



تحلیل اثر پارامترهای شعاع خمش، فاصله حفره‌های هوا و طول موج بر ضریب شکست مؤثر فیبر کریستال فوتونی خمیده

لیلا چهره‌قانی انزابی^{۱*}، فرامرز اسمعیلی سراجی^{۲*} و فرزاد توکل همدانی^{۳*}

^۱ گروه برق دانشگاه سمنان، ^۲ گروه نوری مرکز تحقیقات مخابرات ایران

چکیده - در این مقاله با روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، فیبر کریستال فوتونی خمیده را با فیبر ضریب پله‌ای با شرایط خمش در مختصات کارتزین مدل سازی کرده‌ایم. مشخصات انتشاری فیبر کریستال فوتونی در این شرایط بررسی شد. در ابتدا وابستگی طول موجی ضریب شکست غلاف و ضریب شکست مؤثر محاسبه و سپس ضریب شکست مؤثر را در یک PCF خمیده با شعاع خمش‌های متفاوت در محدوده شعاع خمش بحرانی و تلفات کمینه، محاسبه کرده‌ایم. نقاطی که در آن ضریب شکست خمشی PCF مستقل از شعاع خمش بوده را محاسبه و برون‌یابی شده است.

کلید واژه- روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، فیبر کریستال فوتونی خمیده، ضریب شکست مؤثر خمشی، شعاع بزرگ خمش بحرانی

کد PACS - ۵۲۹۵، ۰۶۰، ۲۳۱۰، ۰۶۰

۱- مقدمه

مؤثر اسکالر بهینه^۲ تعیین مقدار شدند.

در یک فیبر ناخمیده انتشار پالس نوری تحت یک زاویه بحرانی به واسطه بازتابش داخلی انجام می‌شود. در فیبر خمیده مقدار این زاویه بحرانی افزایش می‌یابد [۴].

برای اولین بار با تحلیل ارایه شده، پارامترهایی از PCF را تعیین کرده‌ایم که باعث تغییر در ضریب شکست خمشی نمی‌شوند.

۲- فیبر کریستال فوتونی ناخمیده

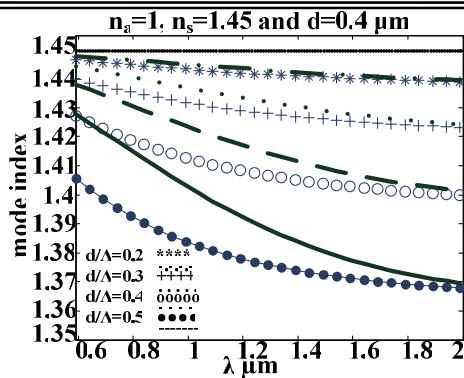
فیبر کریستال فوتونی شامل مغزی و غلاف با ضریب شکست‌های $n_{co}=n_s$ و n_{cl} در شکل (۱) نشان داده شده است. با دانستن n_{cl} و n_{co} ضریب مدی مد هدایت شده n_{eff} فیبر کریستال فوتونی معادل فیبر SMF به دست می‌آید [۵].

فیبر کریستال فوتونی^۱، فیبر نوری است که از سیلیکای بدون ناخالصی ساخته شده است [۱]. عملکرد موجبری آن‌ها توسط الگوی حفره‌های هوای توزیع شده در ناحیه غلاف تامین می‌شود و این حفره‌ها در امتداد طول فیبر کشیده شده‌اند. آرایش حفره‌های هوا ممکن است نتیجه دو نوع متفاوت از اصل هدایت نور باشد: هدایت توسط بازتابش داخلی کلی اصلاح شده^۲ و اثر شکاف باند فوتونی. M-TIR مشابه با بازتابش داخلی کلی شناخته شده در فیبرهای استاندارد است [۲]. امروزه فیبرهای کریستال فوتونی که توسط M-TIR عمل می‌کنند به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، زیرا نیاز به دقت کم‌تری در فرایند ساخت آن‌ها وجود دارد [۳]. در این مقاله شعاع خمشی PCF و ضریب شکست مؤثر ناشی از خمش با روش ضریب

