



تحلیل پاشش رنگی فیبر کریستال فوتونی با خمش‌های ریز

لیلا چهره‌قانی انزایی^{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 تحلیلی ضریب مؤثر اسکالر بهینه ابتدا ضریب شکست مؤثر فیبر کریستال فوتونی ناخمیده و خمیده محاسبه شده است و سپس پارامترهای انتشاری نظیر پاشش را در فیبر کریستال فوتونی خمیده و ناخمیده برای طراحی‌های مختلف PCF تعیین کرده‌ایم. پاشش رنگی را بر حسب طول موج نور انتشاری در PCF خمیده با تغییر پارامترهای اثرگذار نظیر شعاع‌های مختلف انحنای در حد میلی‌متر و میکرومتر، A و d در مقدار پاشش PCF به دست آورده‌ایم و نتایج را با پاشش رنگی PCF ناخمیده مقایسه کرده‌ایم.

کلید واژه- پاشش رنگی، روش ضریب مؤثر اسکالر بهینه، ضریب شکست مؤثر خمشی، فیبر کریستال فوتونی خمیده

کد PACS - ۱۳۰/۲۰۳۵، ۰۶۰/۵۲۹۵، ۰۶۰/۲۳۳۰

۱- مقدمه

در این مقاله تحلیل مشخصات پاشش رنگی را در دو حالت فیبر PCF ناخمیده و خمیده با روش تحلیلی ضریب مؤثر اسکالر بهینه^۵ ارائه می‌دهیم. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها ساده‌تر است.

در چند سال اخیر کارهای زیادی در مورد فیبر کریستال فوتونی^۱ و ویژگی‌های نوری غیرمعمول آن‌ها، انجام شده است. یکی از این ویژگی‌ها پاشش منفی بسیار بالا آن‌ها است [۱ و ۲].

۲- مدل سازی مسئله

فیبر کریستال فوتونی در جهت عرضی مطابق شکل (۱) تناوبی است و انتشار مدهای پرکننده فضا^۶ در جهت طولی صورت می‌گیرد. در روش MSEIM^۵ غلاف فیبر کریستال فوتونی توسط یک ماده با ضریب شکستی مساوی با ضریب شکست مد اصلی پرکننده فضا^۷ جایگزین می‌شود. ضریب شکست مؤثر FSFM با حل معادله موج اسکالر در یک سلول واحد کریستال فوتونی مطابق شکل (۲) که مرکز آن در مرکز حفره‌ها قرار دارد، محاسبه می‌شود. برای تحلیل دقیق‌تر فیبر کریستال فوتونی، از شعاع مغزی مؤثر بهینه شده استفاده می‌کنیم یعنی ρ علاوه بر Λ به قطر حفره‌های هوا^۸ با رابطه $\rho_{eff} = \Lambda - \frac{d}{2}$ وابسته است. این شعاع مغزی مؤثر بهینه، در مدل فیبر PCF با تقریب پله‌ای است. این شعاع مغزی در مقایسه با شعاع مغزی ثابت $\rho \approx 0.64 \times \Lambda$ که در روش ضریب مؤثر معمولی مورد استفاده قرار

در مورد پاشش فیبرهای کریستال فوتونی خمیده تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. پاشش گونه‌ای از فیبرهای کریستال فوتونی با مغزی آلاییده به ژرمانیوم^۲ در شرایط خمیده مورد بررسی قرار گرفت [۳]. در این مرجع اثر کوچک‌ترین شعاع خمش بر پاشش در نظر گرفته شد و نشان داده شد که هرگاه HAF با شعاع ۵ میلی‌متر خمیده شود پاشش رنگی در آن افزایش می‌یابد. برای محاسبه پاشش رنگی در فیبر HAF از روش اجزای محدود برداری^۳ استفاده شد [۳].

