

# فیبر بلور فوتونی با ساختار دایروی - هشت ضلعی با پاشندگی رنگی، تلفات ساختار و اثر غیر خطی پایین

سعید علیائی، محمود صیفوری و علی نیکوصحبت

یکسان در آن استفاده می‌شود، امکان دستیابی هم‌زمان به پاشندگی رنگی کم و تلفات ساختار پایین مشکل است. از این رو ساختارهای متفاوت و ترکیبی زیادی تاکنون ارائه شده که به طور مثال، هانس برای اولین بار طرح مثلی خود را ارائه داد که در آن به نتایج خوبی نیز رسید [۱۰]. ساختارهای شش ضلعی مدت زیادی است که مورد توجه طراحان قرار گرفته است. از این نمونه‌ها می‌توان به طراحی‌های کوچی لیاما و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۱۱]، آدمگیلو و همکارش در سال ۲۰۰۹ [۱۲]، محمدنژاد و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ [۱۳] و [۱۴] و علیائی و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ [۱۵] و [۱۶] اشاره کرد. همچنین در این خصوص از طرح‌های هشت ضلعی نیز استفاده شده است [۱۷]. طرح‌های ترکیبی مانند دایره‌ای- شش ضلعی هم به تازگی رواج یافته است که از آن بین می‌توان به مقاله لیانگ فنگ و همکارانش [۱۸] اشاره کرد. علاوه بر این به عنوان یکی از کاربردهای مهم این دسته از فیبرهای بلور فوتونی، می‌توان از تولید طیف ابرپویستار در سامانه‌های اندازه‌گیری و مخابرات نوری نام برد [۱۹] تا [۲۳].

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی یک فیبر بلور فوتونی جدید از نوع هسته جامد می‌پردازیم که طرح تکمیلی آن دارای نتایج خوب از جمله پاشندگی نزدیک صفر است. این فیبر دارای ساختار دایروی- هشت ضلعی است که در آن پارامترهای پاشندگی، تلفات ساختار و اثرات غیر خطی کاهش داده شده‌اند. نوآوری ساختار دوم در طرح جدید، استفاده از یک ساختار دوگانه است که هر ساختار نسبت  $d/\Lambda$  متفاوتی دارد (نسبت قطر حفره به فاصله دو حفره مجاور). همچنین در این طرح‌ها ناحیه مؤثر مودی و اثرات غیر خطی فیبر که امروزه مورد پژوهش محققان قرار گرفته است در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر شبیه‌سازی و محاسبه شده است. از آنجایی که فناوری امروز دنیا قادر است تا حفره‌های هوا با قطر ۵ nm را ایجاد کند، ساخت این فیبر بلور فوتونی دور از دسترس نیست.

هدف کلی این مقاله کاهش پاشندگی در محدوده وسیعی از طول موج است که مقایسه طرح تکمیلی نسبت به طرح اولیه و طرح‌های مقایسه شده در این مقاله، دستیابی به این هدف را نشان می‌دهد. همچنین این موضوع با بررسی نتایج تلفات ساختار، اثر غیر خطی و ناحیه مؤثر مودی نیز تکمیل شده است.

## ۲- ویژگی‌های فیبرهای بلور فوتونی

فیبرهای بلور فوتونی دارای ویژگی‌های مهمی هستند که لازم است هنگام طراحی، مورد توجه قرار گیرند. در ادامه به اختصار به بررسی این ویژگی‌ها می‌پردازیم.

### ۲-۱ پاشندگی رنگی

در فیبرهای بلور فوتونی برای یک طول موج معین و با حل معادلات ماکسول مقدار ضریب شکست مؤثر از (۱) به دست می‌آید [۱۵] و [۱۶]

چکیده: از فیبرهای بلور فوتونی به عنوان موجبر با پاشندگی و تلفات ساختار کم همراه با ضریب غیر خطی اندک، در سامانه‌های مخابرات نوری می‌توان استفاده کرد. در این مقاله، یک فیبر بلور فوتونی با ساختار دایروی- هشت ضلعی پیشنهاد شده است. در طرح اولیه، فیبر بلور فوتونی دارای ساختار هشت ضلعی است که پاشندگی آن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در حدود  $70 \text{ ps/nm.km}$  است. تلفات ساختار و ضریب غیر خطی آن به ترتیب برابر  $0.76 \times 10^{-12} \text{ dB/cm}$  و  $8.988 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$  است. با اصلاح ساختار به صورت ترکیبی، مقدار پاشندگی به مرز صفر رسیده است و نتایج شبیه‌سازی، مقدار تلفات ساختار را معادل  $8 \times 10^{-11} \text{ dB/cm}$  و ضریب غیر خطی را برابر  $7.956 \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$  نشان می‌دهد.