* ch_ghani@semnan.ac.ir, feseraji@itrc.ac.ir, farzadtavakkol@gmail.com

1 Photonic Crystal Fiber: PCF

2 Modified-total Internal Reflection: M-TIR



شکل ۲: ضریب شکست‌های غلاف و مؤثر برای ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵. $d=0.4 \mu m$ ، $d/\Lambda=0.2$.

در فیبر PCF با ضریب پله‌ای، $\rho \approx \Lambda - d/2$ بیانگر شعاع مغزی مؤثر بهینه است و در مقایسه با شعاع مغزی ثابت $\rho \approx 0.64\Lambda$ که در روش ضریب مؤثر اسکالر^۴ معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد، دقت بالاتری در محاسبات دارد [۶] و [۹].

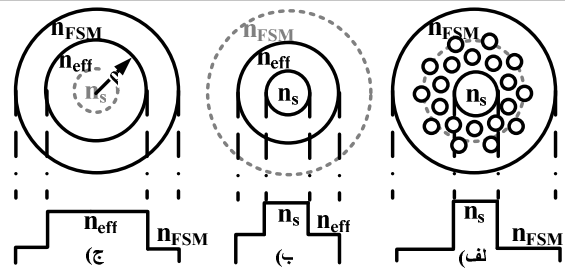
۳- محاسبه ضریب شکست مؤثر در فیبر خمیده

فیبر خمیده را می‌توان با یک فیبر ناخمیده با مشخصه ضریب شکستی معادل جایگزین کرد. مشخصه ضریب شکستی معادل توسط معادله موج اسکالر بر حسب سیستم مختصات کارتزین محلی در ناحیه انحنا فیبر به دست می‌آید. اگر فیبری برای مثال در جهت y خم شود، می‌تواند توسط یک فیبر ناخمیده با توزیع ضریب شکست مؤثر به صورت رابطه زیر نمایش داده شود [۸].

$$n_{bent(x,y)} = n_{(x,y)} \sqrt{1 + \frac{2y}{r_{bent}}} \quad (2)$$

که در آن شعاع انحنا فیبر است و باید در محدوده شعاع بزرگ‌خمش بحرانی R_c باشد تا افزایش تلفات به دلیل وجود بزرگ‌خمش اتفاق نیافتد. $n_{(x,y)}$ مشخصه ضریب شکست فیبر ناخمیده است.

در شکل (۳) فیبر PCF در صفحه $y-z$ خم شده و انتشار در جهت z است.



شکل ۱: سطح مقطع‌های فیبر کریستال فوتونی و تقریب پله‌ای آن‌ها.

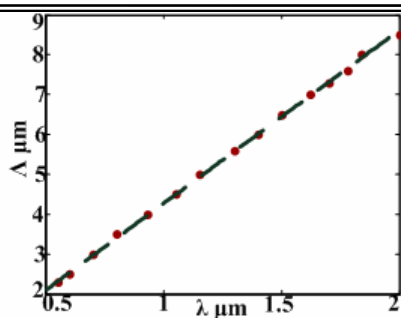
مفهوم ضریب شکست مؤثر و تفاوت آن با ضریب شکست غلاف و مغزی با توجه به شکل (۱) می‌تواند بهتر درک شود.