پاشش سرعت گروهی^۴ یک ویژگی مهم فیبرنوری برای کاربردهای بسیاری در شبکه‌های نوری است و یک عامل محدود کننده پهنای باند سیستم‌های مخابرات نوری است [۴].

⁵ Modified Scalar Effective Index Method: MSEIM

⁶ Space Filling Modes: SFM

⁷ Fundamental Space Filling Mode: FSFM

¹ فاصله بین مراکز حفره‌های هوا

⁸ قطر حفره‌های هوا: d

* ch_ghani@semnan.ac.ir, fesaraji@itrc.ac.ir,

farzadtavakkol@gmail.com

¹ Photonic Crystal Fiber: PCF

² Hole Assisted Fiber: HAF

³ Full vectorial finite element method: VFEM

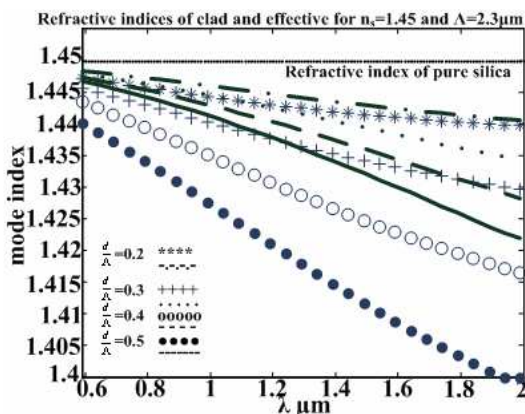
⁴ Group Velocity Dispersion: GVD

زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{\text{eff}} \frac{J_1(U_{\text{eff}})}{J_0(U_{\text{eff}})} = W_{\text{eff}} \frac{K_1(W_{\text{eff}})}{K_0(W_{\text{eff}})} \quad (3)$$

با حل عددی رابطه (۳) می‌توان مقدار ضریب شکست مؤثر را در یک فیبر کریستال فوتونی مستقیم به‌دست آورد و سپس $n_{\text{eff,bent}}$ را محاسبه کرد [۷].

در شکل (۳) ضریب شکست‌های غلاف و مؤثر برای $\Lambda = 2/3 \mu\text{m}$ به ترتیب به‌صورت خط‌های پر و خط چین ترسیم شده‌اند. نتایج به‌دست آمده با مرجع [۵] مطابقت دارد. این مقدار Λ مناسب‌ترین مقداری است که تاکنون گزارش شده است [۵ و ۸]. این منحنی‌ها برای $0/40$ ، $0/5$ ، $0/3$ ، $d/\Lambda = 0/2$ ، $0/3$ ، افزایش قطر حفره‌ها تفاضل ضریب شکست بین غلاف و مغزی و نیز ضریب شکست مؤثر و مغزی افزایش می‌یابد.



شکل ۳: ضریب شکست‌های غلاف و مؤثر برای $0/40$ ، $0/5$ ، $0/3$ ، $d/\Lambda = 0/2$ ، $\Lambda = 2/3 \mu\text{m}$.

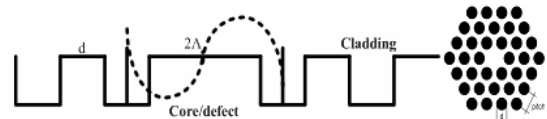
با استفاده از نتایج به‌دست آمده در شکل (۳) پاشش رنگی^۱ در فیبر کریستال فوتونی با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$D = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d \lambda^2} \quad (4)$$

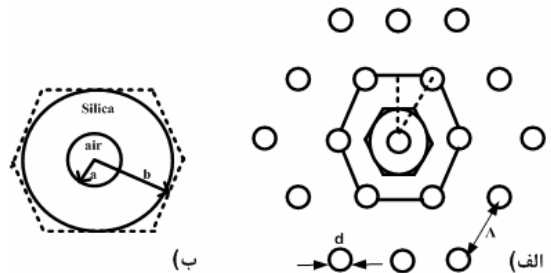
که در آن n_{eff} ضریب شکست مؤثر مد هدایت‌شده و λ طول موج فضای آزاد است.

