp(-j\beta z) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta z) \end{pmatrix} \quad (۴)$$

$$B(Z_{Tooth}^{(i)}) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} & -\frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} \\ \frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} & 1 - \frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} \end{pmatrix} \quad (۵)$$

$$Z_{MDM} = \frac{\beta(h)h}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1} \quad (۶)$$

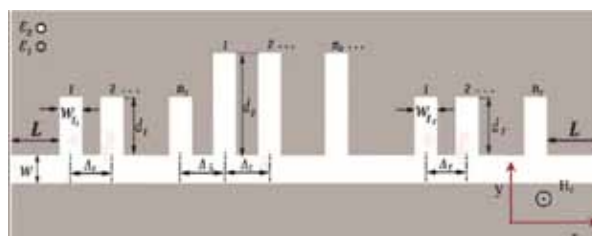
$$Z_{Tooth}^{(i)} = \frac{\beta(w)w\sqrt{\epsilon_1} - j\sqrt{\epsilon_2} \tan \beta(w)d}{\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \sqrt{\epsilon_2} - j\sqrt{\epsilon_1} \tan \beta(w)d} \quad (۷)$$

که در آن ماتریس انتقال امواج الکترومغناطیسی توصیف کننده انتشار موج در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی موجبر،  $A(\Delta_j)$  ماتریس مربوط به انتقال در فاصله‌های بین دندانهای موجبر،  $B(Z_{Tooth}^{(i)})$  توصیف کننده جفت‌شدگی بین موج‌های ورودی و بازتابی مربوط به هر یک از دندانها و  $Z_{MDM}$  و  $Z_{Tooth}$  به ترتیب امپدانس‌های هم‌ارزمداری برای موجبر و هر یک از دندانها می‌باشند [۱۵].

## یافته‌ها

### ۱. ساختار هندسی CM1-r-TPNF

شکل ۱ مقطع عرضی از الگوی طراحی شده برای یک نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانهای زنجیره‌ای را نشان می‌دهد. CM1-r-TPNF از کنارهم قرار گرفتن زنجیروار r پالایشگر از نوع M-TPNF تشکیل می‌شود.

