

مدل‌سازی فیبر کریستال فوتونی شاخص هدایت شده با پاشیدگی رنگی و اثرات غیرخطی کم

سعید علیائی^{۱*}، محمود صیفوری^۲، علی نیکو صحبت^۳

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|--|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۸ | موج‌برها با پاشیدگی و تلفات تحدید کم، در سامانه‌های مخابرات نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. از فیبرهای کریستال فوتونی می‌توان به عنوان موج‌بر استفاده نمود. قابلیت‌های زیاد فیبرهای کریستال فوتونی باعث جایگزینی این فیبرها به جای فیبرهای معمولی شده است. در این مقاله، دو ساختار اولیه و بهبود یافته از فیبر کریستال فوتونی طراحی و مدل‌سازی شده است. طرح اول، یک فیبر کریستال فوتونی با ساختار شش ضلعی است که پاشیدگی آن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به نزدیکی صفر و ضریب غیرخطی آن به عدد $2/2 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ می‌رسد. در ساختار بهبود یافته، مقدار پاشیدگی به مرز صفر می‌رسد و مقدار تلفات تحدید نیز به مقدار $1 \times 10^{-1} \text{ dB/cm}$ نزدیک است. در این طرح، ضریب غیر خطی به کمتر از $9/25 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$ رسیده و در طول موج‌های بزرگتر از ۱/۵۵ میکرومتر، پاشیدگی منفی دیده می‌شود. |
| واژگان کلیدی: اثرات غیرخطی، پاشیدگی رنگی، تلفات تحدید، فیبر کریستال فوتونی، ناحیه‌ی موثر مودی. | |

۱- مقدمه

شکستی بالا را دارا هستند. فیبرهای کریستال فوتونی با پاشیدگی رنگی و تلفات تحدید کم، می‌توانند نور را در مرکز خود متمرکز کرده و در سامانه‌های تسهیم‌دهی طول موج (WDM) مورد استفاده قرار گیرند. فیبرهای کریستال فوتونی به دو دسته فیبرهای با مغزی هوا و فیبرهای با مغزی جامد یا همان فیبرهای شاخص هدایت‌شده تقسیم می‌شوند. اساس کار فیبرهای کریستال فوتونی با مغزی هوا

امروزه در سطح دنیا، تحقیقات بر روی فیبرهای کریستال فوتونی (PCF)، پژوهشگران زیادی را به خود جذب کرده است. یکی از دلایل این امر، ویژگی‌های زیاد و منحصر به فرد این فیبرهاست. فیبرهای کریستال فوتونی ویژگی‌هایی از جمله عملکرد تک مود، پاشیدگی رنگی انعطاف‌پذیر در طول موج گسترده، خاصیت غیرخطی قابل کنترل و اثر دو

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s_olyaee@srutu.edu

۱. دانشیار، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی. پست الکترونیک: mahmood.sifouri@srutu.edu
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید رجایی. پست الکترونیک: ali.nikoosohbat@yahoo.com

در این رابطه، $D(\lambda)$ پاشیدگی رنگی، λ طول موج، c سرعت نور در خلا و $\text{Re}[n_{\text{eff}}]$ قسمت حقیقی ضریب شکست موثر فیبر کریستال فوتونی است [۴ و ۵]. پاشیدگی رنگی فیبر کریستال فوتونی از مجموع پاشیدگی موجبر و پاشیدگی ماده تشکیل می‌شود.

$$D(\lambda) = D_w + D_m \quad (2)$$

که در آن، D_w پاشیدگی موجبر و D_m پاشیدگی ماده است. بر خلاف فیبرهای مرسوم، پاشیدگی موجبر در فیبرهای کریستال فوتونی به سختی قابل کنترل است، اما پاشیدگی ماده با طراحی مناسب قطر حفره‌ها و ثابت شبکه آنها امکان‌پذیر است. برای یک طول موج مشخص و با حل معادلات ماکسول، برای مقدار ضریب شکست موثر داریم:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \quad (3)$$

که در آن β و k_0 به ترتیب ثابت انتشار و عدد ثابت موج است [۴ و ۵].

