

تحلیل مشخصات فیبر نوری حفره‌دار با استفاده از روش دیفرانسیل محدود در حوزه فرکانسی

مریم کریمی^۱

۱- استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران،

(دریافت: ۹۷/۰۷/۲۴، پذیرش: ۹۸/۰۲/۱۷)

چکیده: روش دیفرانسیل و المان محدود در محاسبات مشخصات فیبرهای کریستال فوتونی نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. در این مقاله در ابتدا روش دیفرانسیل محدود در بازه فرکانسی برای تعیین مشخصات فیبرهای کریستال فوتونی تشریح شد. مشخصات انتشار در فیبر کریستال فوتونی در یک شبکه سه‌گوش با هشت لایه حفره هوایی محاسبه شد و مشخصات فیبر شامل، ضریب شکست مؤثر، پاشندگی موجبری تعیین شد، سپس با استفاده از قاعده مرکب سیمپسون در انتگرال دو بعدی، مقادیر سطح مقطع مؤثر و همچنین گشودگی عددی با استفاده از نتایج میدان‌های الکتریکی حاصل، برای مقادیر مختلف اندازه حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها تعیین و نتایج آن با هم مقایسه شد. از آنجا که تعیین پاشندگی صفر در مخابرات و به خصوص طراحی جبران‌سازهای پاشش دارای اهمیت است با تعیین پاشندگی رنگی و طول موج پاشندگی صفر در این نوع فیبرها، تأثیر مشخصات حفره‌های هوا در نقطه صفر پاشندگی بررسی شد. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از روش مذکور تأثیر مشخصات حفره‌ها در مشخصات فیبر کریستال از جمله پاشندگی موجبر محاسبه و نشان داده شد با افزایش اندازه حفره‌ها، در یک مقدار ثابت فاصله بین حفره‌ها طول موج پاشندگی صفر کاهش می‌یابد و برای مقدار ثابت اندازه حفره‌ها با افزایش فاصله بین حفره‌ها طول موج پاشندگی صفر در فیبر کریستال فوتونی افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: فیبر کریستال فوتونی، ضریب شکست مؤثر، پاشندگی، سطح مقطع مؤثر، گشودگی عددی، مشخصات حفره‌های هوا.

۱- مقدمه

فیبرهای کریستال فوتونی بر اساس اصول هدایت نور به دو دسته فیبرهای ریزساختار^۴ یا فیبرهای حفره‌دار^۵ و فیبرهای گاف انرژی^۶ تقسیم می‌شوند. در فیبرهای حفره‌دار هدایت نور مشابه فیبرهای نوری معمولی است [۱۰]، که همان انعکاس کلی داخلی نور در فیبر است [۱۱]. بنابراین، کاربردهای مشابه با فیبرهای نوری معمولی دارند. دومین نوع این فیبرها، گاف انرژی هستند که هدایت نور در آن‌ها بر اساس وجود گاف‌های انرژی محدود می‌شود [۱۲]. در شکل (۱) نمونه‌ای از شبکه ساختار فیبر کریستال فوتونی از مقطع عرضی نشان داده شده است. در این شکل d ، قطر حفره‌های هوا، Λ ، فاصله بین حفره‌های است. کسر d/Λ به‌عنوان کسر پرشدگی هوا تعریف می‌شود. شبیه‌سازی‌های عددی نقش مهمی در طراحی و مدل‌سازی ادوات نوری بازی می‌کنند. شبیه‌سازی ادوات نوری برای فیبرهای کریستال فوتونی، باید بر اساس یکی از روش‌های گزارش‌شده تحلیل و بررسی شوند [۱۳]. از مهم‌ترین روش‌های محاسباتی می‌توان به روش المان محدود^۷ [۱۴]، روش دیفرانسیل محدود در

فیبرهای نوری متداول توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای مختلف و متنوع در حوزه ادوات فیبری را ندارد، فیبرهای کریستال فوتونی که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند به‌دلیل ویژگی‌های خاص مانند قابلیت تنظیم مشخصات اصلی فیبر، از قبیل پاشندگی، روزنه عددی^۱، ضریب غیرخطی، ناحیه مدی و همچنین قابلیت کنترل قطبش در این نوع فیبرها برای ساخت ادوات نوری مبتنی بر فیبرهای کریستال فوتونی مناسب هستند [۱]. امروزه از این نوع فیبرها برای ساخت ادوات در حوزه مخابرات نوری، حسگرهای نوری [۲]، فتاوری توان بالا [۳]، فیبرهای کم‌کننده پاشش^۲ [۴]، اندازه‌گیری‌های نوری [۴]، فیلترهای نوری [۵]، و همچنین فیبرهای فعال [۶] مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فیبرها به‌دلیل افزایش آثار غیرخطی در زمینه اپتیک غیرخطی [۷] و تولید پالس فوق پیوستار^۳ و تقویت‌کننده‌های پارامتری نور کاربرد دارند [۸-۹].

^۴ Index-guiding Microstructured Fibers: MF

^۵ Holey Fibers: HF

^۶ Photonic Bandgap Fibers: PBF

^۷ Final Element Method: FEM

* نویسنده پاسخگو: mykarimi@aeoi.org.ir

^۱ Numerical Aperture: NA

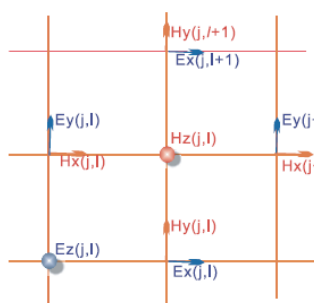
^۲ Dispersion Tailored Fiber

^۳ Super Continuum Generation: SCG

مقدار پاشندگی برای مقدار معین اندازه حفره و فاصله بین حفره‌ها محاسبه شده و میزان خطای محاسباتی تعیین شده و نشان داده شد که روش مذکور نسبت به روش‌های ضریب شکست بالا از دقت بالاتری برخوردار است [۲۸]. که در این مقاله با استفاده از روش دیفرانسیل محدود در بازه فرکانسی، معادلات ماکسول با گسسته‌سازی و شبکه‌بندی حل و مقادیر بردارهای الکترومغناطیسی تعیین و مقدار ثابت انتشار محاسبه شده است. مشخصات این نوع فیبرها شامل سطح مقطع مؤثر، گشودگی عددی و پاشندگی موجبری در فیبر کریستال فوتونی با ساختار شش‌گوش با هشت ردیف حفره برای مقادیر مختلف اندازه حفره و فاصله بین حفره‌ها محاسبه شده است. همچنین با محاسبه و اضافه کردن پاشندگی ماده به پاشندگی موجبری پاشندگی رنگی تعیین شده و طول موج صفر پاشندگی با تغییر هندسه فیبر کریستال فوتونی حاصل شد.

۲- مدل‌سازی فیبر کریستال فوتونی با استفاده از روش دیفرانسیل محدود در بازه فرکانسی

در این روش حل عددی معادلات ماکسول در حوزه فرکانس با مش‌بندی در چهارچوب مختصات دکارتی با شبکه‌ای^۸ انجام می‌شود [۲۸]. نمونه‌ای از شبکه‌ای در مختصات دکارتی در دو بعد در شکل (۲) نمایش داده شده است. دقت این روش محاسباتی به تعداد نقاط شبکه بستگی دارد. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی باید در نقاط شبکه تعیین شود و سایر پارامترها فیبر مانند ثابت انتشار از آن به‌دست می‌آید.