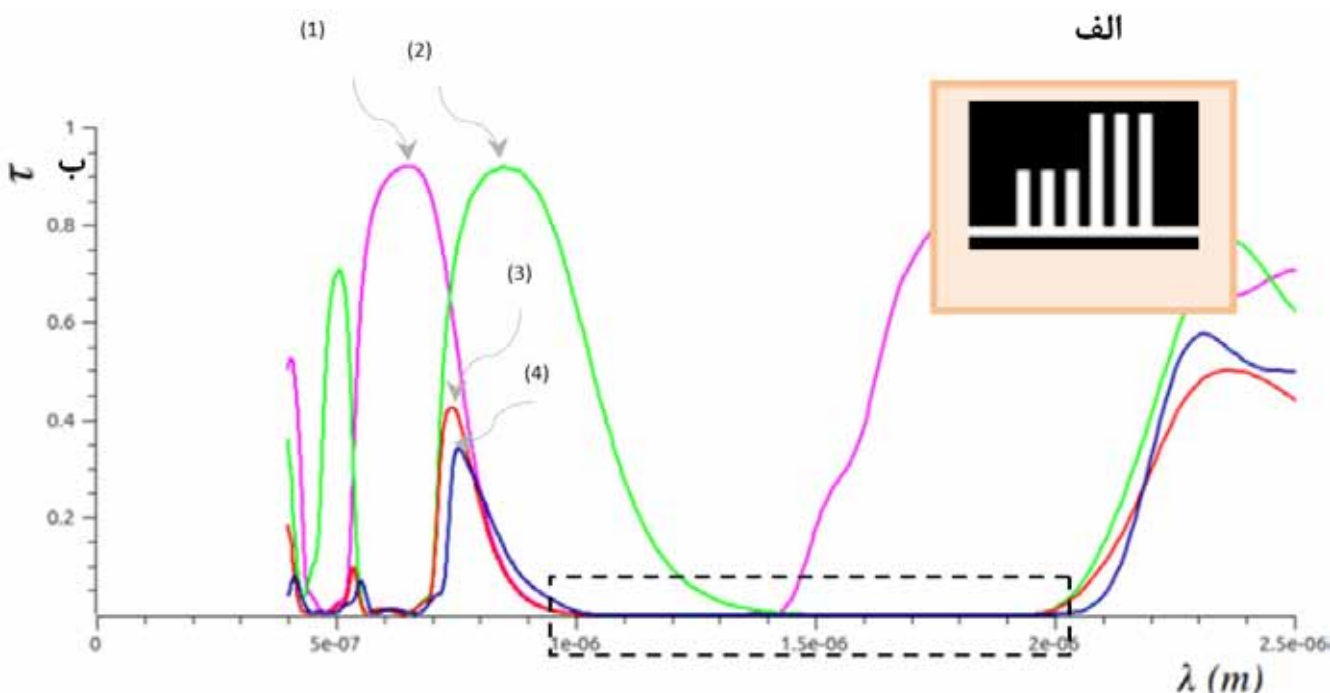


شکل ۱: مقطع عرضی از الگوی طراحی شده برای CM1-r-TPNF

اگر M-TPNFهای مفروض n1-TPNF، n2-TPNF، ... و nr-

### ۳-۱- استفاده از $CM_{1-r}$ -TPNF برای پالایش پهنای گسترده‌ای از بازه فرکانسی در طول موج‌های بخصوص

در این مرحله به‌عنوان مثال، طراحی پالایشگر میان‌نگذر برای ایجاد پهنای پالایشی بین طول موج‌های ۱ تا  $2/3$  میکرومتر مورد نظر می‌باشد. برای این کار مشاهده می‌شود هم‌پوشانی بیناب‌های گذردهی نسبی پالایشگرهای 3-TPNF با ارتفاع دندان‌های ۲۰۰ نانومتر و 3-TPNF با ارتفاع دندان‌های ۳۰۰ نانومتر می‌توانند این محدوده را پوشش دهند. حاصل ضرب این دو بیناب نتیجه برهم‌نهی این دو 3-TPNF می‌باشد که در شکل ۲ نمایش داده شده است. در صورتی که اثر  $\Delta c_1$  اضافه شود، بیناب گذردهی نسبی 3-3-TPNF به دست می‌آید (بیناب ۴).



شکل ۲: الف) مقطع عرضی از 3-3-TPNF (ب) بیناب‌های گذردهی نسبی 3-TPNF نخست بیناب (۱)، 3-TPNF دوم بیناب (۲)، حاصل برهم‌نهی آن‌ها بیناب (۳) و 3-3-TPNF بیناب (۴)، درازای  $\epsilon_1=1, \epsilon_2=\epsilon_{Ag}$ ,  $L=200$  nm,  $w = w_1 = w_2 = 50$  nm و  $\Delta c_1 = \Delta_1 = \Delta_2 = 100$  nm می‌باشند.

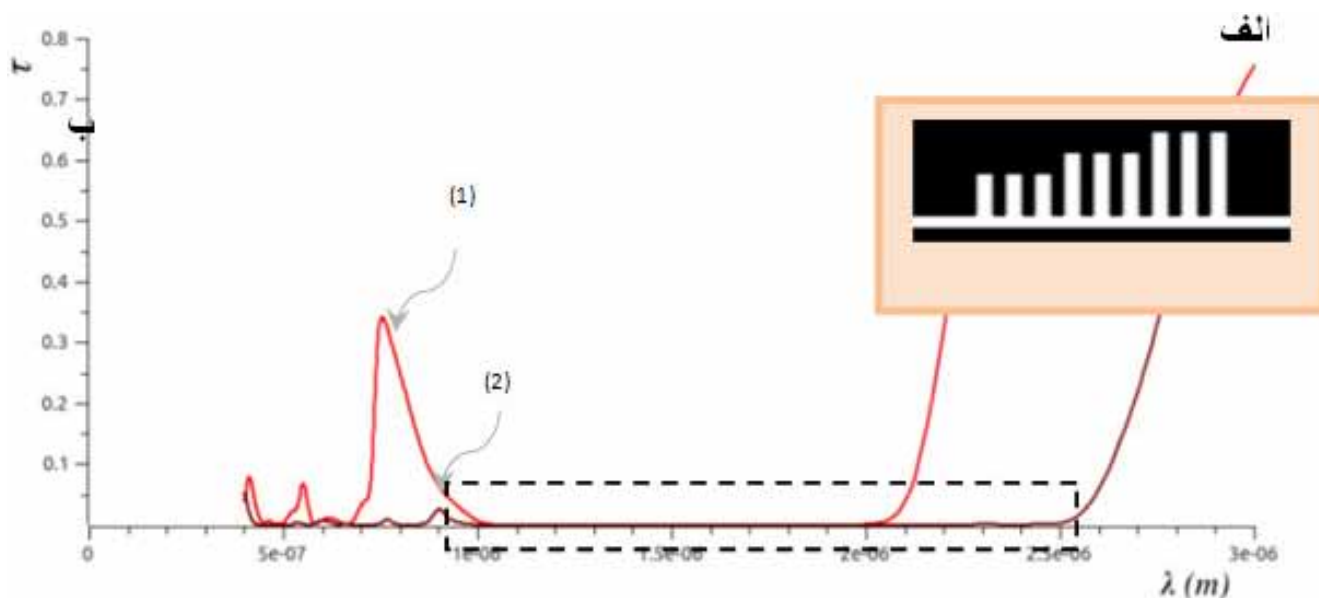
باقی‌مانده بازه فرکانسی مورد نظر را پالایش دهد.

