

## شبیه‌سازی عددی برای بهبود مشخصات پاشندگی یک فیبر بلور فوتونی هفت هسته‌ای با تزریق سیال نوری

نسرین رئیسی اردکانی<sup>۱</sup>، محمد کاظم مروج فرشی<sup>۱</sup> و مجید ابن علی حیدری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه الکترونیک

<sup>۲</sup>دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق

چکیده - فیبر بلور فوتونی هفت هسته‌ای که سیال نوری به درون تعدادی از حفره‌ها تزریق شده جهت بهبود مشخصه پاشندگی مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که با افزایش ضریب شکست سیال، پاشندگی تخت در محدوده وسیع فرکانسی با مقدار ناچیز قابل حصول است.

کلیدواژه - سیال نوری، ضریب شکست موثر، فیبر بلور فوتونی، مهندسی پاشندگی، هفت هسته

## Numerical simulation for optimizing dispersion properties by means of microfluidic infiltration

N. Raeisi-Ardekani<sup>a</sup>, M.K. Moravvej-Farshi<sup>a</sup>, and M.Ebnali-Heidari<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, TM University, Tehran, Iran

<sup>c</sup> Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord

Abstract- in this paper optofluidic photonic crystal fiber with seven core is designed to engineer the dispersion through the different cores. Numerical simulations reveals that by changing the refractive index of fluid, the value of dispersion decreases and its flatness over the wide range of wavelength can be increased.

Keywords: Dispersion, effective index, Optofluidic, Photonic crystal fiber, Seven-core

## ۱- مقدمه

در طراحی تراشه‌های قابل برنامه‌ریزی بوجود خواهد آمد. همچنین استفاده از سیال نوری امکان مجتمع سازی در یک تراشه و قابلیت پیکربندی به دفعات زیاد را ایجاد می‌کند [۷].

ساختار این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است: در بخش دو روابط ریاضی پاشندگی در فیبر بلور فوتونی معرفی می‌شوند، سپس ساختار فیبر مورد نظر برای مهندسی پاشندگی و نتایج حاصل از آن در بخش سه بیان می‌شوند. در بخش چهار، با ارائه نتیجه‌گیری مقاله پایان می‌یابد.

## ۲- روابط ریاضی

پاشندگی فیبر نقش حیاتی در انتشار پالس‌های نوری ایفا می‌کند زیرا مولفه‌های طیفی مختلف مربوط به پالس با سرعت‌های مختلفی حرکت می‌کنند. هر تاخیر زمانی مولفه‌های طیفی متفاوت منجر به پهن شدن پالس می‌شود [۸]. D پارامتر پاشندگی با واحد ps/km.nm است و با  $\beta_2$  پارامتر پاشندگی سرعت گروه، توسط رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$D = -\left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)\beta_2 \quad (1)$$

این پارامتر با تغییر ناخالصی در فیبر که باعث تغییر ضریب شکست می‌شود، تغییر می‌کند [۳]. محاسبات با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) انجام شده است. در شبیه‌سازی‌های عددی پاشندگی فیبر به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$D = -\left(\frac{\lambda}{c}\right)\left(\frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}\right) \quad (2)$$

در رابطه فوق c سرعت نور در خلا و  $\lambda$  طول موج فضای آزاد است. ضریب شکست موثر فیبر بلور فوتونی در مد اصلی،  $n_{eff} = \beta/k_0$ ، تعریف می‌شود که  $\beta$  پارامتر ثابت انتشار و  $k_0 = 2\pi/\lambda$  عدد موج است.

توزیع مد یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر روی توان خروجی از فیبر بوده که با تغییر ابعاد هسته و نیز تزریق سیال نوری می‌تواند کنترل شود. مساحت توزیع مد موثر

مخابرات فیبر نوری به علت مزایایی از قبیل تضعیف بسیار کم فیبر در گستره طیفی وسیع و قابلیت دسترسی به سرعت انتقال بالای اطلاعات، در چند دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه بوده است [۱، ۲]. از موانع رسیدن به این اهداف در فیبر می‌توان از جمله پاشندگی<sup>۱</sup> را نام برد. برای حذف یا کنترل پاشندگی و آثار غیرخطی در فیبر که به مدیریت پاشندگی معروف است [۳، ۴]، تکنیک‌های مختلفی وجود دارند که توسط آنها پاشندگی فیبر بلور فوتونی<sup>۲</sup> بهینه شده و برای کاربردهای به خصوصی آماده می‌شود. در مقایسه با فیبرهای مرسوم، فیبرهای بلور فوتونی به دلیل مزایای از جمله اثرات غیرخطی کم و توزیع مد<sup>۳</sup> بزرگ مورد توجه قرار گرفتند. از آنجا که توزیع مد برای فیبرهای تک هسته‌ای به دلیل اثرات تلفات خمشی<sup>۴</sup> نمی‌تواند خیلی بزرگ شود از فیبرهای چند-هسته‌ای استفاده شده است. با افزایش تعداد هسته‌ها توزیع مد فیبر بلور فوتونی چند هسته‌ای نیز متعاقباً افزایش می‌یابد و علاوه بر آن اثرات حرارتی نیز کاهش می‌یابند.