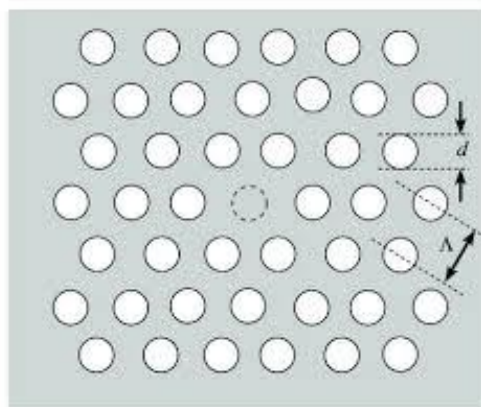


شکل (۲): نمودار شبکه‌ای در دو بعد [۲۸].

در صورتی که بار الکتریکی و جریان در محیط وجود نداشته باشد، تغییرات میدان‌های الکترومغناطیسی به‌صورت زیر خواهد بود [۲۸]:

$$-ik_0 \epsilon_r E_x = \partial H_z / \partial y - i \beta H_y, \quad (الف-۱)$$

بازه فرکانسی و زمانی^۱ [۱۵]، توابع جایگزیده^۲ [۱۶]، روش موج صفحه‌ای^۳ [۱۷] و روش ضریب شکست مؤثر^۴ برداری و اسکالر [۱۸] اشاره کرد. در مطالعات قبلی فیبرهای حفره‌دار موسوم به HALF^۵ [۱۴]، فیبرهای لانه زنبوری و تار عنکبوتی^۶ [۱۹] و فیبرهای کریستال فوتونی دو غلافی با ناحیه مدی بزرگ^۷ [۲۰] با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اگر چه روش المان محدود دارای دقت بالایی در محاسبات مربوط به فیبرهای کریستال فوتونی است، اما نسبت به سایر روش‌ها مانند ضریب شکست مؤثر بسیار زمان‌بر است. روش‌های ضریب شکست مؤثر، روش‌های نسبتاً ساده‌ای هستند که با حل معادله موج یا معادله یک بعدی هلمهولتز می‌تواند با سرعت بالایی مشخصه انتشار پرتو در فیبر کریستال فوتونی را ارائه دهد.



شکل (۱): ساختار شبکه شش‌گوش در فیبر کریستال فوتونی، فاصله بین حفره‌ها Λ و اندازه قطر حفره‌ها d [۲۱].

این روش‌ها علی‌رغم سادگی و سرعت بالا، دقت پایینی دارند و برای محاسبات دقیق‌تر باید از روش‌های گسسته‌سازی استفاده کرد. در مقالات قبل، روش ضریب شکست مؤثر برداری و اسکالر را برای تعیین مشخصات تقویت‌کننده فیبر اربومی مورد مطالعه قرار دادیم [۲۲-۲۴]. همچنین در بازه محدودی از اندازه حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها با روش المان محدود مشخصات فیبر کریستال فوتونی را مورد مطالعه قرار دادیم [۲۳-۲۶]. از روش دیفرانسیل محدود نیز برای تعیین پاشش در این نوع فیبرها استفاده کرده‌ایم [۲۷]. روش دیفرانسیل محدود در بازه زمان برای حل مسائل دینامیکی و ناپایداری زمانی استفاده می‌شود. در کارهای قبل

^۱ Final Deference Method: FDFM & FDTM

^۲ Localized Function Method: LFM

^۳ Plane Wave Method: PWM

^۴ Effective Index Method: EIM

^۵ Hole Assisted Light Guide Fibers: HALFs

^۶ Honeycomb

^۷ Large-Mode Area Double-Cladding: LMA-DC-PCF

^۸ Yee Mesh

$$U_x = \frac{1}{\Delta x} \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1 \\ & & & & -1 \end{bmatrix}, U_y = \frac{1}{\Delta y} \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1 \\ & & & & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(A)

$$V_x = \frac{1}{\Delta x} \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ -1 & 1 & & & \\ & -1 & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1 \\ & & & & -1 \end{bmatrix}, V_y = \frac{1}{\Delta y} \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & -1 & 1 \\ & & & & -1 \end{bmatrix}$$

از آنجا که فیبرهای کریستال فوتونی ادوات متقارنی هستند، معمولاً تعداد گره‌ها در راستای افقی و عمودی یکسان در نظر گرفته می‌شود به عبارت دیگر $m = n$ است. در این روش مقادیر میدان در تمام گره‌ها به‌طور هم‌زمان تعیین می‌شوند. مقادیر ثابت انتشار از معادلات ویژه مقدار میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \{P_{xx}\} & \{P_{xy}\} \\ \{P_{yx}\} & \{P_{yy}\} \end{bmatrix}_{2mn \times 2mn} \begin{bmatrix} \{E_x\} \\ \{E_y\} \end{bmatrix}_{2mn \times 1} = \beta^2 \begin{bmatrix} \{E_x\} \\ \{E_y\} \end{bmatrix}_{2mn \times 1} \quad (9)$$

(10)

$$\begin{bmatrix} \{Q_{xx}\} & \{Q_{xy}\} \\ \{Q_{yx}\} & \{Q_{yy}\} \end{bmatrix}_{2mn \times 2mn} \begin{bmatrix} \{H_x\} \\ \{H_y\} \end{bmatrix}_{2mn \times 1} = \beta^2 \begin{bmatrix} \{H_x\} \\ \{H_y\} \end{bmatrix}_{2mn \times 1}$$

که در آن داریم:

$$\begin{aligned} P_{xx} &= -k_0^2 U_x \varepsilon_r^{-1} V_y V_x U_y + (k_0^2 I + U_x \varepsilon_r^{-1} V_x) (\varepsilon_{rx} + k_0^{-2} V_y U_y), \\ P_{yy} &= -k_0^2 U_y \varepsilon_r^{-1} V_x V_y U_x + (k_0^2 I + U_y \varepsilon_r^{-1} V_y) (\varepsilon_{ry} + k_0^{-2} V_x U_x), \\ P_{xy} &= U_x \varepsilon_r^{-1} V_y (\varepsilon_{ry} + k_0^{-2} V_x U_x) - k_0^{-2} (k_0^2 I + U_x \varepsilon_r^{-1} V_x) V_y U_x, \\ P_{yx} &= U_y \varepsilon_r^{-1} V_x (\varepsilon_{rx} + k_0^{-2} V_y U_y) - k_0^{-2} (k_0^2 I + U_y \varepsilon_r^{-1} V_y) V_x U_y, \end{aligned} \quad (11)$$

با فرض شرایط مرزی صفر $V_x = -U_x^T$, $V_y = -U_y^T$ و داریم:

$$Q_{xx} = P_{yy}^T, Q_{yy} = P_{xx}^T, Q_{xy} = -P_{xy}^T, Q_{yx} = -P_{yx}^T \quad (12)$$

با فرض آن‌که تلفات در محیط صفر باشد، ε_r حقیقی بوده و Q ، ماتریس‌های اسپارس حقیقی هستند.