بدیهی است با توجه به افزایش تعداد دندان‌ها، تعداد  $\Delta r$ ها و همچنین  $\Delta c$ ها کیفیت فرآیند پالایشگری افزایش می‌یابد و دامنه بیناب گذردهی کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است یک پالایشگر 3-TPNF دیگر با ارتفاع دندان‌های ۴۰۰ نانومتر به مجموعه پالایشگر شکل (۲-الف) اضافه شده است. در شکل (۳-ب) با مقایسه بیناب‌های گذردهی نسبی 3-3-TPNF، بیناب (۱)، و 3-3-TPNF، بیناب (۲)، می‌توان به سهولت به محدوده پالایشی پهن‌تر اشاره نمود.

فرکانسی اجازه گذردهی داشته باشد یا برعکس در برخی موارد ایجاد محدوده پالایشی گسترده‌تری مورد کاربرد می‌باشد. در صورت معمولاً ابتدا محدوده‌ای تقریبی از بازه پالایشی مطلوب را تولید می‌کنند و سپس طی فرآیندی برنامه‌ریزی شده به اصلاح آن می‌پردازند تا بازه پالایشی مورد نظر حاصل شود. البته این روند برای بهینه‌سازی نواحی پالایش شده نیز کاربرد دارد. بنابراین می‌توان با انتخاب صحیح M-TPNF هایی که بیناب‌های گذردهی نسبی‌شان هم‌پوشانی مناسبی با یکدیگر داشته باشند به ایجاد، اصلاح و بهینه‌سازی محدوده‌های گذردهی و پالایشی مطلوب دست یافت. در ادامه، برای واضح‌تر شدن مطلب با دو مثال کاربردی نحوه عملکرد  $CM_{1-r}$ -TPNF برای تولید پالایشگرهای میان‌گذر و میان‌نگذر توضیح داده شده است.

در این پالایشگر فرض بر این است فاصله بین 3-TPNF نخست و 3-TPNF دوم (یا برابر با فاصله بین هر دو دندان مجاور در هریک از M-TPNFها (یعنی؛  $\Delta c_1 = \Delta_1 = \Delta_2$ ) باشد. با توجه به اندازه یکسان  $\Delta_1$ ،  $\Delta_2$  و  $\Delta c_1$ ، این پارامترها از عملکرد مشابهی در رابطه با انتخاب و حذف طول موج‌های مناسب برخوردارند. بنابراین همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، بیناب (۴) نسبت به بیناب (۳) از افت دامنه گذردهی بیشتری در طول بازه فرکانسی برخوردار است.

برای پهن‌تر نمودن بازه پالایشی کافی است M-TPNFهای مناسب دیگری را به سیستم اضافه کرد تا بیناب گذردهی نسبی آن‌ها بتواند