منحنی پاشندگی و نیز پروفایل مدها می‌توانند با تغییر هندسه حفره‌های هوای اطراف هسته‌ها کنترل و اصلاح شوند که در این مقاله با تزریق سیال نوری به جای تغییر هندسه حفره‌ها به این منظور دست می‌یابیم. علاوه بر آن با تغییر نحوه‌ی تزریق سیال می‌توانیم انتخابی بر روی انتشار نور در هسته‌ها داشته باشیم [۵].

تزریق سیال توسط سیستم تزریق میکرو و بوسیله میکرو پیپت صورت می‌گیرد. تمامی مراحل تزریق توسط میکروسکوپ نوری کانفوکال نظارت می‌شود [۶].

مزیت اصلی روش سیال نوری نسبت به سایر روش‌ها در این است که تنها با عوض کردن نوع سیال نوری در بلور فوتونی، ویژگی‌های نوری افزاره تغییر می‌کند. از طرف دیگر با ترکیب انواع سیال‌ها با یکدیگر و استفاده از بلور فوتونی جهت بستر سیال نوری پیشرفت‌های چشمگیری

<sup>1</sup> Dispersion

<sup>2</sup> Photonic crystal fiber (PCF)

<sup>3</sup> Mode area

<sup>4</sup> Macrobending loss

<sup>5</sup> Finite difference time domain

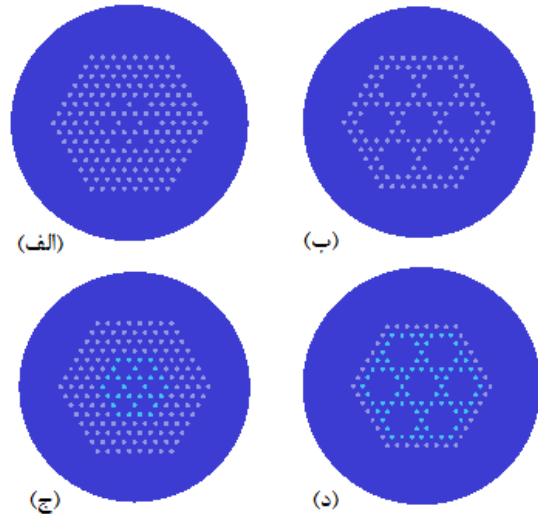
با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$A_{eff} = \frac{\left( \iint_s |E_t|^2 dx dy \right)^2}{\iint_s |E_t|^4 dx dy} (\mu m^2) \quad (3)$$

که E دامنه میدان الکتریکی در آن مد می‌باشد [۹].

### ۳- ساختار پیشنهادی برای کنترل مشخصات پاشندگی و نتایج حاصل از شبیه سازی

چند ساختار از فیبر بلور فوتونی هفت هسته‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختارها تشکیل شده‌اند از حفره‌های هوایی که در طول فیبری از جنس سیلیکای دوپ شده یا corning silica با آرایش شش ضلعی و ثابت شبکه  $\Lambda = 3/26$  قرار گرفته‌اند. قطر حفره‌های هوا  $d = 1/47 \mu m$  در نظر گرفته شده است. هر یک از هسته‌ها در شکل ۱(ب) و (د) با حذف هفت حفره هوا ولی در شکل ۱(الف) و (ج) با حذف یک حفره هوا تشکیل شده‌اند.

