

# طراحی و شبیه سازی ساختار فیلتر نوری فلز-عایق-فلز برپایه رینگ شکاف دار پلاسمونیک

فرزین امامی<sup>۱</sup> عصمت رفیعی<sup>۲</sup> روزبه نگهداری<sup>۳</sup>

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

[emami@sutech.ac.ir](mailto:emami@sutech.ac.ir)

۲- فارغ التحصیل مقطع دکترا- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

[e.rafiie@sutech.ac.ir](mailto:e.rafiie@sutech.ac.ir)

۳- فارغ التحصیل مقطع کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

[R.negahdari@sutech.ac.ir](mailto:R.negahdari@sutech.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله یک فیلتر پلاسمونیک ساخته شده از یک رینگ شکاف دار، دو ساختار U شکل و دو موجبر مستقیم طراحی و بررسی شده است. در ساختار پیشنهادی رینگ شکاف دار و ساختار U شکل بین دو موجبر مستقیم واقع شده اند. شبیه سازی ها براساس روش FDTD صورت پذیرفته است. فیلتر دارای ساختار فلز-عایق-فلز است. رینگ شکاف دار، ساختارهای U شکل و موجبرهای مستقیم متشکل از هوا هستند که در زمینه نقره واقع شده اند. در ساختار پیشنهادی با توجه به زاویه شکاف می-توان شدت توان انتقالی و میزان تشدید را تنظیم کرد و تغییر داد. فیلتر پیشنهادی امکان محدود سازی نور در ابعاد زیر طول موجی (در حد نانو) را داشته که آن را برای مدارات مجتمع نوری مناسب می سازد. بنابراین با تنظیم پارامترهای ساختار امکان دستیابی به شدت توان انتقالی برابر با ۹۰٪ مقدور خواهد بود.

**واژه های کلیدی:** پلاسمونیک، رینگ شکاف دار، شدت توان انتقالی، فیلتر نوری، FDTD

**نوع مقاله:** پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲

نام نویسنده ی مسئول: دکتر فرزین امامی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - شیراز - خیابان مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده ی برق

## ۱- مقدمه

پارامترهای هندسی و کوپلینگ، اسپکتروم انتقال بهبود یافته است و ساختار دارای حساسیتی به میزان 476nm/RIU خواهد بود. در تحقیقی دیگر [۹]، فیلتر باند توقف با روزه‌ای در رینگ‌های آن پیشنهاد شده است که با تغییر پارامترهای ساختاری مدهای مختلف بدست آمده و ساختار بهینه شده است. در [۱۰]، یک فیلتر پلاسمونیک جدید برپایه ترکیب فلز-عایق-فلز طراحی و پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی قابل تنظیم بوده و در حالت بهینه خروجی ۰.۸۴ در طول موج 935nm حاصل شده است.

در این مقاله، ساختار فیلتر پلاسمونیک برپایه فلز-عایق-فلز پیشنهاد و طراحی شده است. ساختار پیشنهادی امکان محدود ساختن نور در ابعاد زیر طول موجی را داشته که قابلیت استفاده در مدارات مجتمع نوری را خواهد داشت. شبیه‌سازی‌ها برپایه روش FDTD صورت گرفته‌اند.

## ۲- تئوری ساختار

فیلتر پیشنهادی متشکل از یک رینگ شکاف‌دار درون دو ساختار U شکل است که در دو انتهای آن دو موجبر مستقیم قرار دارند. ساختار رینگ مزایای زیادی از جمله قابلیت جمع‌بند، فاکتور کیفیت بالا و نیز سادگی ساخت دارد [۱۱و۱۲].