$$-ik_0 \varepsilon_r E_y = i\beta H_x - \partial H_z / \partial x, \quad (1-ب)$$

$$-ik_0 \varepsilon_r E_z = \partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y, \quad (1-پ)$$

$$ik_0 H_x = \partial E_z / \partial y - i\beta E_y, \quad (2-الف)$$

$$-ik_0 E_x = i\beta E_x - \partial E_z / \partial x \quad (2-ب)$$

$$ik_0 H_z = \partial E_y / \partial x - \partial E_x / \partial y \quad (2-پ)$$

که در آن، $k_0 = \omega \mu_0$ است. با گسسته‌سازی معادلات (1 و 2) با تفاضل‌های پیش رو و پس رو به‌صورت زیر خواهد بود:

$$-ik_0 \varepsilon_{rx}(j,l) E_x(j,l) = [H_z(j,l) - H_z(j,l-1)] / \Delta y - i\beta H_y(j,l), \quad (3-الف)$$

$$-ik_0 \varepsilon_{ry}(j,l) E_y(j,l) = i\beta H_x(j,l) - [H_z(j,l) - H_z(j-1,l)] / \Delta x, \quad (3-ب)$$

$$-ik_0 \varepsilon_{rz}(j,l) E_z(j,l) = [H_y(j,l) - H_y(j-1,l)] / \Delta y - [H_x(j,l) - H_x(j-1,l)] / \Delta x, \quad (3-پ)$$

$$ik_0 H_x(j,l) = [E_z(j,l+1) - E_z(j,l)] / \Delta y - i\beta E_y(j,l), \quad (4-الف)$$

$$ik_0 H_y(j,l) = i\beta E_x(j,l) - [E_z(j+1,l) - E_z(j,l)] / \Delta x, \quad (4-ب)$$

$$ik_0 H_z(j,l) = [E_y(j+1,l) - E_y(j,l)] / \Delta x - [E_x(j,l+1) - E_x(j,l)] / \Delta y, \quad (4-پ)$$

تقریب ضریب شکست در هر نقطه با متوسط‌گیری ضریب شکست در سلول‌های مجاور به‌دست می‌آید، در این حالت معادلات (3 و 4) به‌صورت ماتریسی زیر نوشته می‌شود:

$$ik_0 \begin{bmatrix} \{H_x\} \\ \{H_y\} \\ \{H_z\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -i\beta\{I\} & U_y \\ i\beta\{I\} & 0 & U_x \\ -U_y & U_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{E_x\} \\ \{E_y\} \\ \{E_z\} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$-ik_0 \begin{bmatrix} \{\varepsilon_{rx}\} & 0 & 0 \\ i\beta\{I\} & \{\varepsilon_{ry}\} & 0 \\ 0 & 0 & \{\varepsilon_{rz}\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{E_x\} \\ \{E_y\} \\ \{E_z\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -i\beta\{I\} & V_y \\ i\beta\{I\} & 0 & -V_x \\ -V_y & U_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{H_x\} \\ \{H_y\} \\ \{H_z\} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

که در آن، I ماتریس مربعی واحد و $\{\varepsilon_{rx}\}$ ، $\{\varepsilon_{ry}\}$ و $\{\varepsilon_{rz}\}$ ماتریس قطری ضرایب شکست که در محیط همسانگرد با هم برابر هستند. در صورتی که سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی به‌ترتیب به m و n قسمت تقسیم شود، تعداد مجهول‌ها و گره‌ها به‌ترتیب $m \times n$ و $n \times m$ خواهد بود. در اینجا ماتریس‌های میدان تسطیح می‌شوند به عبارت دیگر V_y و V_x ، U_y ، U_x ماتریس‌های $[E_i(H_i)(j,l)]_{m \times n} \rightarrow [E_i(H_i)]_{m \times 1}$ ماتریس‌های دو قطری با ابعاد $mn \times mn$ به‌صورت زیر است:

شده است. نمودار پاشندگی ماده در فیبر نوری تک مد مخابراتی در نزدیکی طول موج ۱۳۰۰ nm مقدار صفر را نمایش می‌دهد. در عمل چشم‌پوشی کامل از پاشندگی ماده در این طول موج نادرست است زیرا به دلیل اثرات دما و جریان مورد استفاده در دیود لیزری، گسیل نور به طور دقیق در این طول موج امکان پذیر نیست و عملاً مقدار پاشندگی در این طول موج در حدود ۵ ps/km.nm است. با استفاده از فیبرهای حفره‌دار و تغییر ساختار هندسه حفره‌ها به راحتی می‌توان مقدار پاشندگی را تغییر و حتی آن را منفی کرد [۲۹-۳۰]. به این ترتیب می‌توان از این نوع فیبرها به عنوان جبران‌ساز پاشندگی در مسیرهای نوری در مخابرات استفاده نمود [۳۱]. محاسبات عددی برای فیبرهای ریز ساختار با ساختار مربعی شکل، مقدار پاشندگی منفی بالایی را ارائه می‌کند [۳۰ و ۳۲]. شبیه‌سازی پاشندگی در فیبرهای حفره‌دار با استفاده از روش ضریب شکست مؤثر اسکالر و برداری در مرجع [۳۳-۳۴] آمده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش ضریب شکست مؤثر اسکالر برای تعیین پاشندگی مقدار عددی کوچک‌تری را در تمام طول موج‌ها به دست می‌آورد که در مقایسه با روش دیفرانسیل محدود، از دقت کمتری برخوردار است.

میزان پاشندگی ماده که حاصل از خواص شیشه و نوع آلاینده‌هایی آن است و به هندسه مسئله ارتباطی ندارد و مستقیماً از رابطه سلمیر محاسبه می‌شود. پاشندگی موجبر به هندسه مسئله وابسته است مقدار پاشندگی از مشتق دوم قسمت حقیقی ثابت انتشار در فیبر کریستال فوتونی به صورت زیر به دست می‌آید [۳۵]:

$$D = D_w + D_M = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial^2 \text{Re}(n_s)}{\partial^2 \lambda} + \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial^2 \lambda} \right) \quad (14)$$

در عبارت فوق λ و c به ترتیب طول موج و سرعت در فضای آزاد هستند، D_w و D_M به ترتیب پاشندگی ماده و پاشندگی موجبر هستند مقدار پاشندگی ماده به تفصیل برای آلاینده‌های مختلف از قبیل سیلیکای آلاییده به برم، سیلیکای هم‌جوش^۳ در مرجع [۳۶]، مورد بررسی قرار گرفته است. در رابطه (۱۴)، n_s و n_{eff} به ترتیب ضریب شکست مؤثر تعیین شده برای هر مد در فیبر فوتونی و ضریب شکست مؤثر تعیین شده برای هر مد در فیبر کریستال فوتونی است در این مقاله تعیین پاشندگی موجبری و تأثیر اندازه حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها در میزان پاشندگی موجبری مورد توجه قرار گرفته است. برای تعیین پاشندگی موجبری لازم است که ضریب شکست مؤثر فیبر با یکی از روش‌های عددی تعیین شود. که معادلات برای هشت ردیف حفره

ضریب شکست در هر طول موجی از چند جمله‌ای سل‌مایر مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۶]:

$$n_s^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + x(GA_i - SA_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [SL_i + x(GL_i - SL_i)]^2} \quad (13)$$

که در آن، x کسر مولی GeO_2 در نمونه، λ طول موج بر حسب میکرون و مقادیرهای SA_i ، SL_i ، GA_i و GL_i ضریب‌های معادله سل‌مایر برای سیلیکای هستند که مقادیر این پارامترها برای سیلیکای خالص در جدول (۱) ارائه شده است. λ طول موج فضای آزاد بر حسب میکرون است. مقدار زیاد ژرمانیوم در مغزی باعث تغییر زیاد بین ضریب شکست مغزی و غلاف شده عدد V بزرگ‌تر شده و باعث می‌شود فیبر از حالت تک مدی خروج شود [۱۰].

جدول (۱): مقادیر پارامترهای معادله سل‌مایر [۱۶].