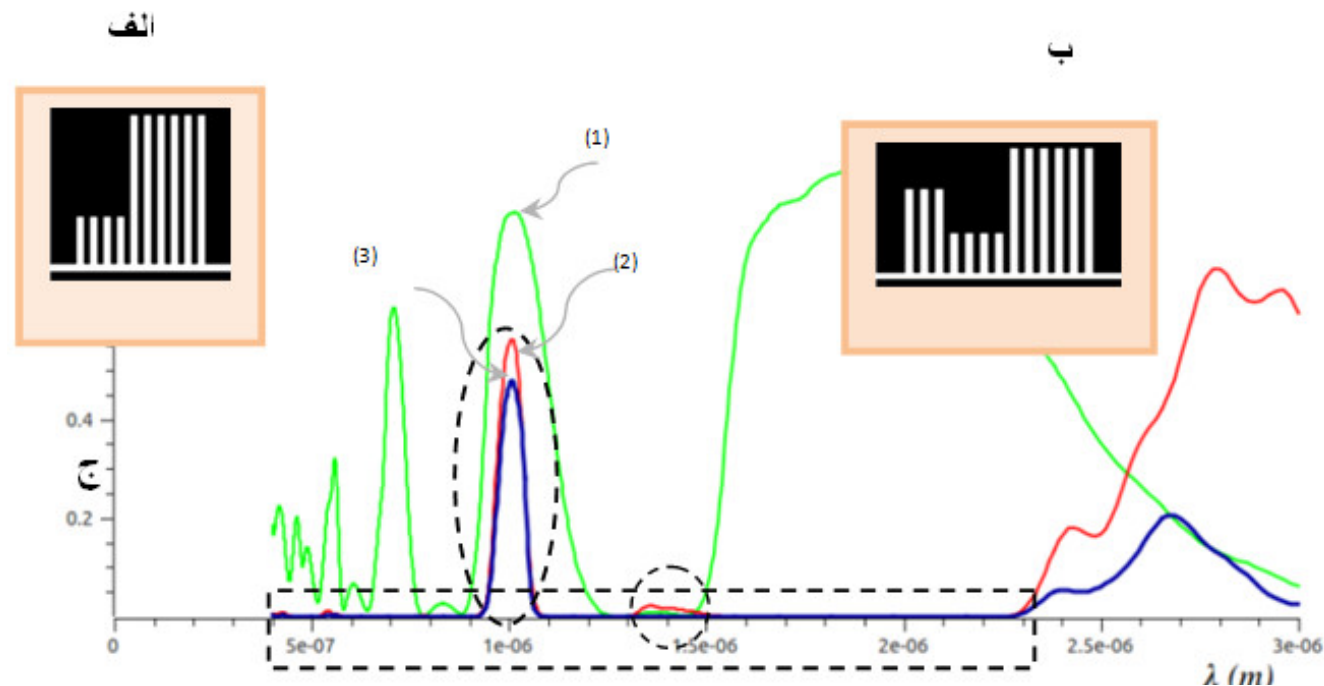


شکل ۳: الف) مقطع عرضی از C3-3-TPNF (ب) بیناب‌های گذردهی نسبی C3-3-TPNF (۱) و C3-3-3-TPNF بیناب (۲)

می‌شود ناحیه پالایشی از بازه فرکانسی در تمام طول موج‌ها از دامنه صفر برخوردار نیست. بنابراین برای به دست آوردن محدوده پالایشی دقیق‌تر با دامنه صفر دوباره از اصل برهم‌نهی استفاده می‌شود تا بتوان گستره پالایشی و باریکه گذردهی مورد نظر را ایجاد نمود.

۲-۳- استفاده از CM1-r-TPNF برای گذردهی باریکه‌ای از بازه فرکانسی در طول موج‌های بخصوص

طراحی پالایشگر میان‌گذری که باریکه گذردهی را در طول موج ۱ میکرومتر و با دامنه گذردهی نسبی حداقل ۴۵ درصد به گونه‌ای ایجاد کند که گذردهی طول موج‌های پیرامون آن صفر باشد. شکل (۴-ج) بیناب گذردهی C4-6-TPNF، بیناب (۳) را به ازای



شکل ۴: الف) مقطع عرضی از C4-6-TPNF (ب) مقطع عرضی از C3-4-6-TPNF (ج) بیناب‌های گذردهی نسبی 3-TPNF (۱)، C4-6-TPNF (۲) و C3-4-6-TPNF بیناب (۳) درازای  $d_3 = 1100\text{nm}$  ,  $d_2 = 350\text{nm}$  ,  $d_1 = 740\text{nm}$