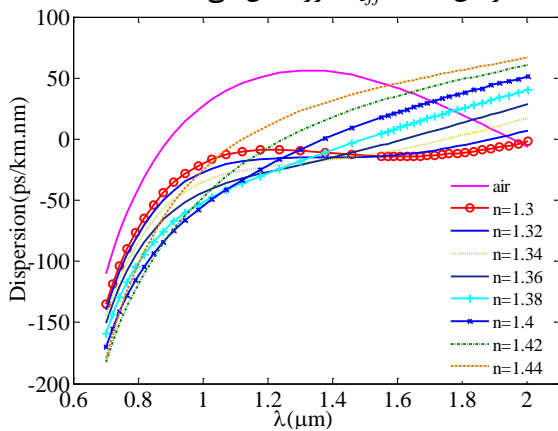


شکل ۱: برش عرضی از سطح مقطع PCF با حفره‌های هوا به شکل شش ضلعی در بستر سیلیکای دوپ شده با آرایش شبکه مثلثی با ثابت شبکه  $\Lambda = 3/26 \mu m$ ، قطر هسته  $d = 1/47 \mu m$ . حفره‌های آبی رنگ نشان دهنده وجود سیال در آنها می‌باشد.

اثر تزریق سیال نوری به درون حفره‌های اطراف هسته مرکزی و نیز تغییر ابعاد هسته بر روی مشخصه پاشندگی و مساحت توزیع مد فیبر را بررسی می‌کنیم. حفره‌های نزدیک به هسته‌ها در مشخصه‌های فیبر موثر می‌باشند که دلیل آن هم در این است که میدان مدهای هدایت شده دقیقاً در قسمت مرکزی فیبر واقع شدند و تأثیر بسزایی بر

حفره‌های نزدیک به هسته‌ها دارند [۱۰]. بنابراین تزریق سیال را فقط برای حفره‌های نزدیک به هسته‌ها داریم که در شکل ۱ (ج) و (د) این مسئله به وضوح دیده می‌شود. تغییر ضریب شکست سیال تزریق شده به حفره‌های هوای اطراف هفت هسته باعث تغییر در خصوصیات PCF شده است. بدین صورت که با افزایش ضریب شکست منحنی پاشندگی در بازه‌ی طول موج ۹۰۰-۱۳۰۰ nm کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. شکل (۲) نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضریب شکست ۱/۳ منحنی پاشندگی تخت تری به ما می‌دهد به عبارت دیگر تغییرات پاشندگی کمتر و در نتیجه پهن‌شدگی پالس کمتر خواهد بود. بدین ترتیب با انتخاب سیال با ضریب شکست ۱/۳ و تزریق آن در سه ردیف اول از حفره‌های هوا، PCF با پاشندگی تخت حاصل می‌شود. و از این طریق، ساختار فیبر بلور فوتونی هفت هسته‌ای با پاشندگی تخت و ناچیز با استفاده از تزریق سیال نوری طراحی شد.

شکل (۳) مساحت توزیع مد را برای ساختارهای مختلفی که در شکل (۱) نشان داده شد را به نمایش می‌گذارد. همانطور که از شکل مشخص است در حالتی که هسته‌ها با حذف هفت حفره تشکیل شده‌اند مساحت توزیع مد بزرگتر می‌باشد. که مقدار عددی آن نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. در فیبرهای بلور فوتونی متداول پاشندگی منفی بزرگ با  $A_{eff}$  بسیار کوچک مرتبط است، که منجر به آثار غیرخطی ناخواسته در حین انتقال سیگنال نوری می‌شود. مزیت فیبر چند هسته‌ای استفاده شده در این مقاله  $A_{eff}$  بزرگ آن می‌باشد.

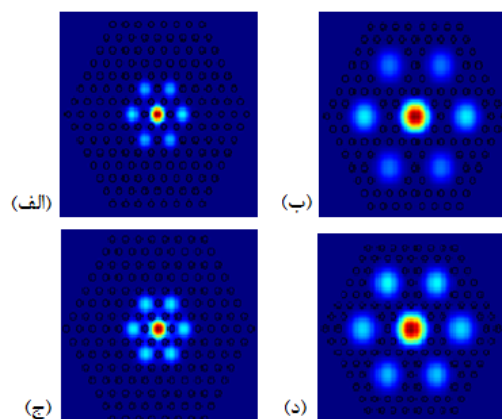


شکل ۲: منحنی پاشندگی PCF نسبت به تغییر ضریب شکست حفره‌های هوا

هسته‌ای از روش تزریق سیال نوری استفاده کردیم که مزیت این روش نسبت به روش‌های قبل این است که به سادگی با تغییر سیال تزریقی می‌توان خصوصیات PCF را بهبود داد و نیازی به ساخت دوباره PCF و تغییر هندسه آن که کاری بسیار دشوار و هزینه بر است نمی‌باشد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که فیبر هفت هسته‌ای که هسته‌های آن با حذف یک حفره هوا بوجود آمده و نیز سیال با ضریب شکست  $1/3$  به درون حفره‌های اطراف هسته‌های آن تزریق شده پاشندگی بهتری دارد. بنابراین با استفاده از فیبر بلور فوتونی هفت‌هسته‌ای پر شده با سیال نوری می‌توان به سادگی پارامتر پاشندگی را مهندسی و میزان آن را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