کلیدواژه: فیبر بلور فوتونی، ناحیه مؤثر مودی، پاشندگی رنگی، تلفات ساختار، اثرات غیر خطی.

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تحقیقات در خصوص فیبرهای بلور فوتونی (PCF) در سطح دنیا، پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است [۱] تا [۹] و یکی از دلایل این امر، ویژگی‌های مناسب و منحصر به فرد این فیبرهاست. فیبرهای بلور فوتونی ویژگی‌هایی از جمله عملکرد تک مود پهن و گسترده، پاشندگی رنگی انعطاف‌پذیر در بازه طول موج گسترده، اثر غیر خطی قابل کنترل و اثر دوشکستی بالا را دارا هستند. فیبرهای بلور فوتونی با پاشندگی رنگی کم، تلفات ساختار کم و ضریب غیر خطی کوچک می‌توانند نور را در مرکز خود متمرکز کرده و در سامانه‌های تسهیم‌دهی طول موج (WDM) مورد استفاده قرار بگیرند. فیبرهای بلور فوتونی به دو دسته فیبرهای با هسته هوا و فیبرهای با هسته جامد یا همان فیبرهای شاخص هدایت‌شده تقسیم می‌شوند. اساس کار فیبرهای بلور فوتونی با هسته هوا بر اساس شکاف باند فوتونی (PBG) و فیبرهای بلور فوتونی با هسته جامد بر اساس بازتاب داخلی کلی (TIR) است. قسمت هسته این فیبرها از سیلیکا است که در اطراف آن حفره‌های هوا قرار گرفته است. در فیبرهای بلور فوتونی مرسوم که از یک ساختار

این مقاله در تاریخ ۴ مهر ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۲۲ خرداد ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

سعید علیائی، دانشیار دانشکده مهندسی برق، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، (email: s\_olyaee@srttu.edu)

محمود صیفوری، استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، (email: mahmood.seifouri@srttu.edu)

علی نیکوصحبت، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، (email: a.nikoosohbat@srttu.edu)

1. Photonic Crystal Fiber
2. Wavelength Division Multiplexing
3. Photonic Bandgap
4. Total Internal Reflection

دارد. در مقابل، فیبر بلور فوتونی با ناحیه مؤثر مودی کوچک برای کاربردهای غیر خطی نور مفید است. ناحیه مؤثر مودی فیبر بلور فوتونی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵] و [۱۶]

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

که در آن  $A_{eff}$  ناحیه مؤثر مودی و  $E$  میدان الکتریکی توزیعی است که از معادلات ماکسول استخراج شده است.

### ۲-۴ اثرات غیر خطی

اثرات غیر خطی بالا باعث تغییر شکل موج سیگنال ورودی می‌گردد و برای کاربردهای غیر خطی نور مناسب است. بنابراین، فیبرهای بلور فوتونی با اثرات غیر خطی بالا نمی‌توانند در مسیرهای طولانی برای ارسال اطلاعات مورد استفاده قرار گیرند. پس لازم است برای طراحی فیبرهای بلور فوتونی، اثرات غیر خطی فیبر را تا حد امکان کاهش داد. ضریب غیر خطی فیبر را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۱۹]

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \times 10^7 \text{ w}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \quad (6)$$

که در آن  $\gamma$  ضریب غیر خطی فیبر با واحد  $\text{w}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  و  $n_2$  شاخص ضریب غیر خطی است.

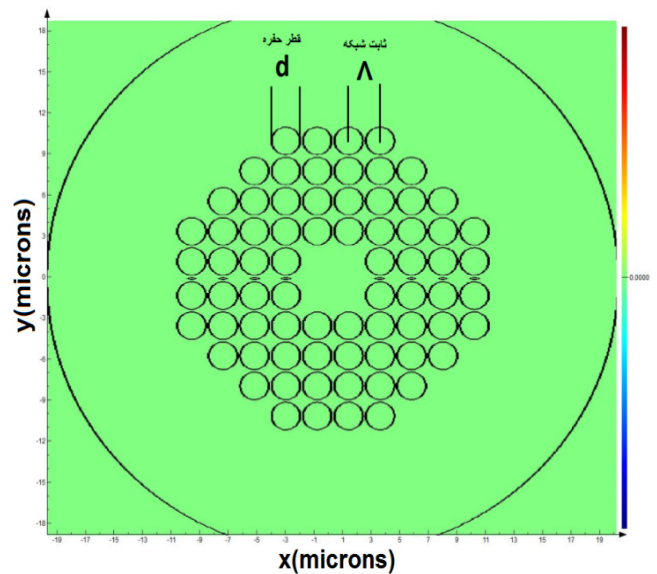
### ۳- طراحی و نتایج شبیه‌سازی

#### ۳-۱ طرح پیشنهادی اولیه

طرح اولیه پیشنهادی فیبر بلور فوتونی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق این شکل، این طرح دارای یک ساختار مربعی است که با حذف برخی از حفره‌های هوای بیرونی، به ساختار هشت‌ضلعی نامنتظم تبدیل شده است. این ساختار دارای ۴ حلقه از حفره‌های هوا است. هسته فیبر از سیلیکای خالص با ضریب شکست ۱٫۴۵ است و حفره‌های اطراف مرکز فیبر از هوا با ضریب شکست ۱ تشکیل شده است. قطر حفره‌های هوا ۲۰۰۰ نانومتر و ثابت شبکه در این طرح ۲۲۰۰ نانومتر است و به بیان دیگر  $d = 2 \mu\text{m}$  و  $\Lambda = 2,2 \mu\text{m}$ .