۲-۲- تلفات تحدید

تلفات تحدید به‌واقع همان توانایی متمرکز شدن نور در مرکز هسته است که آن را با L_c نمایش می‌دهند. با افزایش تعداد حفره‌های هوا در اطراف هسته، می‌توان تلفات تحدید را کاهش داد زیرا باعث قوی‌تر شدن نور متمرکز شده در هسته فیبر می‌شود. تلفات تحدید از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$L_c = \frac{20 \times 10^6}{\ln 10} k_0 \text{Im}[n_{\text{eff}}] \quad (4)$$

که در آن $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ قسمت موهومی ضریب شکست موثر با واحد dB/m است [۲].

۲-۳- ناحیهی موثر مودی

از دیگر مشخصات مهم فیبرهای کریستال فوتونی، ناحیه موثر مودی است که نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. فیبر کریستال فوتونی با ناحیه موثر مودی بزرگ برای فواصل طولانی مفید است و می‌توان از آن در صنعت مخابرات

بر مبنای شکاف باند فوتونی (PBG) و فیبرهای کریستال فوتونی با مغزی جامد بر مبنای بازتاب داخلی کلی (TIR) است. به‌طور معمول، در فواصل طولانی و کاربرد در صنعت مخابرات، از فیبرهای کریستال فوتونی با مغزی جامد استفاده می‌شود. قسمت مغزی این فیبرها از سیلیکا است که در اطراف آن سوراخ‌های هوا قرار گرفته است. پژوهشگران زیادی در این زمینه فعالیت کرده‌اند. به‌طور مثال هانسن برای اولین بار طرح مثلثی خود را در این خصوص ارائه و به نتایج خوبی نیز رسید [۱]. ساختارهای شش‌ضلعی مدت زیادی است که مورد توجه طراحان قرار گرفته است [۲-۷]. همچنین طرح هشت‌ضلعی نیز مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به طرح ارائه شده در مرجع [۸] اشاره کرد. طرح‌های ترکیبی مانند دایره‌ای-شش‌ضلعی هم به تازگی رواج یافته است که می‌توان به-عنوان نمونه به مقاله لیانگ فنگ و همکارانش اشاره کرد [۹].

در این مقاله نیز به طراحی و مدل‌سازی فیبر کریستال فوتونی جدید از نوع مغزی جامد و سپس بهبود ساختار آن می‌پردازیم که هر یک دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند. اما ویژگی هر دو طرح، پاشیدگی نزدیک به صفر است که در هر دو محقق شده است.

۲- مشخصات فیبرهای کریستال فوتونی

فیبرهای کریستال فوتونی دارای مشخصات مهمی هستند که هنگام طراحی آنها باید مورد توجه قرار گیرند و طراحی بایستی بر اساس بهینه کردن این مشخصات مهم استوار گردد. در ادامه به بررسی چند مشخصه مهم پرداخته می‌شود.

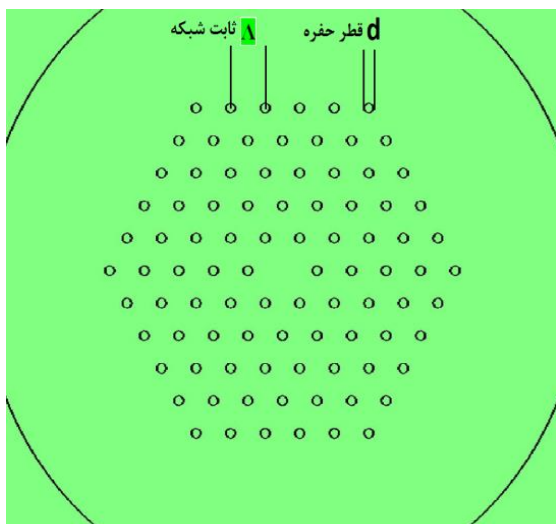
۲-۱- پاشیدگی

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیبرهای کریستال فوتونی و به‌واقع مهم‌ترین مشخصه آن که لازم است به دقت مورد بررسی قرار گیرد، پاشیدگی است.