با توجه به رابطه (۴) فیبر کریستال فوتونی می‌تواند دارای پاشش منفی با مقدارهای بسیار بالایی باشد که برای جبران‌سازی پاشش مورد استفاده قرار گیرد [۹]. در رابطه (۴) برای محاسبه پاشش فیبر کریستال فوتونی خمیده، به

می‌گیرد، دقت بالاتری را در محاسبات داراست [۵ و ۶].



شکل ۱: سطح مقطع یک فیبر کریستال فوتونی که در آن شعاع مغزی برابر با $\rho_{\text{eff}} \approx \Lambda - \frac{d}{2}$ است [۶].



شکل ۲: الف) سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی (ب) سلول واحد شش ضلعی غلاف کریستال فوتونی [۵].

معادله ویژه مقداری با اعمال شرایط مرزی به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$BJ_1(u) + CY_1(u) = 0 \quad (1)$$

پارامترهای U, W, u و با رابطه‌های زیر بیان می‌شوند:

$$U = k_0 a \sqrt{n_s^2 - n_{cl}^2}$$

$$W = k_0 a \sqrt{n_{cl}^2 - n_a^2} \quad (2)$$

$$u = k_0 b \sqrt{n_s^2 - n_{cl}^2}$$

که در آن $b = \sqrt{\frac{3}{2\pi}}$ شعاع دایره خارجی است که توسط تساوی کسر پر شده سلول واحد شش ضلعی و تقریب دایروی مطابق شکل (۲) تعیین می‌شود و a شعاع حفره هوا است. با حل عددی معادله (۱) مقدار n_{cl} را می‌توان محاسبه کرد.

۳- محاسبه پاشش رنگی

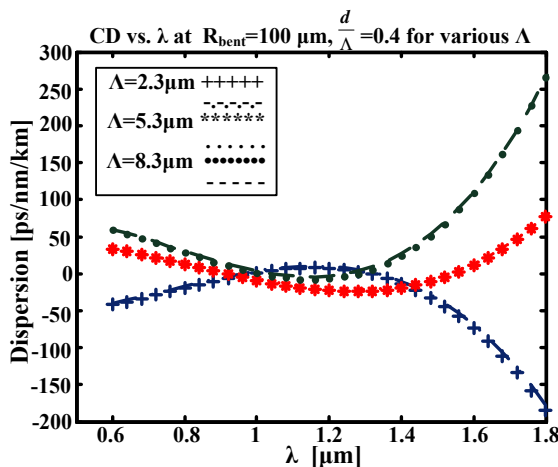
در فیبر کریستال فوتونی با دانستن ضریب شکست‌های مغزی و غلاف، ثابت انتشار و بنابراین ضریب مدی مد هدایت شده n_{eff} فیبر کریستال فوتونی مشابه با فیبر SMF با ضریب شکست مغزی n_{co} با شعاع مغزی ρ و ضریب شکست غلاف n_{cl} به‌دست می‌آید. معادله ویژه مقداری فیبر کریستال فوتونی به استثنای پارامترهای موجبری، مشابه معادله ویژه مقداری فیبر با ضریب پلهای SMF است. معادله مشخصه تقریب پلهای فیبر کریستال فوتونی به‌صورت رابطه

^۱ Chromatic Dispersion: CD



منحنی‌های پاشش برای ساختار فیبر کریستال فوتونی با $\Lambda=7/6\mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0/4$ ، برحسب طول موج برای $300\mu\text{m}$ $R_{\text{bent}}=\infty$ ، 1cm ، 1mm ، در شکل (۶) ترسیم شده‌اند. در شعاع خمش بزرگ نظیر $R_{\text{bent}}=1\text{cm}$ نمودارهای پاشش فیبر ناخمیده و خمیده تقریباً بر روی هم قرار می‌گیرند و با کاهش شعاع خمش منحنی پاشش رنگی PCF خمیده از منحنی PCF ناخمیده فاصله می‌گیرد.