در فیبرهای بلور فوتونی، نسبت  $d/\Lambda$  نقش تعیین‌کننده‌ای در پاشندگی و تلفات ساختار فیبر دارد. افزایش نسبت  $d/\Lambda$  باعث افزایش پاشندگی و کاهش تلفات ساختار می‌شود و کاهش نسبت  $d/\Lambda$  به طور عکس باعث کاهش پاشندگی و افزایش تلفات ساختار می‌شود. بنابراین این نسبت باید طوری تعیین شود که پاشندگی و تلفات ساختار در مقادیر مناسب باشند.

در شبیه‌سازی این طرح، از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) استفاده شده است. در شکل ۲ نمودار پاشندگی بر حسب طول موج در فیبر بلور فوتونی اولیه آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در طول موج ۱٫۲۰ میکرومتر مقدار پاشندگی به  $30 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  می‌رسد که کمترین مقدار آن در طول موج ۱٫۲ تا ۱٫۶۵ میکرومتر است. در طول موج ۱٫۵۵ میکرومتر هم مقدار پاشندگی به عدد  $70 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  رسیده است. به طور کل در طول موج‌های ۱ تا ۱٫۶۵ میکرومتر، مقدار پاشندگی بین ۳۰ تا  $80 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  تغییر می‌کند که با وجود پایین بودن، اما مناسب نیست.



شکل ۱: نمایی از سطح مقطع فیبر بلور فوتونی پیشنهادی اولیه با قطر  $d = 2000 \text{ nm}$  و ثابت شبکه  $\Lambda = 2200 \text{ nm}$ .

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k} \quad (1)$$

که در آن  $\beta$  و  $k$  به ترتیب ثابت انتشار و عدد ثابت موج هستند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیبرهای بلور فوتونی پاشندگی است. پاشندگی موجب در فیبرهای بلور فوتونی به سختی قابل کنترل است و تنها با تغییر ساختار امکان‌پذیر است اما پاشندگی ماده با طراحی مناسب قطر حفره‌ها و ثابت شبکه آنها امکان‌پذیر است. پاشندگی فیبرهای بلور فوتونی بر حسب طول موج محاسبه می‌شود که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت [۱۵] و [۱۶]

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

که در این رابطه،  $D(\lambda)$  پاشندگی رنگی،  $\lambda$  طول موج،  $c$  سرعت نور در خلأ و  $\text{Re}[n_{eff}]$  قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر فیبر بلور فوتونی است. پاشندگی رنگی فیبر بلور فوتونی از مجموع پاشندگی موجبر  $D_w$  و پاشندگی ماده  $D_m$  تشکیل شده است

$$D(\lambda) = D_w + D_m \quad (3)$$

#### ۲-۲ تلفات ساختار (خمشی)

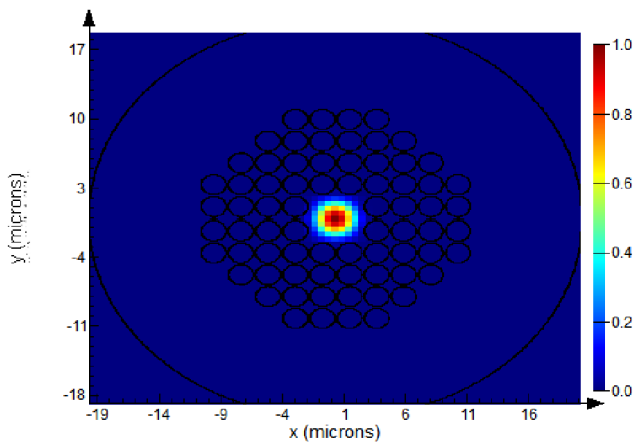
تلفات ساختار به واقع همان قابلیت متمرکز شدن نور در مرکز هسته است که آن را با  $L_c$  نمایش می‌دهند. با افزایش تعداد حفره‌های هوا در اطراف هسته، می‌توان تلفات ساختار را کاهش داد زیرا باعث قوی‌تر شدن نور متمرکز شده در هسته فیبر می‌شود ولی بایستی در این طراحی، مقدار پاشندگی نیز در نظر گرفته شود. برای تلفات ساختار داریم [۱۳]