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (1)$$

روش شبیه‌سازی این مدل‌ها، روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان (FDTD) است. با این روش می‌توان با تعریف شرایط مرزی مناسب، ساختارهای طراحی شده را ارزیابی و توصیف نمود [۱۲]. با توجه به ساختار کریستال‌های فوتونی، پیاده‌سازی این روش در مختصات دکارتی مناسب خواهد بود. با شبیه‌سازی این مدل با مشخصات مذکور، منحنی‌های مختلف فیبر را می‌توان استخراج کرد. همچنین از نرم‌افزار Mode Solution برای شبیه‌سازی ساختارهای طراحی شده، استفاده می‌شود. در شکل ۲، نمودار پاشیدگی بر حسب طول موج برای فیبر کریستال فوتونی اولیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول موج $1/44\mu\text{m}$ مقدار پاشیدگی به صفر می‌رسد. یعنی در این طول موج، فیبر یک پاشیدگی تخت و صفر را از خود نشان می‌دهد.

در طول موج $1/55\mu\text{m}$ هم مقدار پاشیدگی به عدد بسیار ناچیز $5\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ رسیده است. به طور کل، در طول موج‌های ۱ تا $1/55$ میکرومتر، مقدار پاشیدگی بین $32-$ تا $5\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ تغییر می‌کند.



شکل ۱- نمایی از سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی اولیه با قطر $d=600\text{nm}$ و ثابت شبکه $\Lambda=2300\text{nm}$

شکل ۳ نمودار تلفات تحدید بر حسب طول موج را در فیبر کریستال فوتونی با طراحی اولیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول موج $1\mu\text{m}$ مقدار تلفات تحدید به $0/5\text{dB}/\text{cm}$ می‌رسد. در طول موج $1/55\mu\text{m}$ هم

استفاده نمود. اما فیبر کریستال فوتونی با ناحیه موثر مودی کوچک برای کاربردهای غیرخطی نور مفید است. ناحیه‌ی موثر مودی فیبر کریستال فوتونی از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{(\iint |E|^4 dx dy)} \quad (5)$$

که در آن، E میدان الکتریکی توزیعی است که از معادلات ماکسول استخراج شده است [۴ و ۵].

۲-۴- اثرات غیرخطی

اثرات غیرخطی بالا باعث تغییر شکل موج سیگنال ورودی می‌گردد و برای کاربردهای غیرخطی نور مناسب است. بنابراین، فیبرهای کریستال فوتونی با اثرات غیرخطی بالا نمی‌تواند در مسیرهای طولانی مورد استفاده قرار گیرد. پس لازم است برای طراحی فیبرهای کریستال فوتونی، اثرات غیرخطی فیبر را تا حد امکان کاهش داد. برای اثر غیرخطی داریم:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \times 10^3 \text{ w}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \quad (6)$$

که در آن γ عدد اثر غیرخطی با واحد $\text{w}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ و n_2 ضریب شکست غیرخطی است [۱۰ و ۱۱].

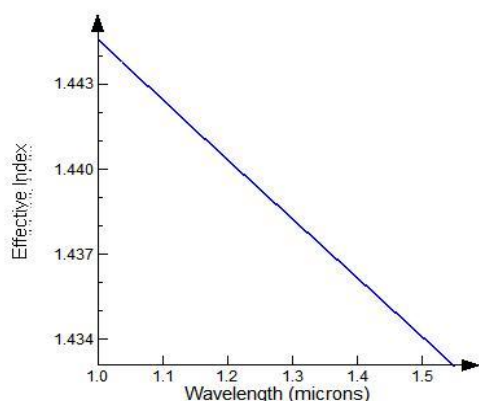
۳- طراحی، مدل‌سازی و نتایج آن

در این مقاله دو نمونه از فیبر کریستال فوتونی با پاشیدگی نزدیک به صفر طراحی و مدل‌سازی شده است که در ادامه به اختصار به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