با توجه به رابطه تشدید برای رینگ‌ها، طول موج تشدید در آن‌ها به ضریب شکست و شعاع رینگ‌ها مرتبط دارد. طول موج تشدید برای رینگ مطابق رابطه زیر بررسی است [۱۳]:

$$\frac{J'_n(kr_2)}{J'_n(kr_1)} - \frac{N'_n(kr_2)}{N'_n(kr_1)} = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا  $k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}$  و  $\mu_0$  و  $\epsilon_r$  مغناطیس‌شدگی و قابلیت‌گذردگی نسبی هستند. مطابق رابطه (۱)، با داشتن شعاع مشخص، با تغییر ضریب شکست امکان دستیابی به طول موج‌های تشدید مختلف خواهد بود [۱۳].

با توجه به استفاده از فلز نقره در ساختار، گذردگی الکتریکی آن براساس مدل درود مطابق زیر خواهد بود [۱۴و۱۵]:

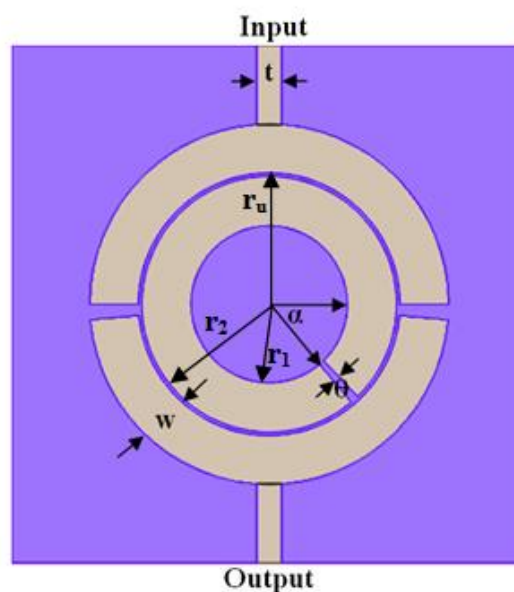
$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\gamma) \quad (2)$$

در رابطه بالا  $(\omega_p)$  برابر با 9.1 eV،  $(\gamma)$  معادل با 0.018 eV و  $(\epsilon_\infty)$  برابر با 3.7 است [۱۴و۱۵].

ساختار فیلتر پیشنهادی در شکل ۱ ترسیم شده و پارامترهای ساختاری آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. ناحیه خاکستری هوا و ناحیه بنفش نشان دهنده نقره است. در این ساختار، پالس ورودی از موجبر مستقیم بالا اعمال شده و پس از کوپل به موجبر U شکل در فرکانس رزونانس وارد رینگ شکاف‌دار می‌شود و سپس به موجبر U شکل پایین و موجبر مستقیم پایین