$$L_c = \frac{2 \times 10^6}{\ln 10} k \cdot \text{Im}[n_{eff}] \quad (4)$$

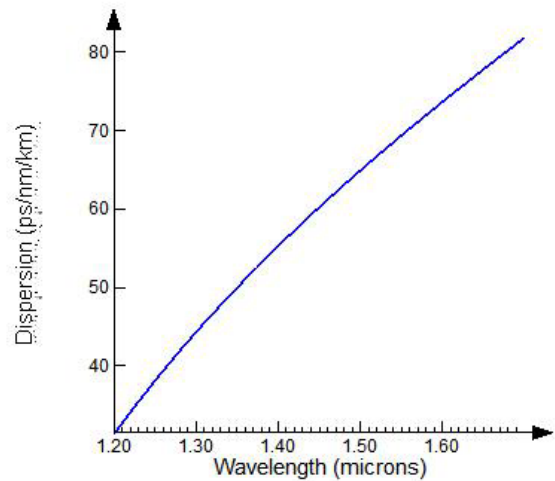
که در آن  $\text{Im}[n_{eff}]$  قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر با واحد dB/km است.

#### ۳-۲ ناحیه مؤثر مودی

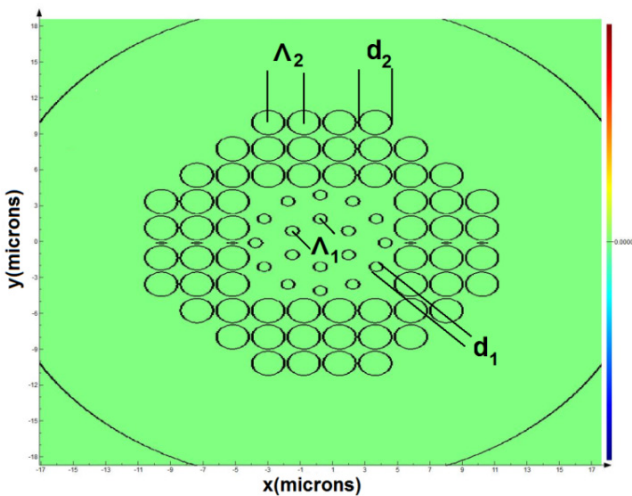
از دیگر ویژگی‌های مهم فیبرهای بلور فوتونی، ناحیه مؤثر مودی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در ویژگی‌های فیبر از جمله ضریب غیر خطی



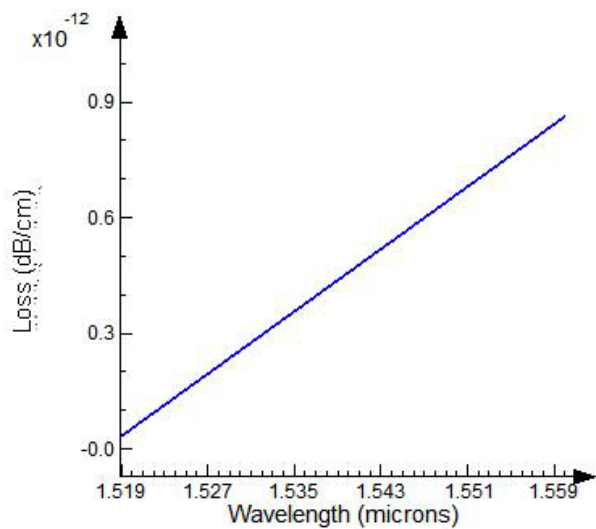
شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در مود اصلی در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی اولیه.



شکل ۲: نمودار پاشندگی بر حسب طول موج در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی اولیه با قطر  $d = 2000 \text{ nm}$  و ثابت شبکه  $\Lambda = 2200 \text{ nm}$ .



شکل ۵: نمایی از سطح مقطع فیبر بلور فوتونی پیشنهادی تکمیلی با قطرهای  $d_1 = 800 \text{ nm}$  و  $d_2 = 2000 \text{ nm}$  و ثابت شبکه‌های  $\Lambda_1 = 2000 \text{ nm}$  و  $\Lambda_2 = 2200 \text{ nm}$ .



شکل ۳: نمودار تلفات بر حسب طول موج در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی اولیه با قطر  $d = 2000 \text{ nm}$  و ثابت شبکه  $\Lambda = 2200 \text{ nm}$ .