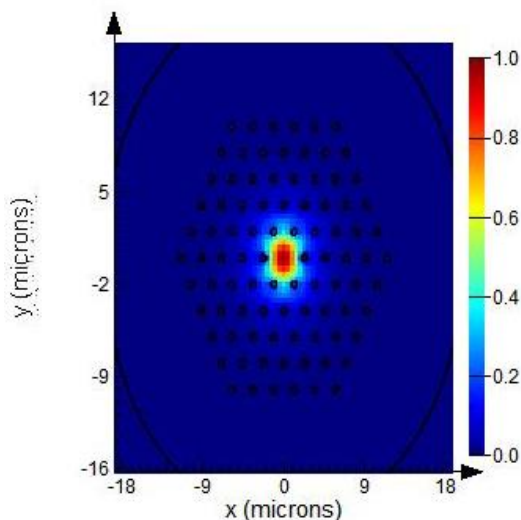
۳-۱- نمونه اولیه

نخستین مدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل یک ساختار شش‌ضلعی دارد و دارای ۵ حلقه از حفره‌های هوا است. مغزی فیبر از سیلیکای خالص با ضریب شکست $1/45$ و حفره‌های اطراف مرکز فیبر از جنس هوا با ضریب شکست ۱ است. قطر حفره‌های هوا 600 نانومتر است. ثابت شبکه در این مدل 2300 نانومتر در نظر گرفته شده است؛ یعنی، $d=0.6\mu\text{m}$ و $\Lambda=2.3\mu\text{m}$.

۱/۵۵ میکرومتر نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نور به خوبی در قسمت مرکز فیبر متمرکز شده و بنابراین دارای ناحیه مودی بزرگی است. ناحیه مودی موثر مودی به دست آمده در فیبر پیشنهادی طرح اول، $54/5624 \mu\text{m}^2$ است که مقدار مطلوبی است. بر این اساس می‌توان ضریب اثر غیر خطی فیبر را محاسبه نمود که این عدد به رقم $w^{-1}\text{km}^{-1}$ $2/2^1$ رسیده است که نشان‌دهنده کم بودن اثرات نامطلوب غیرخطی در فیبر است.



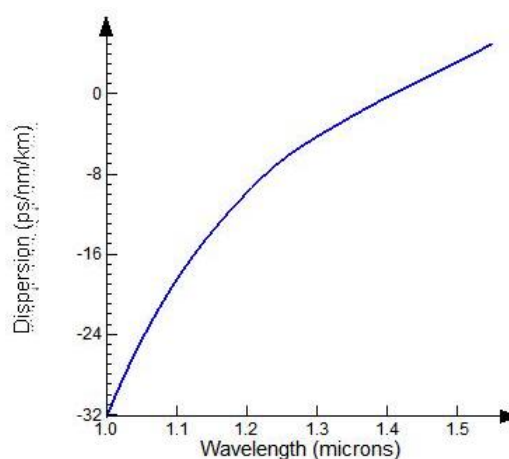
شکل ۴- نمودار ضریب شکست بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی اولیه



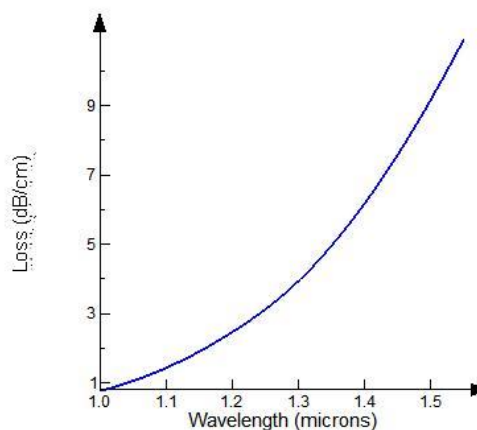
شکل ۵- توزیع میدان الکتریکی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در فیبر کریستال فوتونی اولیه

از ویژگی‌های دیگر این فیبر، ساختار ساده با یک قطر و یک ثابت شبکه است که باعث می‌شود فرآیند ساخت آن بسیار ساده گردد. این نمونه به دلیل تلفات تحدید زیاد در مخابرات نوری قابل استفاده نیست به همین دلیل در ادامه،

مقدار تلفات تحدید به عدد 11dB/cm رسیده است که با افزایش طول موج، افزایش می‌یابد. به طور کل در طول موج‌های ۱ تا $1/55$ میکرومتر، مقدار تلفات تحدید در حد مناسبی نیست.