SA_2	SL_1	SA_1	SiO ₂
۰/۴۰۷۹۴۲۶	۰/۰۶۸۴۰۴۳	۰/۶۹۶۱۶۶۳	
SL_3	SA_3	SL_2	
۹/۸۹۶۱۶۱	۰/۸۹۷۴۷۹۴	۰/۱۱۶۲۴۱۴	GeO ₂
GA_2	GL_1	GA_1	
۰/۷۱۸۱۵۸۴۸	۰/۰۶۸۹۷۲۶۰۶	۰/۸۰۶۸۶۶۴۲	
GL_3	GA_3	GL_2	
۱۱/۸۴۱۹۳۱	۰/۸۵۴۱۶۸۳۱	۰/۱۵۳۹۶۶۰۵	

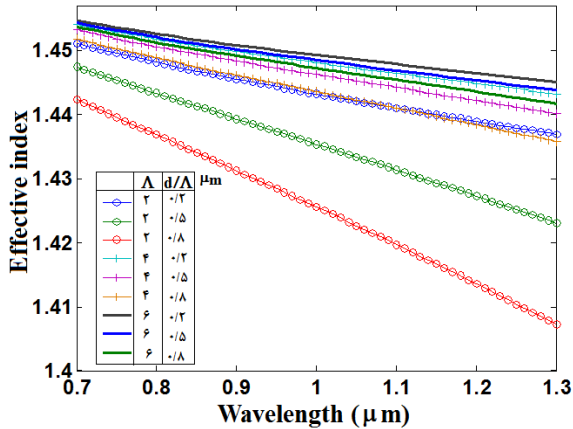
در فیبر حفره‌دار به دلیل وجود حفره در ناحیه غلاف اختلاف بین ضریب شکست مغزی و غلاف ایجاد می‌شود و نیازی به افزودن ژرمانیوم در مغزی نیست، بنابراین، در این نوع فیبر در رابطه (۱۳) ضریب x می‌تواند صفر باشد.

پاشندگی در فیبرها به چندین نوع تقسیم‌بندی می‌شود. انواع پاشندگی در فیبر نوری شامل (۱) پاشندگی مدی (درون و فرا مدی) است که در فیبرهای چند مد رخ می‌دهد و در فیبرهای تک مد مخابراتی بی‌اهمیت تلقی می‌شود. (۲) پاشندگی وابسته به قطبش که به دلیل تغییر سرعت نور در قطبش‌های مختلف رخ می‌دهد که خود حاصل عدم تقارن ساختار فیبر نوری است (۳) پاشندگی رنگی است که خود به دو دسته پاشندگی ماده^۱ و پاشندگی موجبر^۲ تقسیم‌بندی می‌شود و در این مقاله به آن توجه

^۳ Fused Silica

^۱ Material Dispersion
^۲ Waveguide Dispersion

ویژه مقدارهای معادله (۵) یا (۶)، مقدار ثابت انتشار را تعیین می‌کنند. ضریب شکست مؤثر در هر طول موج با رابطه $n_{eff} = \beta/k_0$ تعیین می‌شود، که نتایج آن در شکل (۴) نمایش داده شده است. در اینجا سه مقدار فاصله بین حفره‌ها (۸)، ۲، ۴ و ۶ میکرون و سه مقدار متفاوت d/Λ در نظر گرفته شد.



شکل (۴): تغییرات n_{eff} بر حسب طول موج با روش FDFD.

همان‌طور که از شکل (۴) مشاهده می‌شود، ضریب شکست مؤثر با افزایش طول موج انتشار، برای هر اندازه حفره و فاصله بین حفره‌ها کاهش می‌یابد. برای $\Lambda = 2\mu m$ و سه مقدار مختلف d/Λ ، مقدار ضریب شکست مؤثر کمترین مقدار را دارد. در هر اندازه‌ای از Λ ، ضریب شکست مؤثر با افزایش d/Λ کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش درصد هوا در غلاف است. در مقایسه نتایج مقادیر عددی ضریب شکست مؤثر با استفاده از روش‌های مختلف عددی همان‌طور که در مرجع [۳۴] آمده است، استفاده از روش ضریب شکست مؤثر اسکالر مقدار عددی بزرگتری در مقایسه با روش ضریب شکست مؤثر بردار ارائه می‌کند و شیب منحنی این تغییرات نیز با استفاده از روش ضریب شکست مؤثر اسکالر و برداری نسبت به سایر روش‌ها بزرگتر است [۴۱]. بنابراین، انتظار می‌رود استفاده از این دو روش ضریب شکست مؤثر اسکالر و برداری خطای بزرگی در محاسبه پاشندگی موجبر ارائه کند.

با استفاده از نتایج شکل (۴) و در نظر گرفتن رابطه (۱۴)، تغییرات پاشندگی موجبر بر حسب طول موج در فیبر کریستال فوتونی محاسبه می‌شود که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. در ساختار شش‌گوش با هشت ردیف حفره هوایی، تغییرات پاشش نسبت به طول موج روند صعودی دارد. باید توجه داشت که هندسه حفره‌های هوایی (اندازه، چیدمان و تعداد ردیف‌ها) در خصوصیات پاشندگی موجبر فیبر حفره‌دار به شدت تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال در فیبر کریستال فوتونی با ساختار سه‌گوش که اندازه حفره‌های هوایی در ردیف اول نسبت به سایر

حول مغزی پر در مرکز حل شده است. سطح مقطع مؤثر در فیبر از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۷]:

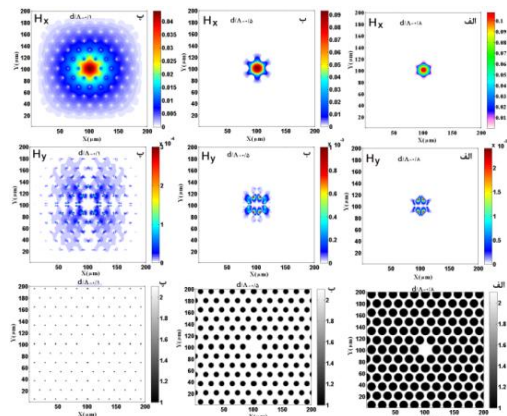
$$A_{eff} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E|^4 dx dy} \quad (15)$$

برای اندازه‌گیری قطر میدان مدی در هر نوع فیبر معمولاً از روش پیمایشی میدان دور^۱ استفاده می‌شود. گشودگی عددی با رابطه زیر به سطح مقطع مؤثر وابسته است:

$$N_A = 1 + \pi A_{eff} / \lambda^2 \quad (16)$$

۳- نتایج محاسبات عددی

در این شبیه‌سازی هشت ردیف حفره هوا در نظر گرفته شده و تعداد گره‌ها در محاسبات ۱۰۰ عدد در هر ردیف در نظر گرفته شده است. با تعیین ماتریس‌ها و حل معادلات (۹) و (۱۰)، میدان‌های الکتریکی از روابط (۵) و (۶) در هر گره در سطح فیبر کریستال فوتونی تعیین می‌شود. نتایج میدان‌های مغناطیسی در راستاهای x و y برای سه مقدار d/Λ ، ۰/۸، ۰/۵، ۰/۱ و در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این شکل از چپ به راست حفره‌های هوایی بزرگ‌تر می‌شود. همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه حفره میزان تمرکز نور در مغزی افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر برای اندازه حفره کوچک نشت نور به مقدار اندک حتی در مد اول انتشاری در مغزی وجود دارد. در واقع بزرگ بودن حفره‌های هوا در مغزی باعث کاهش ضریب شکست مؤثر غلاف می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد برای $d/\Lambda = 0.3$ و $\Lambda = 8\mu m$ نور کاملاً در مغزی متمرکز است در حالی که نشت نور در ناحیه غلاف برای $d/\Lambda = 0.1$ کاملاً در شکل مشهود است.