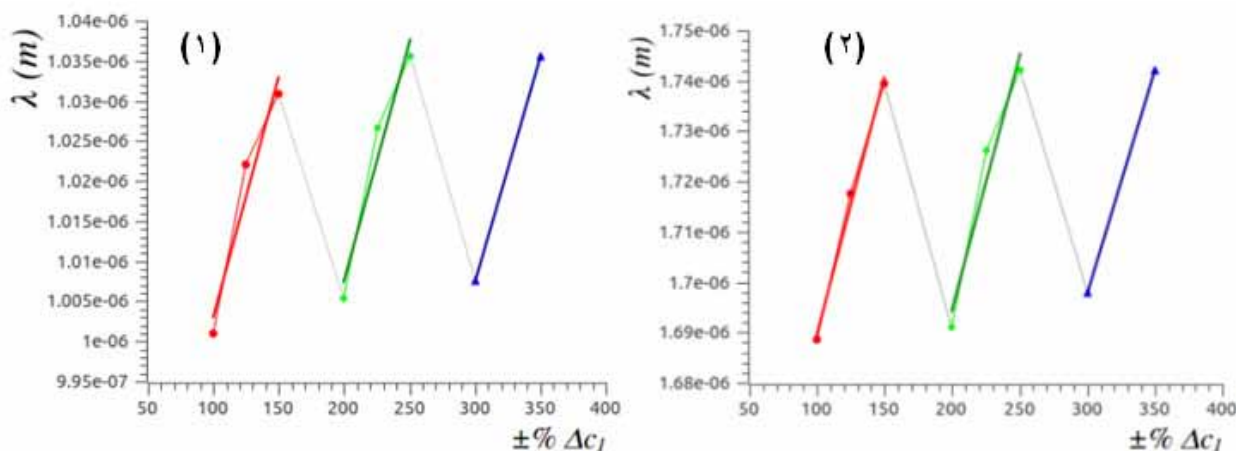
نسبت به پارامتر  $\Delta c_1$  و عملکرد کاواک گونه فضای  $\Delta c_1$  می‌باشد. اگر R اندازه درصد اضافه شده به  $\Delta c_1$  باشد در درصدهای کمتر و یا مساوی با ۱۰۰ طول موج مرکزی ناحیه پالایشی و نقطه بیشینه باریکه گذردهی به سمت طول موج‌های بلندتر و در درصدهای بیشتر از ۱۰۰ به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شوند. این روند جابه‌جایی در درصدهای بیشتر نیز دیده می‌شود.

درواقع، پالایشگر  $CM_{1-r}$ -TPNF را می‌توان به گونه‌ای طراحی نمود که فاصله بین  $M$ -TPNF های تشکیل دهنده آن در یکی از این بازه‌های تکرار شونده قرار بگیرد.

باتوجه به شکل (۴-ج) که بیناب گذردهی نسبی  $C3-4-6$ -TPNF بیناب (۳) را از برهم‌نهی بیناب‌های گذردهی نسبی  $TPNF$ -۳ بیناب (۱) با  $C4-6$ -TPNF بیناب (۲) نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود اندازه دامنه بازه پالایشی حاصل صفر و همچنین اندازه دامنه ناحیه باریک گذردهی با بزرگی مطلوب می‌باشد.

#### ۴-۴ تأثیر تغییرات $\Delta c_1$ بر بیناب گذردهی نسبی $CM_{1-r}$ -TPNF

با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها تأثیر تغییرات  $\Delta c_1$  در بیناب گذردهی نسبی پالایشگر  $CM_{1-r}$ -TPNF بررسی شد. در شکل ۵ نمودارهای تغییرات طول موج‌های مرکزی بازه‌های پالایشی و نقاط بیشینه بیناب‌های گذردهی نسبی  $C3-4-6$ -TPNF ناشی از تغییرات درصدی  $\Delta c_1$  نمایش داده شده است. رفتار پلکانی تکرار شونده موجود مبین رفتار موج



شکل ۵: نمودارهای تغییرات طول موج‌های مرکزی محدوده‌های پالایشی (۱) و تغییرات نقطه بیشینه (۲) بر روی بیناب گذردهی نسبی  $C3-4-6$ -TPNF به‌ازای تغییرات درصدی  $\Delta c_1$  ( $\pm\% \Delta c_1$ )

## بحث و نتیجه‌گیری

البته باتوجه به اینکه بیناب‌های گذردهی نسبی  $CM_{1-r}$ -TPNF ها حاصل از برهم‌نهی همزمان  $r$ ،  $M$ -TPNF و همچنین تأثیر نقش پالایشگری  $\Delta c$  ها می‌باشند از افت دامنه چشمگیری نسبت به بیناب‌های گذردهی نسبی هریک از  $M$ -TPNF های اولیه برخوردار هستند. لذا،  $M$ -TPNF هایی که در آنها تعداد دندان‌ها کمتر و اندازه ارتفاع کوچک‌تر باشد، می‌توانند بهترین گزینه‌ها برای طراحی این پالایشگرها باشند.