در شکل (۱ الف) سطح مقطع یک فیبر کریستال فوتونی که دارای یک مغزی جامد و حفره‌های هوا است نشان داده شده است. برای تعیین ویژگی‌های یک PCF با روش ضریب مؤثر، به دلیل پیچیدگی و دشواری حل مستقیم ساختار PCF، یک ضریب شکست مؤثر در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه پارامترهای موجبری U_{eff} و W_{eff} به ترتیب در ناحیه مغزی (شکل ۱ ب) و غلاف (شکل ۱ ج)، دو ناحیه با ضریب شکست‌های n_s و n_{eff} و دو ناحیه با ضریب شکست‌های n_{cl} و n_{eff} را خواهیم داشت که در آن U_{eff} و W_{eff} مطابق رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} U_{eff} &= k \cdot \rho \sqrt{n_s^2 - n_{eff}^2} \\ W_{eff} &= k \cdot \rho \sqrt{n_{eff}^2 - n_{cl}^2} \end{aligned} \quad (1)$$

ضریب شکست غلاف، n_{cl} در شکل (۲) بر حسب طول موج با علامت‌های $+$ ، 0 ، \bullet و \circ با n_{eff} با خط چین نشان داده شده است. این منحنی‌ها برای $d=0.4 \mu m$ و $d/\Lambda=0.3$ ، 0.4 ، 0.5 است. این منحنی‌ها ترسیم شده‌اند. برای $d/\Lambda=0.5$ که تعداد حفره‌ها بیش‌تر است تفاضل ضریب شکست بین مغزی و غلاف افزایش یافته است. اختلاف ضریب شکست‌های مؤثر و غلاف با افزایش طول موج کاهش می‌یابد، به طوری که در طول موج‌های بالا این اختلاف به صفر می‌رسد. مقدار n_{eff} حاصل مطابق شکل (۲) بین ضریب شکست مغزی و ضریب شکست غلاف قرار دارد.

⁴ Scalar Effective Index Method: SEIM



شکل ۵: مکان هندسی نقاط با شعاع خمش یکسان برای مقدار Λ مختلف که در آن d/Λ ثابت است.

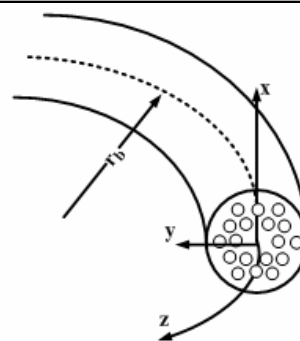
شکل (۵) مکان هندسی نقاطی است که در آن Λ با طول موج رابطه خطی دارد و شعاع خمش بر روی آن برای مقدارهای مختلف d/Λ دارای مقدار ثابت در طول موج‌های مختلف است.

مکان هندسی به دست آمده در شکل (۵) را می‌توان با رابطه زیر برازش کرد:

$$\Lambda = 4/34\lambda - 0.06 \quad (4)$$

منحنی‌های $n_{eff,bent}$ بر حسب y در شکل (۶) ترسیم شده‌اند. برای محاسبه ضریب شکست خمشی از دو مقدار $\Lambda = 7/6 \mu m$ و $3, 2/5, 2, d = 4$ و $\Lambda = 4, 1/8, 1/5, d = 1/2$ استفاده کرده‌ایم.

برای $y=0$ در شکل (۶)، وقتی هیچ خمشی در فیبر وجود ندارد یعنی $R_c = \infty$ ، ضریب شکست مؤثر بزرگ خمش برابر با ضریب شکست مؤثر فیبر ناخمیده است. در فیبر خمیده مد به بیرون مغزی در جهت خارج خمش، گسترده می‌شود. از آن جایی که شیب منحنی‌های ضریب شکست متناسب با شدت خمش است، واضح است که مد در شعاع خمش کوچک‌تر بیشتر مختل می‌شود و بیشتر به داخل غلاف کشیده می‌شود.