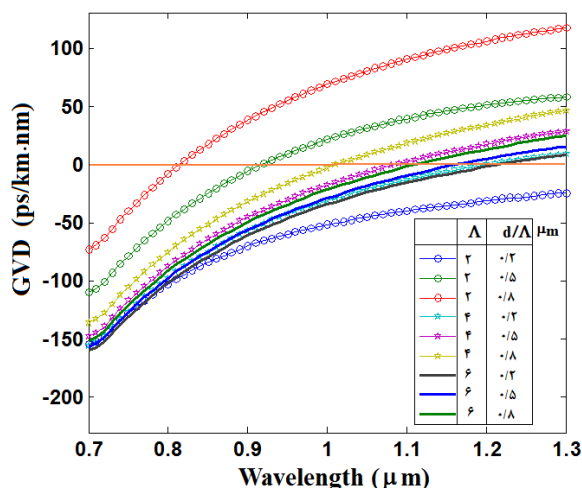
شکل (۳): میدان مغناطیسی در راستای x و میدان مغناطیسی در راستای y برای ساختارهای مختلف فیبر در $\Lambda = 8\mu m$ (الف) و $d/\Lambda = 0.1$ (ب) $d/\Lambda = 0.5$ (پ)

^۱ Far-Field Scanning: FFS

بر اساس شرایط مرزی و پاسخ معادله در نقطه قبلی انتخاب می‌شود. در روش‌های المان و دیفرانسیل محدود، ضریب شکست مؤثر از حل عددی یک ماتریس مشخصه به دست می‌آید. ابعاد ماتریس مشخصه به تعداد نقاط یا گره‌ها انتخابی وابسته است. به عبارت دیگر در روش‌های المان و دیفرانسیل محدود می‌توان با افزودن تعداد گره‌ها دقت محاسبات را افزایش داد در حالی که روش‌های ضریب شکست مؤثر اسکالر و بردار تا کنون راه حلی اصلاحی برای افزایش دقت محاسبات ارائه نشده است. در نتیجه مشتق مرتبه دوم در این روش‌ها با دقت پایینی محاسبه شده و عملاً روش‌های ضریب شکست مؤثر برای محاسبه پاشندگی قابل استفاده نیست. در مرجع [۴۰]، تغییرات پاشندگی برای مقدار $\Lambda = 2.1 \mu\text{m}$ و مقادیر مختلف اندازه حفره با استفاده از روش شبکه‌های عصبی محاسبه شده است در این مقاله نشان داده شده که تغییرات پاشندگی با افزایش اندازه حفره‌ها روند منظمی دارد که روند و بازه تغییرات در محدوده بازه محاسباتی این مقاله قرار می‌گیرد.

در شکل (۶) تغییرات ضریب شکست و پاشندگی ماده برای مقادیر مختلف درصد آلایندگی با استفاده از رابطه (۱۳) ترسیم شده است. همان‌طور که از شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود با افزایش طول موج پاشندگی ماده کم می‌شود. در یک طول موج ثابت، افزایش آلایندگی باعث افزایش ضریب شکست شیشه می‌شود که در فیبرهای نوری معمولی با آلایندگی مغزی به ژرمانیوم اختلاف ضریب شکست بین مغزی و غلاف می‌کنند تا نور در مغزی محصور شود. با افزایش ژرمانیوم در مغزی پاشندگی ماده افزایش می‌یابد. که نشان می‌دهد با افزایش آلایندگی تقعر منحنی ضریب شکست نسبت به طول موج زیاد می‌شود. در شکل (۶-ب)، (خط مشکی نقطه‌چین) سطح پاشندگی صفر ماده را نشان می‌دهد که با افزایش آلایندگی در محیط نقطه صفر پاشندگی ماده از ۱۳۰۰ نانومتر به طول موج‌های کوتاه‌تر منتقل می‌شود. با افزودن مقادیر پاشندگی ماده به پاشندگی موجبر تعیین شده در فیبرهای کریستال فوتونی که در شکل (۵) نشان داده شده است پاشندگی کل به دست می‌آید. به این ترتیب می‌توان نقطه صفر پاشندگی را برای اندازه‌های مختلف حفره و فاصله بین حفره‌ها محاسبه کرد. در اینجا پاشندگی با درصد ژرمانیوم صفر مول به نتایج شکل (۵) اضافه شده و نقطه صفر پاشندگی برای مقادیر مختلف اندازه حفره d و فاصله بین حفره‌ها Λ در شکل (۷) ارائه شده است.

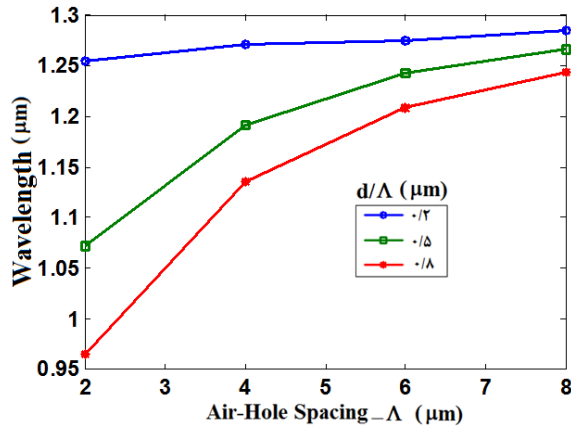
ردیف‌ها کوچکتر است، محاسبات پاشندگی موجبری مقدار بیشینه‌ایی (پیک) را در طول موج ۰/۹ میکرون نشان می‌دهد [۳۸]. همان‌طور که از شکل (۵) مشاهده می‌شود، برای $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda = 0/2$ ، پاشش رنگی در بازه طول موج محاسباتی منفی است. برای $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda = 0/5$ ، در طول موج ۹۱۲ نانومتر دارای پاشندگی صفر و در طول موج‌های بلندتر مقدار پاشندگی موجبری مثبت است. برای $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda = 0/8$ ، پاشندگی روند صعودی با شیب تندتری دارد. برای مقادیر Λ بزرگ‌تر، میزان تغییرات منحنی پاشندگی موجبر برای d/Λ های مختلف نزدیک به هم است. برای $\Lambda = 6 \mu\text{m}$ (منحنی‌های توپر) و سه مقدار مختلف d/Λ مقادیر نمودارهای پاشندگی موجبر فقط برای طول موج‌های بلند در حدود 10 ps/km.nm ، با هم اختلاف دارند.