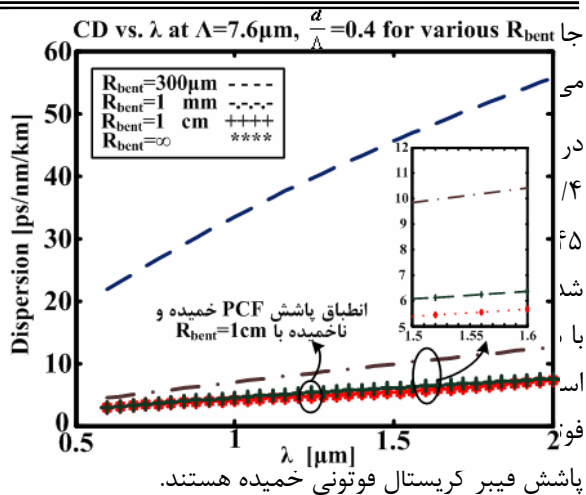
در شکل (۷) پاشش رنگی در بازه طول موجی $2400-600$ میکرون برای فیبرهای کریستال فوتونی ناخمیده و خمیده برای $\Lambda=2/3$ ، $5/3$ ، $8/3\mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0/4$ در شعاع خمش $R_b=100\mu\text{m}$ نشان داده شده است. منحنی‌های خط چین مربوط به فیبر کریستال فوتونی ناخمیده و منحنی‌ها با علامت‌های +، *، • مربوط به فیبر کریستال فوتونی خمیده هستند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای پارامتر Λ کوچک پاشش بیش‌تر در ناحیه مقادیر منفی قرار می‌گیرد و با افزایش Λ ، پاشش رنگی به سمت مقادیر مثبت افزایش می‌یابد.



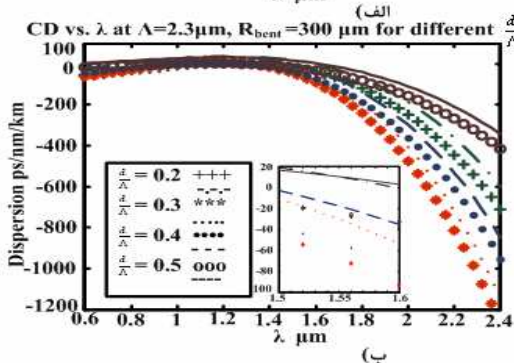
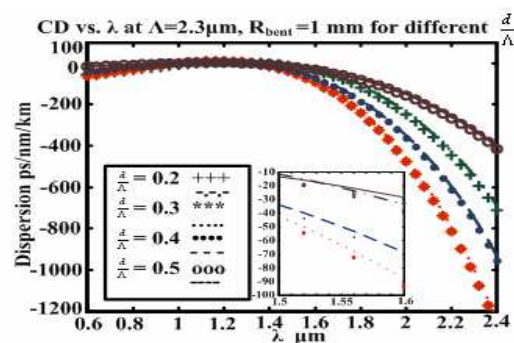
شکل ۷: مقایسه پاشش رنگی برحسب طول موج برای فیبر کریستال فوتونی ناخمیده و خمیده برای مقادیرهای $\Lambda=2/3$ ، $5/3$ ، $8/3\mu\text{m}$ در شعاع خمش 100 میکرون و $d/\Lambda=0/4$.

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش تحلیلی ضریب مؤثر اسکالر بهینه، پاشش رنگی برای PCF ناخمیده و خمیده برحسب طول موج با تغییر پارامترهای اثرگذار در ضریب شکست مؤثر تعیین شده است. منحنی‌های ویژه پاشش برحسب طول موج در $\Lambda=2/3\mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0/2$ ، $0/3$ ، $0/4$ ، $0/5$ برای شعاع خمش



پاشش فیبر کریستال فوتونی خمیده هستند.