### ۲-۳ طرح پیشنهادی تکمیلی

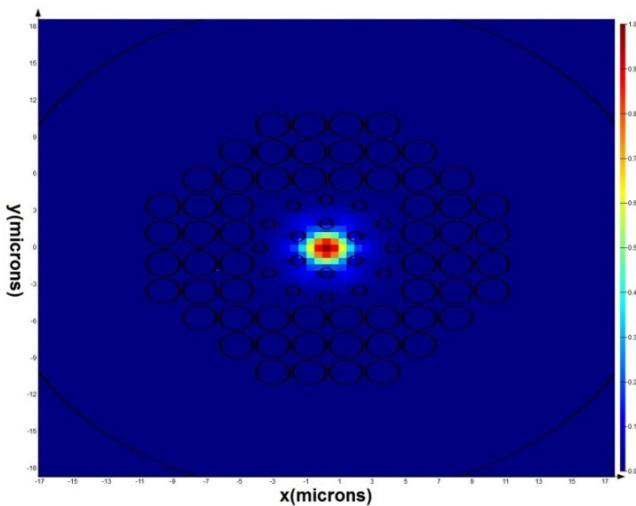
طرح پیشنهادی اولیه دارای یک ساختار یکسان بود که قاعداً فرایند ساخت آن را تسهیل می‌بخشد. در این طرح تلفات ساختار و ضریب غیر خطی مناسب است اما پاشندگی آن به نسبت بزرگ است. به منظور بهبود پارامترها، ساختار اولیه را تغییر داده و با انتخاب مناسب نسبت قطر حفره به ثابت شبکه،  $d/\Lambda$ ، مشخصه‌های بهتری را به دست می‌آوریم. با انتخاب  $d/\Lambda$  کوچک‌تر، پاشندگی بهبود می‌یابد ولی با انتخاب  $d/\Lambda$  بزرگ‌تر، تلفات ساختار بهینه می‌شود. بنابراین در این طرح از ساختاری استفاده می‌کنیم که در مرکز دارای  $d/\Lambda$  کوچک‌تری و در کناره‌ها دارای  $d/\Lambda$  بزرگ‌تری باشد.

طرح پیشنهادی تکمیلی در شکل ۵ نشان داده شده است. ساختار این فیبر به صورت دایروی-هشت‌ضلعی است که در مرکز و کناره‌ها متفاوت است. در مرکز فیبر، دو حلقه حفره‌های هوا به صورت ساختار دایروی وجود دارد که در آن  $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$  و  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$  است. بقیه حفره‌های هوا دارای همان ساختار قبلی هستند. در واقع این بخش، یک طرح هشت‌ضلعی است که داخلی‌ترین حلقه حفره‌های هوای آن حذف شده و در آن  $d_2 = 2 \mu\text{m}$  و  $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$  است.

شکل ۶ نمودار پاشندگی بر حسب طول موج را در فیبر بلور فوتونی طرح پیشنهادی تکمیلی نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص

شکل ۳ نمودار تلفات ساختار بر حسب طول موج را در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی اولیه نشان می‌دهد. در این شکل در طول موج ۱/۶۰ میکرومتر مقدار تلفات ساختار به حدود صفر می‌رسد. در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر هم مقدار تلفات ساختار به  $0.6 \times 10^{-12} \text{ dB/cm}$  رسیده است و با افزایش طول موج این مقدار کاهش می‌یابد. به طور کل در طول موج‌های ۱ تا ۱/۵۵ میکرومتر، مقدار تلفات ساختار در این فیبر بلور فوتونی مناسب است. هرچه میزان تغییرات ضریب شکست به مقدار ضریب شکست هسته فیبر نزدیک‌تر باشد، فیبر به پارامترهای بهتری دست یافته است. این فیبر در طول موج‌های ۱ تا ۱/۵۵ میکرومتر، دارای کمترین تغییرات در ضریب شکست است.

شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی طرح اولیه را در طول موج مود اصلی یعنی ۱/۵۵ میکرومتر نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نور در قسمت مرکز فیبر متمرکز شده و بنابراین دارای ناحیه مودی خوبی است. ناحیه مؤثر مودی به دست آمده در طرح اولیه فیبر پیشنهادی،  $1375294 \mu\text{m}^2$  است. از آنجایی که جنس فیبر از سیلیکا ساخته شده است، مقدار  $n_f$  را در (۶) برابر عدد  $3 \times 10^{-14} \text{ mm}^2 \text{ w}^{-1}$  در نظر می‌گیریم. بر این اساس می‌توان ضریب اثر غیر خطی فیبر را محاسبه نمود که این عدد به مقدار  $8988 \text{ w}^{-1} \text{ km}^{-1}$  رسیده است.



شکل ۸: توزیع میدان الکتریکی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در مود اصلی در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی تکمیلی.