شکل (۵): تغییرات پاشندگی موجبری بر حسب طول موج با روش FDFD

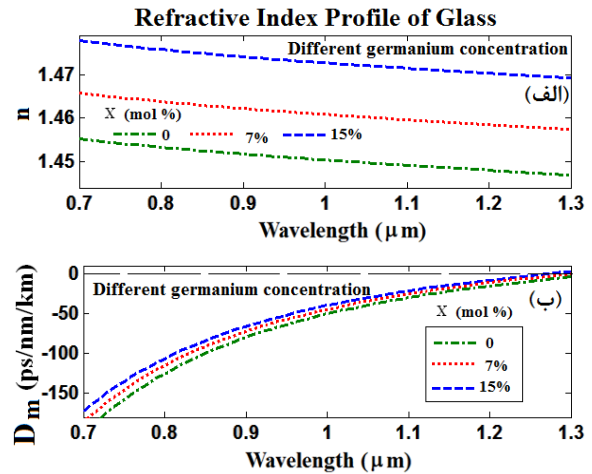
طبق تعریف، پاشندگی صفر در موجبر (فیبر) در طول موجی رخ می‌دهد که پاشندگی موجبر و پاشندگی ماده همدیگر را حذف کنند [۳۹]. در فیبر ساخته شده از سیلیکای خالص پاشندگی ماده در طول موج ۱۳۰۰ nm صفر می‌شود ولی با افزایش آلایندگی‌های مانند ژرمانیوم به سیلیکای خالص ضریب شکست و همچنین پاشندگی ماده تغییر خواهد کرد. در مرجع [۳۳]، مقدار عددی پاشندگی با استفاده از دو روش ضریب شکست مؤثر اسکالر و برداری ارائه شده است. از این مراجع مشاهده می‌شود که مقدار عددی پاشندگی برای d/Λ های مختلف روند تغییرات منظمی ندارد. شایان ذکر است در کلیه روش‌های عددی، ضریب شکست مؤثر در هر طول موجی از یک معادله مشخصه به دست می‌آید که این معادله دارای جواب‌های مختلف عددی است. در هر نقطه محاسباتی، مناسب‌ترین جواب

موجبری در فیبر است بنابراین، انتظار داریم با افزایش d/Λ نقطه صفر پاشندگی به طول موج‌های کوتاه‌تر منتقل شود که محاسبات انجام شده در شکل (۷) برای یک مقدار ثابت Λ ، با افزایش d/Λ نقطه صفر پاشندگی کاهش می‌یابد.



شکل (۷): طول موج پاشندگی صفر برای مقادیر مختلف اندازه مختلف حفره‌ها و فاصله بین حفره‌ها

همان‌طور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود برای تمام مقادیر اندازه حفره و فاصله بین حفره‌ها پاشندگی در فیبر کریستال فوتونی در طول موج کمتر از 1300 nm رخ می‌دهد، به عبارت دیگر در یک فیبر کریستال فوتونی ساخته شده از سیلیکای خالص با ایجاد حفره‌های هوایی به جای آنکه ضریب شکست مغزی را افزایش دهند تا نور در فیبر محصور شود ضریب شکست غلاف را با ایجاد حفره‌های هوا کاهش می‌دهند که نتیجه آن کاهش طول موج صفر پاشندگی در این نوع فیبرها خواهد بود واضح است اگر پیش‌سازه یا شیشه‌ای که از آن فیبر کریستال فوتونی ساخته می‌شود دارای درصد ژرمانیوم یا سایر آلاینده‌ها باشد می‌توان نقطه صفر پاشندگی را به طول موج‌های پایین‌تر انتقال داد. در شکل (۷) مشاهده می‌شود برای مقادیر مختلف کسر پاشندگی هوا d/Λ ، با افزایش فاصله بین حفره‌ها طول موج صفر پاشندگی به مقادیر بالاتر منتقل می‌شود. با افزایش فاصله بین حفره‌ها Λ ، برای آنکه کسر پاشندگی هوا ثابت باشد، مقدار d ، قطر حفره‌های هوایی نیز بزرگ‌تر می‌شود از آنجا که در محاسبات تعداد ردیف‌های حفره‌های هوایی ثابت و هشت ردیف در نظر گرفته شده، بزرگ‌تر شدن Λ به معنی افزایش قطر غلاف در این نوع فیبرها است. به عبارت دیگر افزایش فاصله بین حفره‌های هوایی با ثابت ماندن کسر پاشندگی‌ها باعث افزایش تراکم شیشه در غلاف و بزرگ‌تر شدن ضریب شکست مؤثر غلاف شده و اختلاف ضریب شکست در مغزی و غلاف را کاهش داده و پاشندگی موجبر را افزایش می‌دهد. بنابراین، انتظار داریم که نقطه صفر پاشندگی به طول موج‌های بالاتر منتقل شود که شبیه‌سازی این مورد را تأیید می‌کند. با ثابت بودن فاصله بین حفره‌ها Λ ، افزایش d/Λ به معنی افزایش کسر پاشندگی هوا یا افزایش اختلاف ضریب شکست مؤثر غلاف و مغزی و کاهش پاشندگی



شکل (۶): تغییرات بر حسب طول موج برای، الف) ضریب شکست در شیشه آلابیده به ژرمانیوم، ب) پاشندگی ماده، با درصد‌های مختلف آلایندگی ژرمانیوم در شیشه.

شکل (۶): تغییرات بر حسب طول موج برای، الف) ضریب شکست در شیشه آلابیده به ژرمانیوم، ب) پاشندگی ماده، با درصد‌های مختلف آلایندگی ژرمانیوم در شیشه.

می‌یابد به طوری که با افزایش فاصله بین حفره‌ها از ۵ به ۸ میکرون گشودگی عدد در حدود ۵۷٪ کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

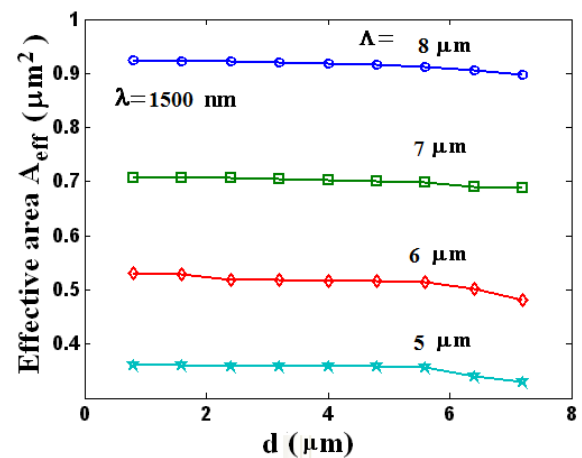
در این مقاله فیبرهای کریستال فوتونی با روش دیفرانسیل محدود در بازه فرکانس مدل‌سازی و نتایج آن تشریح شد. با روش عددی معادلات ماتریسی مربوطه، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر حسب اندازه حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها در طول-موج مختلف در شبکه سه‌گوش با هشت لایه حفره هوا تعیین شد.

ضریب شکست مؤثر در فیبرهای کریستال فوتونی از قسمت حقیقی ثابت انتشار به دست می‌آید. در این مقاله برای اولین بار مقادیر مختلف اندازه حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها ضریب شکست مؤثر منتشره در فیبر کریستال فوتونی محاسبه شد. برای تمام اندازه‌های مختلف حفره و فاصله آن‌ها، ضریب شکست مؤثر نسبت به طول موج روند نزولی دارد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش قطر حفره‌های هوایی با ثابت بودن فاصله بین حفره‌ها ضریب شکست مؤثر فیبر کاهش می‌یابد. هر چه فاصله بین حفره‌ها کوچکتر باشد شیب نمودار ضریب شکست نسبت به طول موج بیشتر است.