به مدت هزاران سال، انسان‌ها مجذوب و شیفته پدیده‌های نوری بوده و دائماً به دنبال دلایل و علل وقوع پدیده‌های نوری بوده‌اند. دانشمندان نیز تلاش‌های زیادی در جهت آگاهی از مفاهیم و پدیده‌های نوری داشته‌اند. آگاهی و درک مفاهیم نوری و برهم‌کنش‌ها در پدیده‌های نوری به‌صورت گام به گام و مرحله به مرحله پیش رفته و منجر به پیشرفت‌های زیاد و سریعی در زمینه شبکه‌های نوری شده است. در قرن بیست و یکم، غالب‌ترین و مورد استفاده‌ترین سیستم‌های مخابراتی، شبکه‌های مخابرات نوری است. مهمترین مشخصات این شبکه‌ها سرعت و نرخ بالای داده‌های انتقالی است. از جمله شبکه‌های مخابرات نوری بلورهای فوتونی هستند [۱]. در واقع محققان سیستم‌های مخابرات نوری را به‌عنوان شبکه‌های پایه در سیستم‌های مخابرات جهانی قرار داده‌اند. در تمام شبکه‌های نوری، مجتمع سازی اجزای نوری و افزایش میزان داده انتقالی صورت می‌گیرد. در شبکه‌های نوری کوچک ساختن و جمع‌بند شبکه‌های نوری اهمیت به‌سزایی دارد، که متأسفانه کوچک سازی بیش از حد ابعاد شبکه، موجب بروز مشکلاتی در ساخت و عملکرد ساختار خواهد شد. برای غلبه بر این مشکلات، در شبکه‌های نوری از ساختارهای پلاسمونیک استفاده می‌شود. این ساختارها از ترکیبات فلز-عایق ساخته شده‌اند. ساختارهای پلاسمونیک بر اساس فرآیند برهم‌کنش بین امواج الکترومغناطیسی و الکترون‌های رسانش در فلزات با ابعاد نانو بیان شده‌است. با استفاده از اپتیک نانومقیاس یا پلاسمونیک می‌توان پا را فراتر از محدودیت‌های نور گذاشت. با استفاده از این ساختارهای با ابعاد نانومتر، اجزای متفاوت برای سیستم‌های نوری ساخته شده و منجر به ایجاد شبکه‌های نوری در ابعاد نانومتر می‌شود. ترکیبات پلاسمونیک بصورت فلز-عایق-فلز و عایق-فلز-عایق قابل طراحی و بررسی هستند. ساختارهای متشکل از ترکیب فلز-عایق-فلز به‌علت توانایی بهتر در محدود ساختن نور ارجحیت بیشتری دارند. با طراحی ساختارهای پلاسمونیک مختلف می‌توان ادوات نوری متفاوتی چون فیلتر [۲و۳]، سنسورها [۴]، کوپلرها [۵]، گیت‌های منطقی [۶] و ... داشت. از کاربردهای جالب توجه و مهم دیگر این ساختارها، طراحی آنتن‌های نوری مخابراتی است [۷]. استفاده از رینگ‌های حلقوی بدلیل تنظیم پذیری طول موج‌های تشدید، مزایای زیادی دارد. با قرار دادن یک لایه فلزی درون رینگ می‌توان شکافی در آن ایجاد نموده و اصطلاحاً رینگ شکاف‌دار ایجاد کرد که توانایی دستیابی به چندین تشدید زوج و فرد را ممکن می‌سازد. رینگ شکاف‌دار با تنظیم زاویه شکاف به جای چندین پارامتر ساختاری، قابل بهینه‌سازی است. با استفاده از رینگ شکاف‌دار می‌توان فیلتر پلاسمونیک چندکاناله طراحی نمود. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در زمینه ساختارهای پلاسمونیک و به خصوص رینگ‌های شکاف‌دار صورت پذیرفته است. در [۸]، رینگ‌های شکاف‌دار مسطح از جنس متامریال پیشنهاد شده است. در این تحقیق با تنظیم

کوپل می‌شود. خروجی نهایی بصورت توان انتقالی از موجبر مستقیم پایین دریافت می‌شود.



شکل (۱): ساختار فیلتر پیشنهادی

جدول (۱): پارامترهای ساختاری فیلتر پیشنهادی

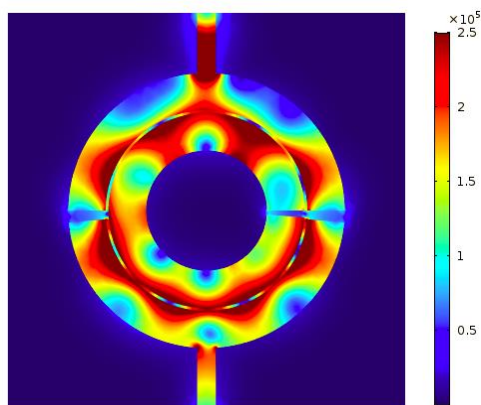
| پارامتر                            | مقدار                          |
|------------------------------------|--------------------------------|
| ضخامت موجبرهای مستقیم (t)          | 25nm                           |
| ضخامت رینگ و موجبرهای U شکل (w)    | 50nm                           |
| زاویه شکاف ( $\alpha$ )            | $0^\circ < \alpha < 360^\circ$ |
| میزان شکاف ( $\theta$ )            | $5^\circ$                      |
| شعاع داخلی رینگ شکافدار ( $r_1$ )  | 60nm                           |
| شعاع خارجی رینگ شکاف دار ( $r_2$ ) | 110nm                          |
| شعاع موجبر U شکل ( $r_u$ )         | 113nm                          |