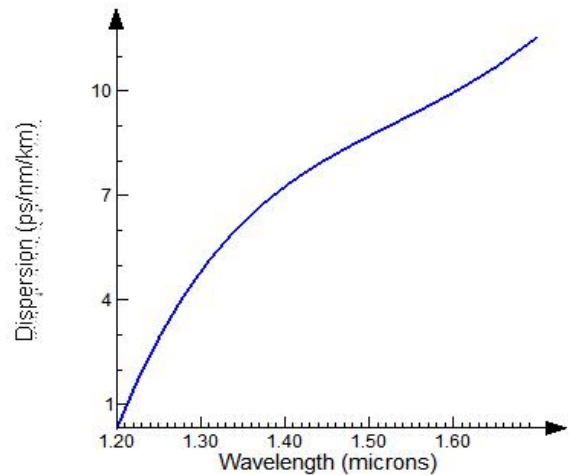
در ادامه پژوهش انجام شده در این مقاله می‌توان با توجه به یکی از کاربردهای مهم این دسته از فیبرها در تولید طیف ابرپیوستار جهت کاربردهای متنوع در حوزه‌های اندازه‌گیری و مخابرات نوری، رفتار پالس نوری با طول موجی در نزدیکی طول موج صفر پاشندگی و در محدوده پاشندگی غیر عادی را برای طول مشخصی از فیبر و برای چندین توان بر روی هر دو ساختار بررسی کرد تا مشخص گردد افزایش توان چه تأثیری بر گسترش طیفی در انتهای فیبرهای طراحی شده دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

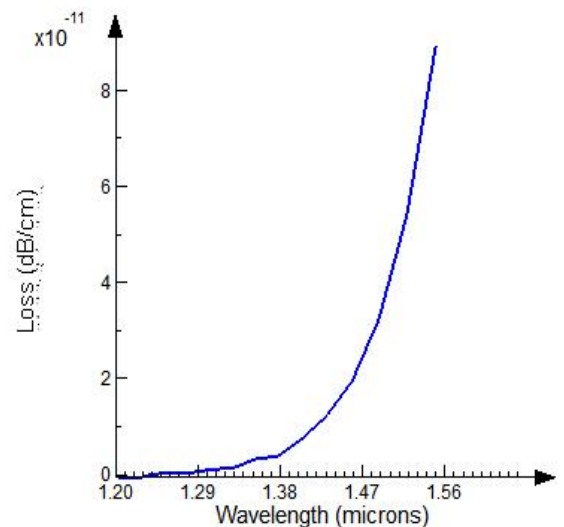
در این مقاله، دو طرح اولیه و تکمیلی از فیبرهای بلور فوتونی ارائه شد. در طرح اولیه، فیبر بلور فوتونی دارای ساختار مربعی است که با حذف برخی حفره‌ها به شکلی مانند هشت‌ضلعی نامنتظم تبدیل شده و پاشندگی آن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به نزدیکی به  $۷۰ \text{ ps/nm.km}$  می‌رسد. مقدار تلفات ساختار و ضریب اثرات غیر خطی این فیبر نیز به ترتیب برابر  $۰.۶ \times 10^{-12} \text{ dB/cm}$  و  $۸.۹۸۸ \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$  به دست آمد. فیبر بلور فوتونی پیشنهادی طرح اولیه، دارای مشخصه‌های خوبی است ولی میزان پاشندگی آن زیاد است. بنابراین با ارائه طرحی با ساختار دوگانه، میزان پاشندگی آن بهبود بخشیده شد. در طرح پیشنهادی تکمیلی که دارای یک ساختار دایروی - هشت ضلعی است، مقدار پاشندگی به مرز صفر می‌رسد و مقدار تلفات ساختار و ضریب غیر خطی نیز به ترتیب به  $۸ \times 10^{-11} \text{ dB/cm}$  و  $۷.۹۵۶ \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$  رسیده است.

#### مراجع

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*, Published by Princeton University Press, ISBN: 978-0-691-12456-8, 2007.
- [2] F. Mehdizadeh, H. Alipour-Banaei, and S. Serajmohammadi, "Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator," *J. of Optics*, vol. 15, pp. 1-7, May 2013.
- [3] M. Djavid, A. Ghaffari, F. Monifi, and M. S. Abrishamian, "T-shaped channel-drop filters using photonic crystal ring resonators," *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 40, no. 10, pp. 3151-3154, Sep. 2008.
- [4] F. L. Hsiao and C. Lee, "Computational study of photonic crystals nano-ring resonator for biochemical sensing," *IEEE Sensors J.*, vol. 10, no. 7, pp. 1185-1191, Jul. 2010.
- [5] S. H. Kim, H. Y. Ryu, H. G. Park, G. H. Kim, Y. S. Choi, and Y. H. Lee, "Two-dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no.14, pp. 2499-2501, Sep. 2002.



شکل ۶: نمودار پاشندگی بر حسب طول موج در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی تکمیلی.



شکل ۷: نمودار تلفات ساختار بر حسب طول موج در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی تکمیلی.