### مراجع

- [1] R. Tkach, A. Chraplyvy, F. Forghieri, A. Gnauck, and R. Derosier, "Four-photon mixing and high-speed WDM systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 13, pp. 841-849, 1995.
- [2] T. Kato, M. Hirano, A. Tada, K. Fukuada, T. Fujii, T. Ooishi, Y. Yokoyama, M. Yoshida, and M. Onishi, "Dispersion flattened transmission line consisting of wide-band non-zero dispersion shifted fiber and dispersion compensating fiber module," *Optical Fiber Technology*, vol. 8, pp. 231-239, 2002.
- [3] G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics," in *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*, ed: Springer, 2000, pp. 195-211.
- [4] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems* vol. 222: John Wiley & Sons, 2012.
- [5] Z. Cheng, H.-K. Zhang, S. Peng, W. Jing, and L. Xin, "Design and optimization of a multi-cores photonic crystal fiber for spatial flat in-phase supermode laser output," *Optical Fiber Technology*, vol. 21, pp. 160-163, 2015.
- [6] F. Intonti, S. Vignolini, V. Türck, M. Colocci, P. Bettotti, L. Pavesi, S. L. Schweizer, R. Wehrspohn, and D. Wiersma, "Rewritable photonic circuits," *Applied physics letters*, vol. 89, p. 211117, 2006.
- [7] M. Ebnali-Heidari, H. Saghaei, F. Koohi-Kamali, M. Naser Moghadasi, and M. K. Moravvej-Farshi, "Proposal for supercontinuum generation by optofluidic infiltrated photonic crystal fibers," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 20, pp. 582-589, 2014.
- [8] N. Janrao and V. Janyani, "Ultra compact slow light photonic crystal directional coupler design with elliptical rods," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, pp. 3120-3124, 2013.
- [9] M. M. Vogel, M. Abdou-Ahmed, A. Voss, and T. Graf, "Very-large-mode-area, single-mode multicore fiber," *Optics letters*, vol. 34, pp. 2876-2878, 2009.
- [10] D. Erickson, T. Rockwood, T. Emery, A. Scherer, and D. Psaltis, "Nanofluidic tuning of photonic crystal circuits," in *Integrated Optoelectronic Devices 2007*, 2007, pp. 647513-647513-11.

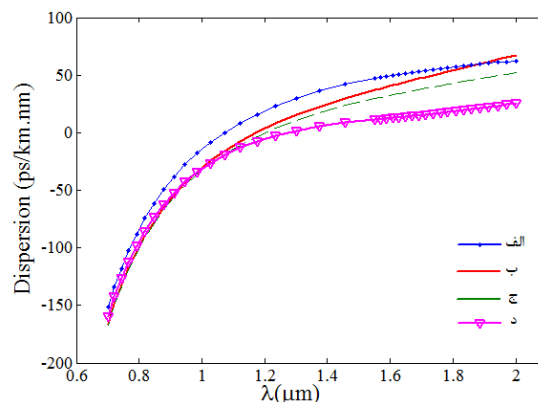


شکل ۳: پروفایل مساحت توزیع مد ساختارهای متفاوت فیبر بلور فوتونی هفت هسته‌ای نشان داده شده در شکل (۱)

جدول ۱: مقدار عددی مساحت توزیع مد در ساختارهای متفاوت فیبر

بلور فوتونی هفت هسته‌ای

نوع فیبر	مقدار مساحت توزیع مد ( $\mu\text{m}^2$ )
الف	۹۱/۶۴۲
ب	۲۴۵/۱۴۲
ج	۱۳۲/۹۶۶
د	۳۲۲



شکل ۴: منحنی پاشندگی ساختارهای متفاوت از PCF با تغییر ابعاد حفره و نیز تزریق سیال

با توجه به شکل (۴) ملاحظه می‌شود که فیبر بلور فوتونی هفت هسته‌ای که هسته‌های آن با حذف یک حفره هوا تشکیل شده و نیز سیال نوری تزریق شده است میزان پاشندگی آن در طول موج مخابراتی  $1/55 \mu\text{m}$  از  $50 \text{ ps/km.nm}$  به حدود  $1 \text{ ps/km.nm}$  کاهش یافته است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای کنترل پاشندگی فیبر بلور فوتونی هفت