### ۳- شبیه سازی و نتایج

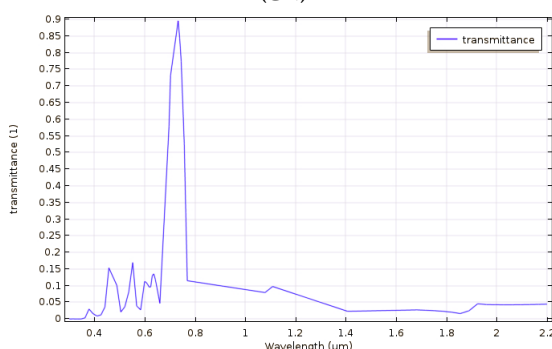
در ساختار فیلتر پیشنهادی با تغییر زاویه شکاف ( $\alpha$ )، منحنی‌های انتشار پالس و توان انتقالی بررسی خواهند شد تا اثرات زاویه شکاف بر عملکرد فیلتر تعیین شوند. در تمامی حالات کلیه پارامترهای ساختاری بجز زاویه شکاف یکسان و مشابه جدول ۱ است.

#### ۳-۱- $\alpha=0^\circ$

با تعیین زاویه شکاف معادل با  $0^\circ$ ، فیلتر عملکرد بسیار خوبی خواهد داشت و حدود ۹۰٪ توان ورودی به خروجی منتقل می‌شود. منحنی‌های انتشار و توان انتقالی در شکل ۲ ترسیم شده‌اند.



(الف)



(ب)

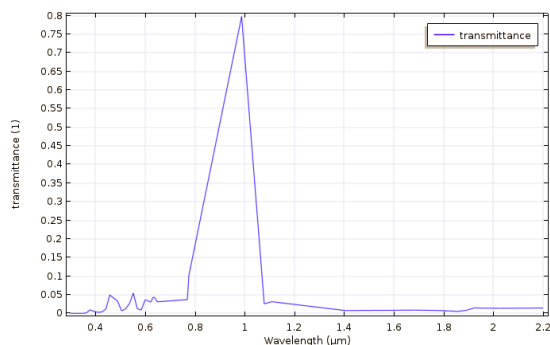
شکل (۲): (الف) منحنی انتشار در ساختار، (ب) منحنی توان انتقالی برای زاویه شکاف  $\alpha=0^\circ$

از نتایج حاصله مشخص است که فیلتر در طول موج  $0.73\mu\text{m}$  عملکردی مناسب داشته و تا حدود ۹۰٪ پیک توان انتقالی داشته است. در ساختارهای فلز-عایق-فلز، اگر راستای پالس ورودی و راستای شکاف با هم موازی باشند، مدهای زوج تشدید میشوند. در این حالت مد زوج تحریک شده و تشدید صورت گرفته است. در حالت بعد زاویه  $\alpha$  را تغییر داده و نتایج بدست می‌آوریم.

#### ۳-۲- $\alpha=90^\circ$

در این حالت زاویه شکاف معادل با  $90^\circ$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تغییر زاویه شکاف، مدهای تشدید شده در رینگ شکاف دار متفاوت خواهند شد. نتایج حاصله در شکل ۳ ترسیم شده‌اند.