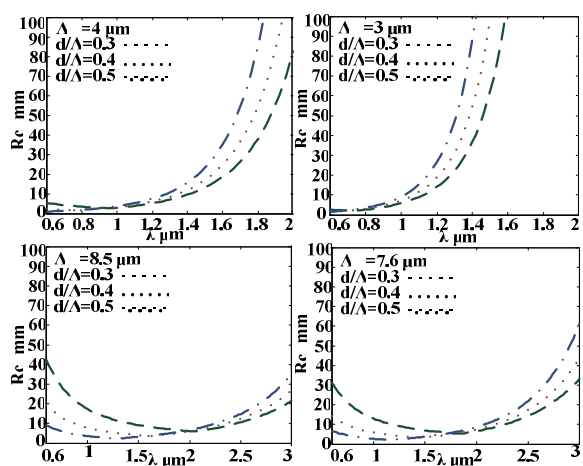


شکل ۳: انتشار مد فیبر کریستال فوتونی خمیده در جهت z با شعاع خمش R_{bent} در جهت y .

شعاع خمش بحرانی R_c در فیبر خمیده توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۷]:

$$R_c \approx \sqrt{\beta^r - \beta_{cl}^r} / (\beta - \beta_{cl})^r \quad (3)$$

شعاع بزرگ خمش بحرانی برای چند ساختار متفاوت PCF با مقدارهای $\Lambda = 3, 4, 7/6, 8/5 \mu m$ و $d/\Lambda = 0/3, 0/4, 0/5$ در شکل (۴) ترسیم شده است. با توجه به این شکل کوچک-ترین شعاع خمش که به ازای آن کمینه تلفات وجود دارد با افزایش Λ از طول موج $0/6$ میکرون به $1/5$ میکرون جابه‌جا می‌شود. مطابق شکل (۴) در هر Λ ثابت به ازای مقدارهای d/Λ مختلف در طول موج خاصی می‌توان شعاع خمش یکسانی داشت.

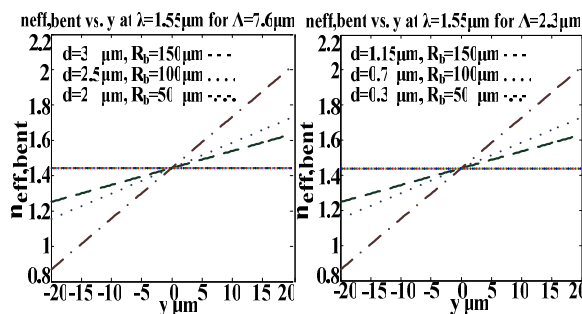


شکل ۴: شعاع بزرگ خمش بحرانی برای چند ساختار مختلف PCF با $d/\Lambda = 0/2, 0/3, 0/4, \Lambda = 3, 4, 7/6, 8/5 \mu m$.

دارد که در آن اثرات خمشی هیچ تغییری در مقدار ضریب شکست مؤثر ایجاد نمی‌کند. برای مقادیر مختلف Λ این وضعیت در نقاط مختلف در سطح مقطع فیبر تغییراتی را نشان می‌دهد که می‌توان با رابطه چند جمله‌ای زیر نشان داد:

$$\Lambda = -0.000018y^6 - 0.00012y^5 - 0.0032y^4 - 0.0416y^3 - 0.225y^2 + 0.211y + 7/87 \quad (5)$$

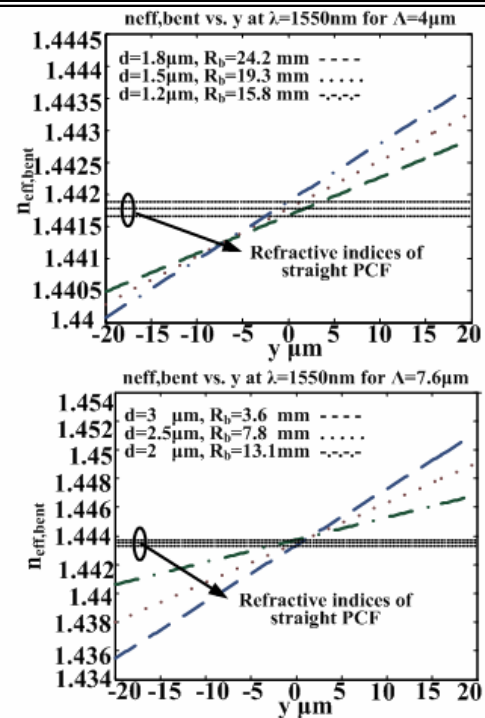
در شکل (۷) رابطه (۵) برحسب y برای طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ترسیم شده است که بر روی محور فیبر مقدار Λ بیشینه است.