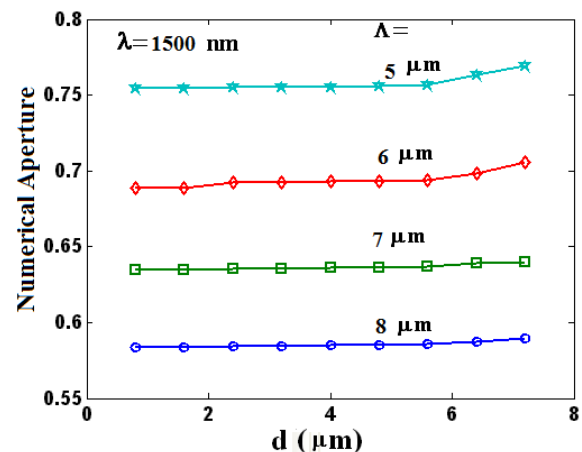
پاشندگی موجبر در فیبرهای کریستال فوتونی از مشتق دوم ثابت انتشار نسبت به طول موج به دست می‌آید منحنی پاشندگی موجبر فیبر کریستال فوتونی برای اندازه‌های مختلف سایز حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها تعیین شد. محاسبات نشان می‌دهد که تأثیر افزایش مقدار d/Λ ، در پاشندگی موجبر برای مقادیر کوچک Λ ، چشمگیر است در حالی که برای Λ بزرگ‌تر در حدود ۶ میکرون، میزان پاشندگی موجبر برای d/Λ مختلف، اختلاف کوچکی نسبت به هم دارند. محاسبات ارائه شد در این مقاله نشان می‌دهد که روند و بازه تغییرات محاسبات انجام شده با روش دیفرانسیل محدود با روش شبکه‌های عصبی هم‌خوانی دارد در حالی که روش‌های ضریب شکست مؤثر برداری و اسکالر دقت پایینی در محاسبه پاشندگی ارائه می‌کند بنابراین، روش‌های ساده عددی قابل استفاده برای طراحی فیبرهای کریستال فوتونی با پاشندگی صفر (خاص) نیست.

با محاسبه پاشندگی ماده و افزودن به پاشندگی موجبر، می‌توان پاشندگی رنگی محاسبه کرد. تغییر ساختار حفره‌ها تأثیری در مقدار پاشندگی ماده یا پاشندگی بین مدی ندارد و تغییر در ساختار غلاف فقط در پاشندگی موجبر مؤثر است. با تعیین نقطه پاشندگی رنگی صفر، می‌توان طول موجی پرتو عبوری بدون پهن‌شدگی یا تغییر در توزیع شدت نور را تعیین

در شکل (۹)، تغییرات گشودگی عددی از رابطه (۱۶) و با استفاده از نتایج شکل (۸) برای مقادیر مختلف Λ و d تعیین و ترسیم شده است. همان‌طور که از شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش قطر حفره هوایی d در یک مقدار ثابت فاصله بین حفره‌ها Λ ، گشودگی عددی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر کوچکتر شدن سطح مقطع مؤثر در فیبر یا محصور بودن نور در فیبر باعث می‌شود که بتوان پرتو نور را با زاویه بزرگتری نسبت به محور فیبر وارد محیط انتشار کرد بدون آنکه پرتو وارد غلاف شود این باعث می‌شود در تزویج نور لیزر به فیبر بتوان از لنزهای قوی‌تری استفاده کرد.



شکل (۸): تغییرات سطح مقطع مؤثر بر حسب اندازه حفره در فیبر کریستال فوتونی برای چهار مقدار مختلف Λ .



شکل (۹): تغییرات گشودگی عددی بر حسب اندازه حفره در فیبر کریستال فوتونی برای چهار مقدار مختلف Λ .

بنابراین، در یک فیبر کریستال فوتونی با تنظیم مناسب حفره‌های هوایی و کوچکتر کردن سطح مقطع مؤثر یا بزرگ‌تر کردن گشودگی عددی درصد تزویج نور لیزر به فیبر را افزایش داده و تلفات تزویج نور را کاهش داد. با افزایش فاصله بین Λ در یک مقدار ثابت اندازه حفره گشودگی عددی به سرعت کاهش

- [9] J. E. Sharping, M. Fiorentino, P. Kumar, and R. S. Windeler, "Optical parametric oscillator based on four-wave mixing in microstructure fiber", *Opt. Lett.*, Vol. 27, pp. 1675-1677, 2002.
- [10] M. Karimi and F. E. Seraji, "Effects of geometry on amplification property of erbium doped holey fiber amplifiers using scalar effective index method", *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 19, 385-403, 2010.
- [11] M. Midrio, M. P. Singh, and C. G. Smeda, "The Space Filling Mode of Holey Fibers: An Analytical Vectorial Solution", *IEEE J. Lighthwave. Technol.*, Vol. 18, pp. 1031-1037, 2000.
- [12] A. Bjarklev, J. Broeng, and A. S. Bjarklev, "Photonic crystal fibers", Kluwer Academic Publishers, London, 2003.
- [13] S. Kunimasa, K. Masanori, "Numerical Modeling of Photonic Crystal Fibers", *IEEE J. Lighthwave. Technol.*, Vol. 23, pp. 3580-3590, 2005.
- [14] F. Prudenzano, "Erbium-doped hole-assisted optical fiber amplifier: Design and optimization", *IEEE J. Lighthwave Technol.*, Vol. 23, pp. 330-340, 2005.
- [15] C. A. Defrancisco, B. V. Borges, and M. A. Romero, "A semi vectorial iterative finite-difference method to model photonic crystal fibers", in *SBMO/IEEEEMTT-SIMOC*, pp. 407-409, 2001.
- [16] D. Mogilevtsev, T. A. Birks, P. S. J. Russell, "Localized function method for modeling defect modes in 2-D photonic crystals", *J. Lightwave. Technol.* Vol. 17, pp. 2078-2081, 1999.
- [17] S. Guo, and S. Albin, "Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations", *Opt. Express*, Vol. 11, pp. 167-175, 2003.
- [18] M. Karimi, "Optimization of Core size in Erbium Doped Holey Fiber Amplifiers", *Optik*, Vol. 125, pp. 2780-2783, 2014.
- [19] A. Cucinotta, F. Poli, S. Selleri, L. Vincetti, and M. Zoboli, "Amplification Properties of Er³⁺-Doped Photonic Crystal Fibers", *IEEE J. Lighthwave. Technol.*, Vol. 21, pp. 782-788, 2003.
- [20] F. Poli, A. Cucinotta, D. Passaro, S. Selleri, J. Lægsgaard, and J. Broeng, "Single-Mode Regime in Large-Mode-Area Rare-Earth-Doped Rod-Type PCFs", *IEEE J. Select. Topic. Quant. Electron.* Vol. 15, pp. 54-60, 2009.
- [21] N. A. Mortensen, "Effective area of photonic crystal fibers", *Opt. Express*. Vol. 10, pp. 341-348, 2002.
- [22] M. Karimi, "Optimization of Erbium Doped Fiber Core size in Amplifier Systems", *Conference of Physics*, yazd University, pp.593-596, August 2012, (In Persian).
- [23] M. Karimi, "Refractive Index Calculation in Holey Fiber with Hexagonal Structure using Finite Element Method" *Conference of Physics*, Ferdowsi Mashhad University, August 2015, (In Persian).
- [24] M. Karimi, "Small Signal Gain in Ytterbium Doped Fiber Laser with Honeycomb Structure", *National Conference of Physics and its Applications*, Malayer university, P. NCPAP65, 29, Jun, 2016, (In Persian).
- [25] M. Karimi, "Small Signal Gain in Erbium Doped Fiber Laser with Hexagonal Structure", *The Fourth National Iranian Conference on Engineering Electromagnetics – ICEEM*, NDJA university, Nowshahr, Mazandaran, A-10-10-3, 11-13, April, 2016, (In Persian).
- [26] M. Karimi, "Waveguide Dispersion Characteristic in Holey Optical fiber with Hexagonal Structure Using Fully vectorial Effective index and Finite Element Methods", *the Iranian conference of optics & laser engineering*, Malek-ashtar university of Technology, Oral presentation, Isfahan, pp. 241-244, May 2015, (In Persian).