در این زاویه شکاف، فیلتر عملکرد مناسبی نداشته و عملاً بصورت فیلتر قابل استفاده نخواهد بود. با تغییر زاویه در این حالت نسبت به حالت پیشین مدهای تشدید تقویت نشده و به موجبرهای U شکل کوپل نخواهند شد. در این حالت راستای پالس ورودی و راستای شکاف بر هم عمود بوده، و مدهای فرد تشدید میشوند. در این حالت مد فرد تحریک شده و تشدید صورت گرفته چون تداخل سازنده نبوده است. توان انتقالی پیکی در حدود ۳۷٪ و در طول موج  $0.8\mu\text{m}$  خواهد داشت.



(ب)

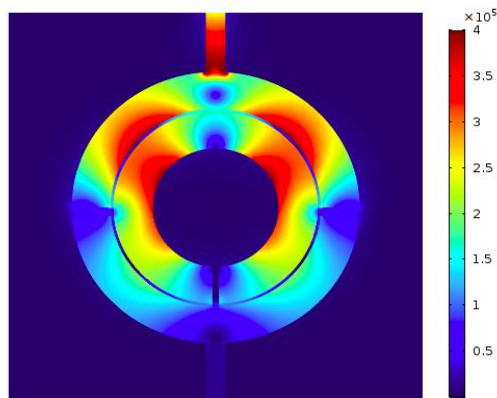
شکل (۴): (الف) منحنی انتشار در ساختار، (ب) منحنی توان انتقالی

برای زاویه شکاف  $\alpha=180^\circ$

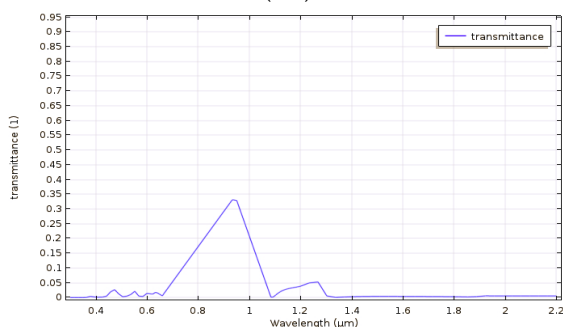
از نتایج حاصله مشخص است که فیلتر در طول موج  $0.98\mu\text{m}$  عملکردی مناسب داشته و تا حدود ۸۰٪ پیک توان انتقالی داشته است. در این حالت، راستای پالس ورودی و راستای شکاف با هم موازی هستند و مدهای زوج تشدید میشوند. در این حالت مد زوج تحریک شده و تشدید صورت گرفته است.

۳-۴-  $\alpha=270^\circ$

در آخرین حالت زاویه شکاف معادل با  $270^\circ$  در نظر گرفته می‌شود. در این حالت نیز تشدید و تزویج بین رینگ شکاف دار موجبرهای U شکل رخ نخواهد داد. شدت توان انتقالی بسیار اندک خواهد بود. نتایج حاصله در شکل ۵ ترسیم شده‌اند.



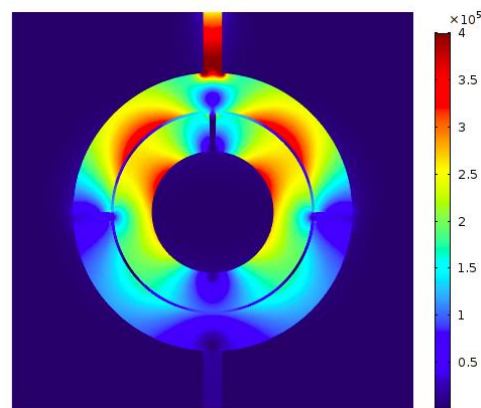
(الف)



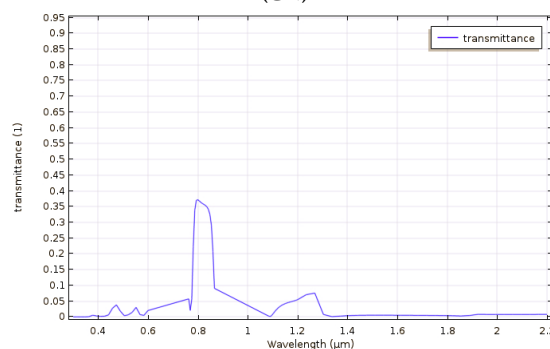
(ب)