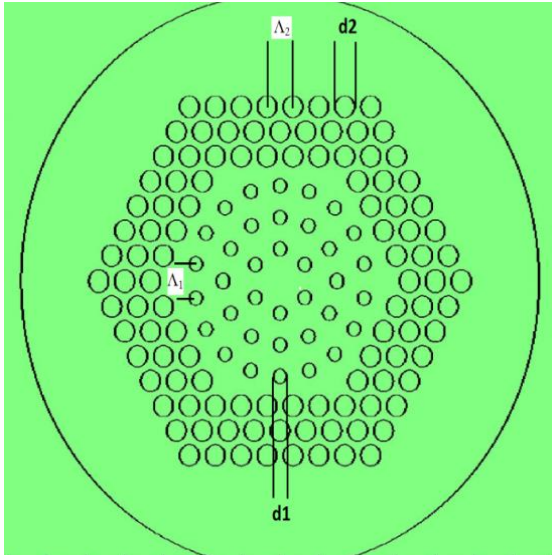
شکل ۲- نمودار پاشیدگی بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی اولیه



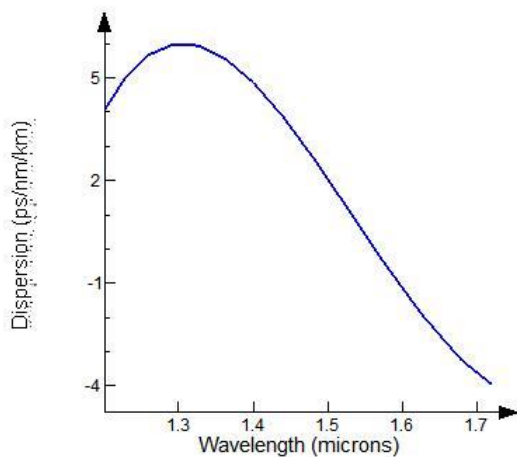
شکل ۳- نمودار تلفات تحدید بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی اولیه

شکل ۴ نمودار تغییرات ضریب شکست به ازای طول موج را نشان می‌دهد. هر چقدر میزان تغییرات ضریب شکست به میزان ضریب شکست مغزی فیبر نزدیک‌تر باشد، فیبر به پارامترهای بهتری دست یافته است. نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که در طول موج‌های ۱ تا $1/55$ میکرومتر دارای کمترین تغییرات در ضریب شکست هستیم.

شکل ۵ توزیع میدان الکتریکی توزیعی در فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی اولیه را در طول موج مود اصلی یعنی



شکل ۶- نمایی از سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی با طراحی بهبودیافته با قطرهای $d_1=900\text{nm}$ و $d_2=1500\text{nm}$ و ثابت شبکه‌های $\Lambda_1=2200\text{nm}$ و $\Lambda_2=2000\text{nm}$



شکل ۷- نمودار پاشیدگی بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی با طراحی بهبودیافته

در طول موج‌های بیشتر از $1/55\mu\text{m}$ مقدار پاشیدگی به اعداد منفی می‌رسد. یعنی در این طول موج ما به یک پاشیدگی منفی رسیده‌ایم. بنابراین می‌توان از این فیبر به عنوان فیبرهای جبران‌ساز پاشیدگی‌های مثبت استفاده کرد. به طور کل، در طول موج‌های ۱ تا $1/55$ میکرومتر مقدار پاشیدگی بین ۶ تا $0/05 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ تغییر می‌کند که هم مقدار اندکی است و هم بازه تغییرات بسیار کوچکی دارد.

شکل ۸ نمودار تلفات تحدید بر حسب طول موج را در فیبر کریستال فوتونی طرح بهبودیافته نشان می‌دهد. همان‌طور

ساختار بهبودیافته‌ای را بر اساس ساختار اولیه طراحی و ارائه خواهیم داد.