شکل ۸: ضریب شکست مؤثر در یک فیبر خمیده با شعاع خمش حدود میکرومتر در جهت y برای چند d/Λ مختلف در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر.

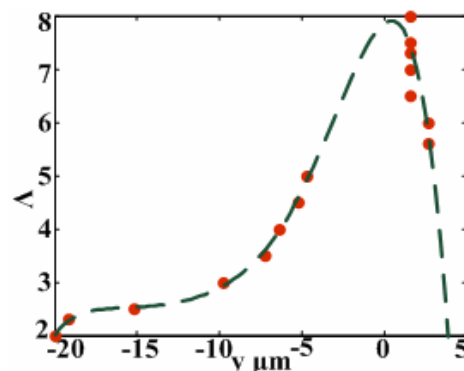
در شکل (۸) نمودار ضریب شکست مؤثر خمشی برحسب y برای $\Lambda=2/3, 7/6$ و شعاع خمش $\Gamma_{bent}=50, 100, 150 \mu\text{m}$ ترسیم شده است. با افزایش Λ تغییری در ضریب شکست خمشی PCF ایجاد نمی‌شود.

در مقایسه، بازه تغییرات ضریب شکست مؤثر خمشی با تغییر در Λ در شکل (۸) بیش‌تر از تغییرات در شکل (۶) است.



شکل ۶: ضریب شکست مؤثر در یک فیبر خمیده PCF با شعاع خمش در حد میلی‌متر در جهت y برای چند d/Λ مختلف در دو طول موج ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر.

با توجه به نمودارهای شکل (۶) و جهت خمیده شدن فیبر کریستال فوتونی شکل (۵)، باید در راستای y منفی که چگالی فیبر رقیق‌تر است $n_{\text{eff,bent}}$ کاهش یابد و در y مثبت که چگالی فیبر متراکم‌تر می‌شود انتظار می‌رود که $n_{\text{eff,bent}}$ افزایش یابد، این وضعیت در شکل (۶) برای رابطه (۲) مشاهده می‌شود. منحنی‌ها در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ترسیم شده‌اند. خط‌های افقی ضریب شکست مؤثر PCF ناخمیده را نشان می‌دهند.



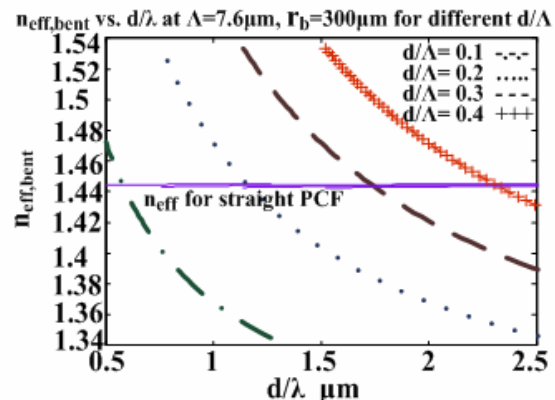
شکل ۷: مکان هندسی نقاطی که به ازای شعاع خمشی‌های متفاوت در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ضریب شکست مؤثر خمشی یکسان است.

همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود یک نقطه وجود

میلی‌متری، 0.17 است. با کاهش مقدار Λ به $4\mu\text{m}$ تفاضل ضریب شکست خمشی به مقدار 0.0375 کاهش یافته است. تفاضل ضریب شکست خمشی شعاع میکرونی برابر با $1/2$ به دست آمده است.