شکل (۵): (الف) منحنی انتشار در ساختار، (ب) منحنی توان انتقالی

برای زاویه شکاف  $\alpha=270^\circ$



(الف)



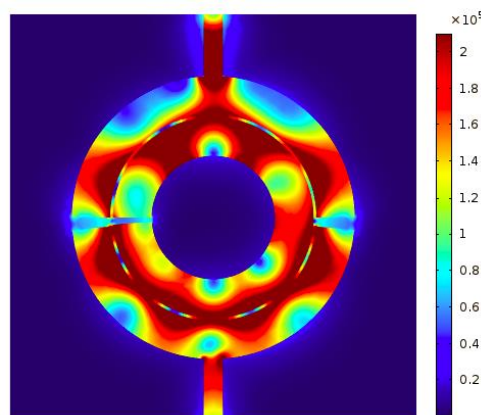
(ب)

شکل (۳): (الف) منحنی انتشار در ساختار، (ب) منحنی توان انتقالی

برای زاویه شکاف  $\alpha=90^\circ$

۳-۳-  $\alpha=180^\circ$

در این حالت زاویه شکاف معادل با  $180^\circ$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تغییر زاویه شکاف، مدهای تشدید شده در رینگ شکاف دار متفاوت خواهند شد. نتایج حاصله در شکل ۴ ترسیم شده‌اند.



(الف)

sequence gratings", Opt. Lett., Vol. 35, No. 3, pp. 285–287, 2010.

- [4] Han, Z., Liu, L., Forsberg, E., "Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons", Opt. Commun., Vol. 259, pp. 690–695, 2006.
- [5] Nguyen-Huu, N., Lo, Y., "Tailoring the optical transmission spectra of double-layered compound metallic gratings", IEEE Photon. J., Vol. 5, 2700108, 2013.
- [6] Wang, X., et al., "Plasmonic racetrack resonator with high extinction ratio under critical coupling condition", J. Appl. Phys., Vol. 107, pp. 124517-1–124517-4, 2010.
- [7] صادقی کیا. فاطمه، حجت کاشانی. فرخ، راشد محصل. جلیل، "تحلیل آنتن پلاسمای ستونی با تحریک موج سطحی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲.

- [8] Liu, S. D., et al., "Radiative damping suppressing and refractive index sensing with elliptical split nanorings", Appl. Phys. Lett., Vol. 100, pp. 203119-1–203119, 2012.
- [9] Wei, Z., et al., "Optical band-stop filter and multi-wavelength channel selector with plasmonic complementary aperture embedded in double-ring resonator", Photon. and Nanostruc., Vol. 23, pp. 45-49, 2016.
- [10] Rafiee, E., Negahdari, R., Emami, E., "Design and simulation of a novel nano-plasmonic split-ring resonator filter", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 32, 2018.
- [11] Rafiee, E., Emami, F., Nozhat, N., "Coupling coefficient increment and free spectral range decrement by proper design of microring resonator parameters", Opt. Eng., Vol. 53, pp. 123108, 2014.
- [12] Rafiee, E., Emami, F., "Investigating the effects of structural parameters on the optical characteristics of add-drop filters", Optik, Vol. 127, pp. 1690–1694, 2016.
- [13] Wang, T.B., et al., "The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator", Opt. Exp., Vol. 17, No.26, pp. 24096-24101, 2009.
- [14] Han, Z., et al., "Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 19, No. 2, pp. 91–93, 2007.
- [15] Zentgraf, T., et al., "Babinet's principle for optical frequency metamaterials and nanoantennas", Phys. Rev. B, Condens. Matter., Vol. 76, pp. 033407-1–033407-4, 2007.
- [16] T. Nurmohammadi, "A proposal for a demultiplexer based on plasmonic metal-insulator-metal waveguide-coupled ring resonator operating in near-infrared spectrum", Optik, vol. 124, pp. 550-556, 2017.
- [17] X. He, "Sub-wavelength linewidth mid-infrared notch filter enabled by a," Optics Communications, vol. 428, pp. 152-156, 2018.
- [18] Q. Wang, "Angle-tolerant hybrid plasmonic blue filter with polarization-insensitivity," Optics communications, vol. 427, pp. 457-461, 2018.