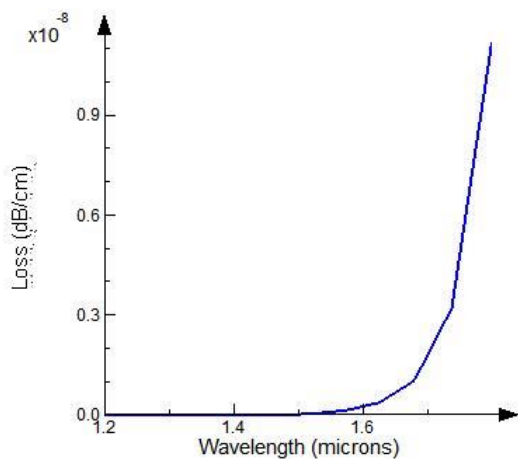
۳-۲- نمونه بهبودیافته

طراحی پیشنهادی اولیه، دارای حفره‌های یکسان و ثابت شبکه یک‌دست بود. همچنین پاشیدگی مناسب اما تلفات در حد مناسبی نبود. برای داشتن مشخصه‌های خوب بایستی ساختار یک‌شکل را تغییر دهیم. با انتخاب نسبت قطر حفره به ثابت شبکه، d/Λ می‌توان مشخصه‌های بهتری به دست آورد. با انتخاب d/Λ کوچکتر، پاشیدگی بهبود می‌یابد ولی با انتخاب d/Λ بزرگتر، تلفات تحدید بهینه می‌شود. بنابراین در مرکز، از ساختاری که دارای d/Λ کوچکتری است و در کناره‌ها، ساختاری که d/Λ بزرگتری دارد، استفاده می‌شود.

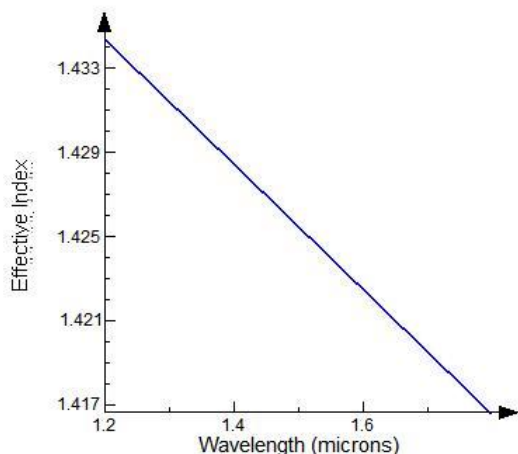
طرح و مدل پیشنهادی بهبودیافته در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۶، این طرح دارای دو ساختار در مرکز و کناره‌ها است. در مرکز فیبر، ۳ حلقه حفره‌های هوا به صورت ساختار دایروی وجود دارد که در آن $d_1=0.9\mu\text{m}$ و $\Lambda=2.2\mu\text{m}$ است. در حلقه‌ی چهارم تا پنجم، یک ساختار شش‌ضلعی از حفره‌های هوا قرار داده شده است که در آن $d_2=1.5\mu\text{m}$ و $\Lambda=2\mu\text{m}$ است.

در شکل ۷ نمودار پاشیدگی بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی بهبودیافته نشان داده شده است. در این شکل، در طول موج $1/55\mu\text{m}$ مقدار پاشیدگی به $0/05 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ می‌رسد که مقدار مناسبی است.

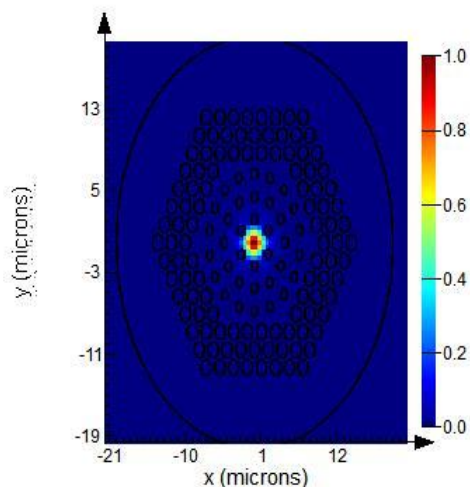
در طول موج‌های بیشتر از $1/55\mu\text{m}$ مقدار پاشیدگی به اعداد منفی می‌رسد. یعنی در این طول موج ما به یک پاشیدگی منفی رسیده‌ایم. بنابراین می‌توان از این فیبر به عنوان فیبرهای جبران‌ساز پاشیدگی‌های مثبت استفاده کرد. به طور کل، در طول موج‌های ۱ تا $1/55$ میکرومتر مقدار پاشیدگی بین ۶ تا $0/05 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ تغییر می‌کند که هم مقدار اندکی است و هم بازه تغییرات بسیار کوچکی دارد.