مراجع

- [1] R. Buczynski, "Photonic crystal fibers", *ACTA Physica Polonica*, Vol. 106, No. 2, pp.141-167, 2004.
- [2] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou, and A. Bjarklev, "Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides", *Opt. Fiber Technol.*, 5, pp.305-330, 1999.
- [3] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, S.E. Barkou Libori, "Macro-bending loss properties of photonic crystal fibre", *Electron. Lett.*, Vol. 37, No. 5, 2001.
- [4] S.C. Gupta, *Textbook on optical fiber communication and its application*, ISBN 81-203-2499-4, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 2004.
- [5] S. K. Varashney, M. P. Singh, R. K. Sinha, "Propagation characteristics of photonic crystal fibers", *J. Opt. Commun.*, Vol. 24, No.5, pp. 192-198, 2003.
- [6] R.K. Sinha, Varishney, "Dispersion properties of photonic crystal fiber comparison by scalar and fully vectorial effective index methods", *Opt. Quant. Electron.*, DOI 10.1007/s11082-005-3196-7, pp. 711-722, 2005.
- [7] Niels Asger, Mortensen, Jacob Riis Folkenberg, "Low-loss criterion and effective area considerations for photonic crystal fibres", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, Vol. 5, 2003.
- [8] J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, V. Finazzi, D. J. Richardson, "Understanding bending losses in holey optical fibers", *Opt. Commun.*, Vol. 227, pp. 317-335, 2003.
- [9] F.E. Seraji, M.Rashidi, V.Khasheie, "Parameter analysis of a photonic crystal fiber with raised-core index profile based on effective index method", *Chinese Opt. Lett.*, Vol. 4, No. 8, 2006.



شکل ۹: ضریب شکست مؤثر فیبر PCF خمیده و ناخمیده برحسب d/Λ برای چند d/Λ متفاوت در شعاع خم 300 میکرون.

در شکل (۹) ضریب شکست مؤثر خمشی برحسب d/Λ ترسیم شده است. این منحنی‌ها برای $\Lambda = 7/6 \mu\text{m}$ و در شعاع خم 300 میکرون برای چند d/Λ متفاوت در بازه طول موجی 500 تا 2500 نانومتر با رفتاری نزولی ترسیم شده است. خط‌های افقی ضریب شکست مؤثر فیبر کریستال فوتونی ناخمیده را نشان می‌دهد. با افزایش قطر حفره‌ها یعنی برای مقدارهای مختلف d/Λ ، مقدار $n_{\text{eff,bent}}$ در طول موج‌های بالاتر مقدار بیش‌تری خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، شعاع بزرگ خمش بحرانی برحسب طول موج برای مقدارهای مختلف Λ فیبر کریستال فوتونی ترسیم شده و فرکانس‌هایی را یافتیم که در آن‌ها شعاع خم به مقدار d/Λ بستگی ندارد. همچنین ضریب شکست مؤثر در یک PCF ناخمیده و خمیده به دست آمده و منحنی‌های آن برحسب شعاع فیبر، طول موج و d/Λ ترسیم شده است.

در تحلیل شعاع خمش بحرانی نشان داده شد مکان هندسی نقاطی که در آن Λ با طول موج رابطه خطی دارد، شعاع خمش بر روی آن برای مقدارهای مختلف d/Λ دارای مقدار ثابت در طول موج‌های مختلف است. همچنین در تحلیل ضریب شکست مؤثر خمشی نشان داده شد که مجموعه نقطه‌هایی در سطح PCF وجود دارد که در آن‌ها اثرات خمشی هیچ تغییری در مقدار ضریب شکست مؤثر خمشی در فیبر کریستال فوتونی ایجاد نمی‌کند.

تفاضل ضریب شکست خمشی با $\Lambda = 7/6 \mu\text{m}$ در شعاع خم