دقت در نمودارهای شکل ۵ که حاصل از بررسی انجام شده درخصوص افزایش درصدی  $\Delta c_1$  می‌باشند، برای انتخاب اندازه صحیح  $\Delta c_1$  در هر پالایشگر مفروض ضروری است. رفتار نوسانی پلکانی موج و عملکردی کاواک گونه  $\Delta c_1$  که بر اثر افزایش درصدی آن بروز می‌کند، مبین عملکردهای یکسان پالایشگرها در طراحی‌های متفاوت است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۲ و ۴ دیده می‌شود  $M$ -TPNF به‌تنهایی قادر به تولید بازه‌های گذردهی و یا پالایشی مورد نظر به‌طور کامل نیستند. اما با توجه به بیناب‌های گذردهی  $CM_{1-r}$ -TPNF ها، شکل‌های ۳ و ۴ که از تأثیر عملکرد همزمان دو یا چند  $M$ -TPNF شکل گرفته‌اند، می‌توان محدوده‌های میان‌گذر و میان‌نگذر مطلوب را تولید کرد. این محدوده‌های تولید شده از شدت دامنه و پهنای گذردهی مناسب برخوردارند در صورتی که این دو فاکتور در بیناب‌های گذردهی  $M$ -TPNF ها بزرگی و دقت کافی را ندارند. بنابراین نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چنددندان‌های زنجیره‌ای ( $CM_{1-r}$ -TPNFs) که از کنارهم قرار گرفتن زنجیروار  $r$  پالایشگر از نوع  $M$ -TPNF شکل گرفته‌اند می‌توانند در فن‌آوری‌های پیشرفته و ساخت ابزار دقیق برای تولید، اصلاح و بهینه‌سازی محدوده‌های میان‌گذر بسیار باریک و همچنین محدوده‌های میان‌نگذر بسیار وسیع، با دقت نانومتر، به کار روند.

## References:

1. Maier S. Plasmonics – Towards Sub-wavelength Optical Devices. *Current Nanoscience* 2005; 1: 17-22.
2. Kim K. Plasmonics - Principles and Applications. InTech.: 2012.
3. Sorger V., Oulton R., Ma R., Zhang X. Toward integrated plasmonic Circuits. *MRS Bull.* 2012; 37: 728-38.
4. Hu F., Yi H., Zhou Z. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities. *Opt. Exp.* 2011; 19: 4848-55.
5. Hu F., Zhou Z. Wavelength filtering and demultiplexing structure based on aperture-coupled plasmonic slot cavities. *J. Opt. Soc. Am. B* 2011; 28: 2518-23.
6. Tao J., Huang X. G., Lin X., Zhang Q., Jin X. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple teeth-shaped structure. *Opt. Exp.* 2009; 17: 13989-94.
7. Oskooi A., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S. G. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Compu. Phys. Commun.* 2010; 181: 687–702.
8. Maier S. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer Science+Business Media LLC: New York, 2007.
9. Novotny L., Hecht B. Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press: New York, 2006.
10. Jackson J. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons Inc.: New York, 1962.
11. Premaratne M., Pannipitiya A., Rukhlenko I. Analytical modeling of resonant cavities for plasmonic-slot-waveguide junctions. *IEEE Photon. J.* 2011; 3: 220–33.
12. Haroldo M., Pannipitiya T., Rukhlenko I., Agrawal G. Improved transmission model for metal-dielectric-metal plasmonic waveguides with stub structure. *Opt. Exp.* 2010; 18: 6191–204.
13. Pozar D. Microwave Engineering. Wiley: New York, 1998.
14. Zhang D. Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics. 2nd edn, Springer: Berlin, 2008.
15. Saeed F, Fatemi h, Khaksar A. Introducing and characterization of Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters (M-TPNFs) and Chained Cascaded M-TPNFs, using FDTD and CE methods. 19th Iranian Annual Physics Conference: Birjand

university, June 2013.

**16.** Sullivan D. Electromagnetic Simulation using FDTD. IEEE Press: New York, 2000.

**17.** Taflove A., Hagness S. C., Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 3rd edn, Artech House Publishers: 2005.

**18.** Khaksar A, Fatemi H. Changes in the transmission properties of multi-tooth plasmonic nano-filters (M-TPNFs) caused by geometrical imperfection. J Opt 2012; 14: 085003-11.

**19.** Rakic A.D., Djuricic A.B., Elazar J.M., Majewski M.L., Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices Appl. Opt. 1998; 37: 5271-83.

**20.** Sheppard C, Fatemi H, Gu M. The Fourier optics of near-field microscopy. Scanning 1995; 17: 28-40.

**21.** Yariv A, Yeh P. Photonocs- Optical Electronics in Modern Communications. 6nd edn, Oxford University Press: New York, 2007.