شکل ۵: مقایسه پاشش رنگی برحسب طول موج برای فیبر کریستال فوتونی ناخمیده و خمیده با $\Lambda=2/3\mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0/2$ ، $0/3$ ، $0/4$ ، $0/5$ شعاع انحنا $R_{\text{bent}}=300\mu\text{m}$ (الف) شعاع انحنا $R_{\text{bent}}=1\text{mm}$ (ب)

در $\Lambda=2/3\mu\text{m}$ پاشش رنگی، دارای مقادیر منفی بزرگ است که برای جبران سازی پاشش می‌تواند سودمند باشد. با افزایش مقدار d/Λ پاشش به سمت مقادیر مثبت افزایش می‌یابد. همچنین در طول موج‌های بلندتر، پاشش منفی بیش‌تر خواهد شد.

شکل ۶: مقایسه پاشش رنگی برحسب طول موج برای شعاع خمش مختلف $300\mu\text{m}$ ، 1cm ، 1mm ، $R_{\text{bent}}=\infty$ از فیبر کریستال فوتونی خمیده با $d/\Lambda=0/4$ و $\Lambda=7/6\mu\text{m}$



در حد میلی‌متر و میکرون ترسیم شده‌اند و مشاهده شد که اندازه پاشش PCF خمیده نسبت به ناخمیده بیش‌تر شده است. همچنین پاشش برحسب طول موج در $\Lambda=7/6 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0/4$ برای شعاع‌های خمش متفاوت $300 \mu\text{m}$ ، 1mm ، 1cm ، $R_{\text{bent}}=\infty$ ، ترسیم شده و نشان داده که با کاهش شعاع خمش، مقدار پاشش PCF خمیده نسبت به پاشش فیبر کریستال فوتونی ناخمیده مثبت‌تر می‌شود. همچنین نشان داده شد پاشش PCF خمیده برای چند Λ مختلف با افزایش فاصله حفره‌ها، به سمت مقدارهای مثبت می‌رود.

بنابراین استفاده از PCF خمیده با $\Lambda=2/3 \mu\text{m}$ و شعاع میکرونی خمش با برخورداری از پاشش منفی زیاد، برای جبران‌سازی مفید است.

مراجع

- [1] T.A.Birks, J.C.Knight, P.St.J.Russell, "Endlessly single mode Photonic Crystal Fiber", **OSA, Opt. Lett.**, Vol. 22, No. 13, pp. 961-963, 1997.
- [2] T.A. Birks, D. Mogilevtsev, J.C. Knight, P.St.J. Russell, "Dispersion Compensation using Single Material Fibers", **IEEE Photon Tech. Lett.**, Vol. 11, No. 6, p. 674, 1999.
- [3] S.K.Varshney, Y.Tsuchida, K.Sasaki, K.Saitoh, M.Koshiba, "Measurement of chromatic dispersion and Raman gain efficiency of a hole-assisted fibers; influence of bend", **opt. Exp.**, Vol. 15, No. 6, pp. 2974-2980, 2007.
- [4] J. Kim, U.C. Peak, D.Y. Kim, Y. Chung, "Analysis of the Dispersion Properties of Holey Optical Fibers Using Normalized Dispersion", in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest*, Washington DC, 2001.
- [5] Shailendra 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] 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. 1.4, No. 8, pp. 442-445, 2006.
- [7] 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
- [8] R.K. Sinha, Varishney, "Dispersion properties of photonic crystal fiber comparison by scalar and fully vectorial effective index methods", **Optics and Quantum Electronics.**, DOI 10.1007/s11082-005-3196-7, pp. 711-722, 2005.
- [9] A.D.Vareshney, R.K.Sinha, "Propagation Characteristics of Photonic Crystal Fiber Scalar Effective Index Method & Fully Vectorial Effective Index Method", **Adv. Studies Theor. Phys.**, Vol. 1, No. 2, pp. 75-85, 2007.