کرد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش اندازه حفره‌ها، در یک مقدار ثابت فاصله بین حفره‌ها طول موج صفر پاشندگی کاهش می‌یابد که دلیل آن روند افزایشی پاشندگی موجبر با افزایش اندازه حفره‌های هوایی است که باعث انتقال پاشندگی صفر به طول موج کوتاه‌تر می‌شود.

با استفاده از قاعده مرکب سیمسون برای انتگرال دوگانه، مقدار سطح مقطع مؤثر برای مقادیر مختلف اندازه حفره و فاصله بین حفره‌ها محاسبه شد. در یک مقدار ثابت Λ ، با افزایش d/Λ ، سطح مقطع مؤثر کاهش می‌یابد و برای هر d ثابت، با افزایش Λ سطح مقطع مؤثر افزایش می‌یابد. با افزایش Λ از 5 به 8 میکرون برای کسر پاشندگی هوای $d/\Lambda = 0.1$ سطح مقطع مؤثر در حدود 79٪ افزایش می‌یابد. از آنجا که گشودگی عددی با سطح مقطع مؤثر رابطه معکوس دارد در یک Λ ثابت با افزایش d/Λ ، گشودگی عددی افزایش می‌یابد. برای $d/\Lambda = 0.1$ ، با افزایش Λ از 5 به 8 میکرون مقدار گشودگی عددی در حدود 57٪ کاهش را نشان می‌دهد. طراحی و انتخاب مناسب فیبر کریستال فوتونی در ادوات مبتنی بر این فیبرها، بهترین نتیجه با بالاترین کارایی را در این نوع ادوات ایجاد خواهد کرد.

۵- منابع

- [1] K. P. Hansen, "Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber," *Opt. Express*, Vol. 11, pp. 1503-1509, 2003.
- [2] T. M. Monro, W. Belardi, K. Furusawa, J. C. Baggett, N. G. R. Broderick, and D. J. Richardson, "Sensing with microstructured optical fibres", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 854-858, 2001.
- [3] J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tünnermann, R. Iliew, F. Lederer, J. Broeng, G. Vienne, A. Petersson, and C. Jakobsen, "High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser", *Opt. Express*, Vol. 11, pp. 818-823, 2003.
- [4] S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. Holzwarth, T. Udem, and T. W. Hänsch, "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 84, pp. 5102-5105, 2000.
- [5] K. N. Park, T. Erdogan, K. S. Lee, "Cladding mode coupling in long-period gratings formed in photonic crystal fibers", *Opt. Commun.*, Vol. 266, pp. 541-545, 2006.
- [6] A. Shirakawa, J. Ota, M. Musha, K. Nakagawa, K. Ueda, Jacob R. Folkenberg and J. Broeng, "Large-mode-area erbium-ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier for high-energy femtosecond pulses at 1.55 μm ", *Opt. Express*, Vol. 13, pp. 1221-1227, 2005.
- [7] F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos, and P. St. J. Russell, "Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber", *Science*, Vol. 298, pp. 399-402, 2002.
- [8] G. Genty, M. Lehtonen, H. Ludvigsen, J. Broeng, and M. Kaivola, "Spectral broadening of femtosecond pulses into continuum radiation in micro structured fibers", *Opt. Express.*, Vol. 10, pp.1083-1098, 2002.

- [34] Y. F. Li, C. Y. Wang, M. L. Hu, "A fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: application to dispersion calculation", *Optic. Commun.* Vol. 238, pp. 29–33, 2004.
- [35] K. Thyagarajan, A. Ghatak, "*Fiber Optic Essentials*", A John Wiley & Sons, INC, 2007.
- [36] R. H. Thaher, O. A. Shareef, S. D. Yousif, "Investigation into the Propagation Characteristics of Photonic Crystal Fiber, Iraq Academic Scientific Journals, ISSN: 19924453, pp. 285-300, 2012.
- [37] K. Kurokawa, "Optical Fiber for High-Power Optical Communication", *Crystals* Vol. 2, pp. 1382-1392, 2012.
- [38] J. Arriaga, J.C. Knight, P.St.J. Russell, "Modeling the propagation of light in photonic crystal fibers", *Physica D*, Vol. 189, pp. 100–106, 2004.
- [39] Blackie, "*Blackie's Dictionary of Physics*", 2016.
- [40] A. Ouchar, A. Sonne, and R. Aksas, "Chromatic Dispersion Of Micro structured Fiber Using Neural network", *IEEE Xplore, Conference Mediterranean Microwave Symposium (MMS-6068552)*, 2011.
- [41] Y. f. Li, C. y. Wang, Z. h. Wang, M. l.Hu, L. Chai, "Analytical solution of the fundamental space filling mode of photonic crystal fibers", *Opt. & Laser Technol.* Vol. 39, pp.322–326, 2007.
- [27] M. Karimi, "Dispersion Characteristic in Photonic Crystal fiber Using Final Difference Frequency Domain Method", Sharif University of Technology, 2-3 Novamber, Tehran, Iran, 2016, (In Persian).
- [28] Z. Zhu, and T. G. Brown, "Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers", *Opt. Express.* Vol. 10, pp. 853-864, 2002.
- [29] F. Poli, A. Cucinotta, M. Fuochi, and S. Selleri, "Characterization of microstructured optical fibers for wideband dispersion compensation", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 20, pp. 1958-1962, 2003.
- [30] B. Dabas, R.K., "Dispersion characteristic of hexagonal and square lattice chalcogenide As₂Se₃ glass photonic crystal fiber", *Optic. Commun.* Vol. 283, pp. 1331–1337, 2010.
- [31] T. A. Birks, D. Mogilevtsev, J. C. Knight, and P. St.J. Russell, "Dispersion Compensation Using Single-Material Fibers", *IEEE Photon. Technol. Letter.*, Vol. 11, pp. 674-676, 1999.
- [32] H. Demir, S. Ozsoy, "Large-solid-core square-lattice photonic crystal fibers", *optical fiber technol.* Vol. 17, pp. 594-600, 2011.
- [33] R. K. Sinha, and A. Varshney, "Dispersion properties of photonic crystal fiber: comparison by scalar and fully vectorial effective index methods", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 37, pp. 711–722, 2005.

Analysis of Photonic Crystal fibers Using Finite Difference Frequency Domain Method

M. Karimi *

Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

(Received: 16/10/2018, Accepted: 07/05/2019)

Abstract

Finite difference and finite element methods have more accuracy in the calculation of photonic crystal fiber (PCF) characters than other methods. In the present paper the finite difference method in the frequency domain is used to describe and determine the characteristics of PCF. The propagation characteristics of photonic crystal fiber with eight-hole layer are calculated and the fiber characteristics, consisting of, effective refractive index and waveguide dispersion are determined. Then using the composite Simpson rule for double integral, the values of effective areas and numerical apertures are obtained using the results of fields for different values of the hole sizes and distances and the results are compared. Since the determination of zero dispersion region is important in telecommunication and especially for the design of compensators, by determining the color dispersion and zero dispersion wavelength in this kind of fibers, the effects of air hole characteristics in the zero point of dispersion is verified. In this paper for the first time, using the mentioned method, the effects of the hole size in PCF characteristics such as waveguide dispersion is calculated and it is shown that increasing the air hole size in the fixed hole distance, causes the zero dispersion wavelength to decrease and for the fixed air hole with increasing the hole distance, the zero dispersion wavelength increases in the PCF..

Keywords: Photonic crystal fiber, Effective refractive index, Dispersion, Effective area, Numerical aperture, Air hole characteristics.

* Corresponding author E-mail: mykarimi@aeoi.org.ir