شکل ۸- نمودار تلفات تحدید بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی با طراحی بهبودیافته



شکل ۹- نمودار ضریب شکست بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی با طراحی بهبودیافته



شکل ۱۰- توزیع میدان الکتریکی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در فیبر کریستال فوتونی

که مشاهده می‌شود، در طول موج $1/55 \mu\text{m}$ مقدار تلفات تحدید به مقدار ناچیز $1 \times 10^{-10} \text{ dB/cm}$ می‌رسد که بسیار مناسب است. در طول موج‌های $1/2$ تا $1/53$ میکرومتر هم مقدار تلفات تحدید به پایین‌ترین مقدار یعنی عدد تقریباً صفر رسیده است که با افزایش طول موج، این مقدار افزایش می‌یابد. به طور کل در طول موج‌های 1 تا $1/55$ میکرومتر، مقدار تلفات تحدید در حد خیلی پایین و مطلوب است.

شکل ۹ نمودار تغییرات ضریب شکست به ازای طول موج را در فیبر کریستال فوتونی بهبودیافته نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نیز توزیع میدان الکتریکی در فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی را در طول موج اصلی یعنی $1/55 \mu\text{m}$ نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نور در قسمت مرکز فیبر متمرکز شده است. بنابراین با اندازه‌گیری ناحیه‌ی موثر مودی می‌توان آن را بررسی کرد.

ناحیه موثر مودی به دست آمده در فیبر طراحی شده، $2 \mu\text{m}^2$ است که مقدار قابل قبولی برای فیبر است. بر اساس این می‌توان ضریب اثر غیر خطی فیبر را محاسبه نمود که این عدد به رقم $9/25 \text{ w}^{-1} \text{ km}^{-1}$ رسیده است. این فیبر در مقایسه با نمونه اولیه دارای اثرات غیرخطی بیشتری است اما با این وجود، همچنان مقدار اثر غیرخطی آن به اندازه کافی پایین است. با طراحی نمونه بهبودیافته، کلیه‌ی پارامترهای فیبرهای کریستال فوتونی به مقادیر مناسبی رسیده‌اند. همچنین به علت پاشیدگی منفی در طول موج‌های بزرگتر از $1/55$ میکرومتر، این طرح می‌تواند به عنوان یک فیبر جبرانگر نیز مورد استفاده قرار گیرد زیرا دارای تلفات تحدید بسیار اندکی نیز است.

در جدول ۱ نتایج فیبرهای پیشنهادی این مقاله در طول موج 1550 نانومتر با فیبرهای برخی از منابع و مآخذ فهرست شده است. با توجه به این نتایج، بهترین میزان تلفات تحدید، ناحیه‌ی موثر مودی و ضریب غیرخطی در مدل‌های طراحی شده در این مقاله به دست آمده است.

جدول ۱- بررسی نتایج فیبرهای طراحی شده در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر با فیبرهای برخی از منابع

| ضریب غیرخطی | ناحیه موثر مودی | تلفات تحدید | پاشیدگی | طرح اولیه |
|---------------------|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|
| $2.2w^{-1}km^{-1}$ | $54.5624\mu m^2$ | 11dB/cm | 5ps/(nm.km) | طرح اولیه |
| $9.25w^{-1}km^{-1}$ | $13.1346\mu m^2$ | 1×10^{-10} dB/cm | 0.05ps/(nm.km) | طرح بهبودیافته |
| -- | -- | 0.3×10^{-5} dB/cm | -197ps/(nm.km) | [۲] |
| -- | -- | 0.1×10^{-8} dB/cm | 28ps/(nm.km) | [۳] |
| -- | $26.838\mu m^2$ | 0.1×10^{-11} dB/cm | -2.5ps/(nm.km) | [۴] |
| -- | $17\mu m^2$ | -- | 6ps/(nm.km) | [۶] |
| $49w^{-1}km^{-1}$ | $2.28\mu m^2$ | 2.18×10^{-4} dB/cm | 5ps/(nm.km) | [۷] |
| $18w^{-1}km^{-1}$ | $7.7\mu m^2$ | 10^{-10} dB/cm | -2.5ps/(nm.km) | [۱۰] |