است، در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر مقدار پاشندگی به  $۹ \text{ ps/(nm.km)}$  می‌رسد که نسبت به طرح قبلی بهتر است. در طول موج ۱/۲۰ میکرومتر مقدار پاشندگی به صفر می‌رسد. به طور کل در طول موج‌های ۱/۲۰ تا ۱/۵۵ میکرومتر مقدار پاشندگی بین صفر تا  $۹ \text{ ps/nm.km}$  تغییر می‌کند. نمودار تلفات ساختار بر حسب طول موج در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی طرح دوم در شکل ۷ نشان داده شده است. در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر، مقدار تلفات ساختار به مقدار  $۸ \times 10^{-11} \text{ dB/cm}$  رسیده است که البته بر اساس پیش‌بینی قبلی، نسبت به طرح اولیه بیشتر است. در طول موج ۱/۲۰ میکرومتر هم مقدار تلفات ساختار به پایین‌ترین مقدار یعنی به حدود صفر رسیده است. با افزایش طول موج، تلفات ساختار افزایش می‌یابد. هرچه میزان تغییرات ضریب شکست به میزان ضریب شکست هسته فیبر نزدیک‌تر باشد، فیبر به پارامترهای بهتری دست یافته است. در این فیبر نیز در طول موج‌های ۱ تا ۱/۵۵ میکرومتر تغییرات ضریب شکست قابل قبول است.

شکل ۸ توزیع میدان الکتریکی در فیبر بلور فوتونی پیشنهادی طرح دوم را در طول موج اصلی یعنی ۱/۵۵ میکرومتر نشان می‌دهد. ناحیه مؤثر مودی در فیبر پیشنهادی طرح دوم،  $۱۵.۲۸۴۷ \mu\text{m}^2$  و ضریب اثر غیر خطی فیبر برابر  $۷.۹۵۶ \text{ w}^{-1}\text{km}^{-1}$  است. در جدول ۱ نتایج فیبرهای پیشنهادی این مقاله در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر با فیبرهای برخی از منابع و مآخذ به منظور مقایسه درج شده است.



جدول ۱: بررسی نتایج فیبرهای پیشنهادی این مقاله با فیبرهای برخی از منابع در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر.

ضریب غیر خطی $w^{-1} \text{km}^{-1}$	ناحیه مؤثر مودی $\mu\text{m}^2$	تلفات ساختار dB/cm	پاشندگی ps/(nm.km)	طرح اولیه
۸,۹۸۸	۱۳,۵۲۹۴	$0.6 \times 10^{-12}$	۷۰	طرح اولیه
۷,۹۵۶	۱۵,۲۸۴۷	$8 \times 10^{-11}$	۹	طرح تکمیلی
---	---	$0.3 \times 10^{-5}$	-۱۹۷	[۱۳]
---	---	$0.1 \times 10^{-8}$	۲۸	[۱۴]
---	۲۶,۸۳۸	$0.1 \times 10^{-11}$	-۲,۵	[۱۵]
---	۱۷	---	۶	[۱۱]
۴۹	۲,۲۸	$2.18 \times 10^{-4}$	۵	[۱۲]
۱۸	۷,۷	$10^{-10}$	-۲,۵	[۱۹]

fibers by means of fluidic infiltration," *J. of Modern Optics*, vol. 59, no. 16, pp. 1384-1390, Aug. 2012.

- [21] A. Husakou and J. Herrmann, "Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers," *Physical Review Letters*, vol. 87, no. 20, pp. 20391-20395, Nov. 2001.
- [22] M. Seifouri, S. Olyaei, and M. Dekamin, "A new design of As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> chalcogenide glass photonic crystal fiber with ultra-flattened dispersion in mid-infrared wavelength range," *Majlesi J. of Electrical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 9-15, Dec. 2014.
- [23] J. Cascante-Vindas, A. Diez, J. Cruz, M. Andres, E. Silvestre, J. Miret, and A. Ortigosa-Blanch, "Tapering photonic crystal fibers for supercontinuum generation with nanosecond pulses at 532 nm," *Optics Communications*, vol. 281, no. 3, pp. 433-438, Feb. 2008.

**سعید علیانی** در دهم دی ماه ۱۳۵۳ در شهر مشهد متولد شد. او مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک را از دانشگاه مازندران با رتبه اول در سال ۱۳۷۶ اخذ نمود. سپس موفق به گذراندن دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق الکترونیک در شاخه اپتوالکترونیک از دانشگاه علم و صنعت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۶ شد. رساله دکتری ایشان بر روی اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نانومتری با استفاده از تداخل سنج سوپرتروداین بود. علیانی در سال ۱۳۸۵ آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک را در دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید رجایی تأسیس نمود. در حال حاضر ایشان دانشیار دانشکده مهندسی برق و معاون پژوهش و فناوری دانشگاه شهید رجایی می‌باشند. علیانی تا کنون بیش از یکصد و شصت مقاله در مجلات و همایش‌های معتبر ملی و بین‌المللی و نیز کتاب‌های "مقدمه‌ای بر فوتونیک"، "مهندسی لیزر و مخابرات نوری فضای آزاد" و "کریستال‌های فوتونی" را به چاپ رسانده است. از جمله محورهای تحقیقاتی ایشان می‌توان به تداخل سنج‌های لیزری، نانومترولوژی، فیبرها و حسگرهای کریستال فوتونی و سیستم‌های ابزار دقیق نوری اشاره کرد.