با توجه به زاویه شکاف انتخابی، مدهای فرد تحریک شده ولی تشدید صورت نخواهد گرفت. در این زاویه شکاف، فیلتر عملکرد مناسبی نداشته و عملاً بصورت فیلتر قابل استفاده نخواهد بود و همانگونه که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع سیگنال از رینگ شکاف دار به موجبر U شکل صورت نخواهد گرفت. مطابق شکل ۵، منحنی توان انتقالی با پهنای وسیع و شدت پیک توان در حدود ۳۳٪ و در طول موج  $0.93\mu\text{m}$  به دست خواهد آمد. در ادامه نتایج حاصله از این تحقیق به خصوص برای دو حالت  $\alpha=0^\circ$  و  $\alpha=180^\circ$  با نتایج حاصل از ساختارهای مشابه مقایسه شده و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): مقایسه نتایج این تحقیق با مقالات مشابه

| FWHM (nm) | طول موج تشدید (nm) | شدت  | ابعاد (nm) | ساختار             |
|-----------|--------------------|------|------------|--------------------|
| 120       | 1530               | 0.8  | >1000      | [۱۶]               |
| 140       | 4703               | 0.84 | >1000      | [۱۷]               |
| 130       | 450                | 0.7  | >400       | [۱۸]               |
| 50        | 730                | 0.9  | 350        | $\alpha=0^\circ$   |
| 110       | 980                | 0.8  | 350        | $\alpha=180^\circ$ |

مطابق جدول بالا، ساختار پیشنهادی دارای ابعادی کوچکتر، شدتی بیشتر و پارامتر FWHM کوچکتری است که عملکرد آن را به عنوان یک فیلتر مناسب بیان می‌دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک فیلتر پلاسمونیک قابل تنظیم با زاویه شکاف پیشنهاد و بررسی شد. فیلتر پیشنهادی متشکل از یک رینگ شکاف دار، دو ساختار U شکل و دو موجبر مستقیم بود. ساختار بصورت ترکیب فلز-عایق-فلز بوده که از فلز نقره و عایق هوا استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها براساس روش FDTD صورت پذیرفته است. در ساختار پیشنهادی با توجه به تغییر دادن زاویه شکاف، امکان تنظیم و تغییر شدت توان انتقالی وجود داشته که با توجه به آن مدهای تشدید و شدت کوپلینگ تغییر کردند. فیلتر پیشنهادی با توجه به ساختار ویژه آن امکان محدود سازی نور در ابعاد زیر طول موجی در مدارات مجتمع نوری را خواهد داشت. مطابق نتایج حاصله از این ساختار، امکان دستیابی به فیلتری با توان انتقالی بیش از ۹۰٪ مقدور خواهد بود.

#### مراجع

- [۱] جلالی. تهمینه، محمدی. احمد، "مقایسه نتایج شبیه سازی بلور فوتونی با استفاده از روش FDTD دوبعدی بهبود یافته و FDTD سه بعدی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲.
- [2] Zand, I., Bahramipناه, M., Abrishamian, S., Liu, J. M., "Metal-insulator-metal nanoscale loop-stub structures", IEEE Photon. J, Vol. 4, pp. 2136–2142, 2012.
- [3] Gong, Y., Liu, X., Wang, L., "High-channel-count plasmonic filter with the metal-insulator-metal Fibonacci