۴- نتیجه گیری

از مزایای آن به حساب می آید. اما در نمونه بهبودیافته، کلیه مقادیر پاشیدگی، ناحیه موثر مودی، اثرات غیرخطی و تلفات تحدید بسیار مناسب به دست آمد که برای کاربردهای مخابرات نوری می تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به پاشیدگی منفی طرح بهبودیافته، می توان از آن به عنوان فیبر کریستال فوتونی جبرانگر نیز استفاده کرد.

در این مقاله، به طراحی و مدل سازی فیبرهای کریستال فوتونی با مشخصات مطلوب پرداخته شد. فیبر کریستال فوتونی طراحی شده اولیه، دارای مشخصه های خوبی مانند پاشیدگی کم، ناحیه موثر مودی بزرگ و اثرات غیرخطی کم است که البته تاحدودی میزان تلفات آن زیاد است. ساختار منظم و ساده آن به منظور سادگی در فرایند ساخت

۵- مراجع

- [1] Hansen, K.P, (2003). "Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber," Opt. Express, Vol. 11, PP. 1503-1509.
- [2] Nejad, S. M., Ehteshami, N., (2010). "Novel design to compensate dispersion for index-guiding photonic crystal fiber with defected core," 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, IEEE, 2010, Vol. 2, PP. 417-421.
- [3] Nejad, S. M., Pourmahyabadi, M., (2009). "Numerical Analysis of Index-Guiding Photonic Crystal Fibers with Low Confinement Loss and Ultra-Flattened Dispersion by FDFD Method," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 3, PP. 170-179.
- [4] Olyae, S., Taghipour, F., (2010). "A new design of photonic crystal fiber with ultra-flattened dispersion to simultaneously minimize the dispersion and confinement loss," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 276.
- [5] Olyae, S., Taghipour, F., (2012). "Ultra-flattened dispersion hexagonal photonic crystal fiber with low confinement loss and large effective area", IET Optoelectronics, Vol. 6, No. 2, PP. 82-87.
- [6] Iiyama, K., Yamashita, Z., Takamiya, S., (2005). "Design of dispersion flattened photonic crystal fiber with a large core and a concentric missing ring," 4th IEEE/LEOS Work Optical Passive Components, PP. 1-13.
- [7] Ademgil, H., Haxha, S., (2009). "Highly nonlinear birefringent photonic crystal fiber". Optics Communications, Vol. 282, PP. 2831-2835.
- [8] Olyae, S., Taghipour, F., (2012). "Doped-core octagonal photonic crystal fiber with ultra-flattened nearly zero dispersion and low confinement loss in a wide wavelength range". Fiber and Integrated Optics, Vol. 31, PP: 178-185.
- [9] Fang, L., Zhao, J., Gan, X., (2010). "Ultra broadband-flattened dispersion photonic crystal fiber for supercontinuum generation". Chinese Optics Letters, Vol. 8, No. 11, PP: 1028-1031.

- [10] Aoni, R.A., Ahmed, R., Alam, M., Razzak, S.M.A., (2013). "Optimum design of a nearly zero ultra-flattened dispersion with lower confinement loss photonic crystal fibers for communication systems". International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol. 4, No. 1, PP. 1-4.
- [11] Seifouri, M., Dekamin, M., Olyae, S., (2015). "A new circular chalcogenide/silica hybrid microstructured optical fiber with high negative dispersion for the purpose of dispersion compensation". Optik, Vol. 126, No. 21, PP. 3093-3098.
- [12] Zolla, F., Renversez, G., Nicolet, A., Kuhlmeier, B., Guenneau, S., Felbacq, D., (2005). "Foundations of photonic crystal fibres". World Scientific, Imperial College Press