**محمود صیفوری** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و دکترای مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۵ و ۱۹۸۹ میلادی از دانشگاه انگلستان به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستن به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در سال‌های ۱۳۶۸ الی ۱۳۷۰ استادیار دانشگاه برایتون انگلستان و در سال‌های ۱۳۷۰ الی ۱۳۷۹ استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران بوده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند الکترونیک نوری، فیبر نوری، ادوات فوتونیک و کریستال‌های فوتونی می‌باشد.

**علی نیکو صحبت** متولد اسفند سال ۱۳۵۶ قم، تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ از موسسه آموزش عالی شهاب دانش و دانشگاه شهید رجایی تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون مدرس دانشکده مهندسی برق- الکترونیک در دانشگاه پیام نور و موسسه آموزش عالی شهاب دانش قم می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک نوری، فیبرهای کریستال فوتونی و ادوات فوتونیک.

- [6] M. Y. Mahmoud, G. Bassou, A. Taalbi, and Z. M. Chekroun, "Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators," *Optics Communications*, vol. 285, no. 3, pp. 368-372, Feb. 2012.
- [7] S. Olyaei and A. A. Dehghani, "Ultrasensitive pressure sensor based on point defect resonant cavity in photonic crystal," *Sensor Letters*, vol. 11, no. 10, pp. 1854-1859, Oct. 2013.
- [8] S. Olyaei, A. Mohebzadeh Bahabady, and E. Leitgeb, "A diamond-shaped bio-sensor based on two-dimensional photonic crystal nanoring resonator," in *Proc. IET 10th Int. Symp. on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP'14*, vol. 9, pp. 446-449, Jul. 2014.
- [9] Z. Qiang and W. Zhou, "Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators," *Optics Express*, vol. 15, no. 4, pp. 1823-1831, Feb. 2007.
- [10] K. P. Hansen, "Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber," *Opt. Express*, vol. 11, no. 13, pp. 1503-1509, Jun. 2003.
- [11] K. Iiyama, Z. Yamashita, and S. Takamiya, "Design of dispersion flattened photonic crystal fiber with a large core and a concentric missing ring," in *Proc. 4th IEEE/LEOS Workshop on Optical Passive Components*, pp. 10-13, 22-24 Jun. 2005.
- [12] H. Ademgil and S. Haxha, "Highly nonlinear birefringent photonic crystal fiber," *Optics Communications*, vol. 282, no. 14, pp. 2831-2835, Jul. 2009.
- [13] S. Mohaamdnejad and N. Ehteshami, "Novel design to compensate dispersion for index-guiding photonic crystal fiber with defected core," in *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. on Mechanical and Electronics Engineering*, vol. 2, pp. 417-421, Aug. 2010.
- [14] S. Mohammadnejad and M. Pourmahyabadi, "Numerical analysis of index-guiding photonic crystal fibers with low confinement loss and ultra-flattened dispersion by FDFD method," *Iranian J. of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 170-179, Sep. 2009.
- [15] S. Olyaei and F. Taghipour, "A new design of photonic crystal fiber with ultra-flattened dispersion to simultaneously minimize the dispersion and confinement loss," *J. of Physics: Conf. Series*, vol. 276, no. 1, pp. 12080-12085, Feb. 2010.
- [16] S. Olyaei and F. Taghipour, "Ultra-flattened dispersion hexagonal photonic crystal fiber with low confinement loss and large effective area," *IET Optoelectronics*, vol. 6, no. 2, pp. 82-87, Apr. 2012.
- [17] S. Olyaei and F. Taghipour, "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, no. 3, pp. 178-185, Jun. 2012.
- [18] L. Fang, J. Zhao, and X. Gan, "Ultra broadband-flattened dispersion photonic crystal fiber for supercontinuum generation," *Chinese Optics Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 1028-1031, Nov. 2010.
- [19] R. A. Aoni, R. Ahmed, M. Alam, and S. M. A. Razzak, "Optimum design of a nearly zero ultra-flattened dispersion with lower confinement loss photonic crystal fibers for communication systems," *International J. of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2013.
- [20] M. Ebnali-Heidari, F. Dehghan, H. Saghaei, F. KoohiKamali, and M. Moravvej-Farshi, "Dispersion engineering of photonic crystal