

تعیین صفات مشخصه فیبرهای نوری کریستال فوتونی ساخته شده با استفاده از روش ضریب شکست مؤثر

فرامرز اسماعیلی سراجی

استادیار، گروه مخابرات نوری، پژوهشکده فناوری ارتباطات، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، feseraji@itrc.ac.ir

چکیده

در این مقاله، صفات مشخصه فیبرهای نوری کریستال فوتونی که در چند سال اخیر به طور تجربی در مرکز تحقیقات مخابرات ایران تعیین شدند با نتیجه‌های نظری حاصل از روش تحلیلی ضریب شکست مؤثر مقایسه شده‌اند. فیبرهای کریستال فوتونی مورد مطالعه با سرعت بالا ساخته شده‌اند که در گزارش‌های موجود کمتر به آن توجه شده است. گشودگی عددی و بسامد بهنجار مؤثر فیبرهای نوری کریستال فوتونی به طور تجربی در طول موج‌های کوتاه و بلند اندازه‌گیری شده و با روش ضریب شکست مؤثر مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند. به طور نظری و تجربی نشان داده شده که در فیبرهای کریستال فوتونی، در طول موج‌های بلند، میدان نور بیش تر در مغزی فیبر و در طول موج‌های کوتاه در غلاف منتشر می‌شود. این پدیده منجر به اثرگذاری مهمی در گشودگی عددی و بسامد بهنجار فیبرهای نوری کریستال فوتونی می‌شود، زیرا این دو پارامتر وابستگی مستقیم به حفره‌های هوا و فاصله بین آن‌ها در نوع فیبرها دارند. نتیجه‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهند فیبرهای تولید شده با سرعت بالا دارای تلفات کم‌تر از ۱۲ dB/km بوده که در مقایسه با مرجع‌های موجود، نتیجه قابل ملاحظه‌ای است. همچنین به کمک مدل نظری نشان داده شده که کمترین فاصله بین حفره‌ها در فیبرهای ساخته شده منجر به کاهش تلفات در فیبرهای کریستال فوتونی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

پیش‌سازه، طراحی و ساخت، فیبرنوری حفره‌دار، کریستال فوتونی، ضریب شکست، گشودگی عددی، بسامد قطع، تلفات، فیبرهای هوا سیلیکا

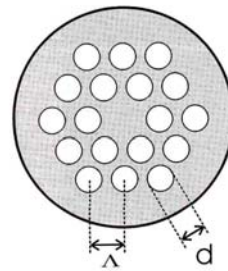
۱- مقدمه

صورت می‌گیرد در حالی که در فیبرهای مغزی هوا، انتشار از طریق اثر باند ممنوعه فوتونی انجام می‌شود [۳]. در این روش یک ضریب شکست مؤثر برای ناحیه غلاف بدست می‌آید و سپس ویژگی‌های آن مشابه یک فیبر ضریب پله‌ای معمولی، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد و برای تعیین پارامترهای مختلف فیبر کریستال فوتونی از همان رابطه‌های فیبر معمولی ضریب پله‌ای استفاده می‌شود [۳ - ۵].

فیبرهای کریستال فوتونی^۱، از فیبرهای نسل جدید هستند که برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ معرفی شدند. این نوع فیبرها، که با نام‌های فیبرهای حفره‌دار^۲ و هوا سیلیکا^۳ نیز معروف هستند، همانند فیبرهای استاندارد مخابراتی دارای مغزی و غلاف هستند با این تفاوت که غلاف آن‌ها از حفره‌های هوا تشکیل شده است [۱ و ۲]. به‌طور کلی، دو نوع فیبر کریستال فوتونی وجود دارد: مغزی سیلیکا و مغزی هوا. انتشار نور در فیبرهای مغزی سیلیکا از طریق بازتاب کلی

۲- طراحی پارامترهای ساخت

اگر فیبرنوری کریستال فوتونی را در حالت آرمانی در نظر بگیریم سطح مقطع آن را می‌توان مطابق شکل (۱) نشان داد. برای ساخت چنین فیبرهایی، بسته‌ای از لوله‌های شیشه‌ای مویی در کنار هم به‌طور حلقه‌وار در لوله شیشه‌ای با قطر مناسب قرار داده می‌شود، به‌طوری که لوله مویی مرکزی به‌عنوان مغزی فیبر و سایر لوله‌های مویی و فضای خالی بین آن‌ها غلاف را تشکیل دهند. با کشیدن این پیش‌سازه در یک برج کشش مناسب، فیبر کریستال فوتونی تولید می‌شود [۴]



شکل ۱- سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی.

با توجه به شکل (۱)، اگر بخواهیم مطابق استاندارد فیبرهای مخابراتی، قطر مغزی فیبر تولیدی در حدود ۸ میکرومتر و قطر کل آن ۱۲۵ میکرون به‌دست آید، قطر لوله مویی مرکزی x در لوله شیشه‌ای پایه با قطر بیرونی ۲۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۹ میلی‌متر مربوط به پیش‌سازه را تعیین می‌کنیم [۵ و ۶]:

$$125 \mu\text{m} / 25 \text{ mm} = 8 \mu\text{m} / x \text{ mm}, \quad x = 1.6 \text{ mm} \quad (1)$$

اگر سایر لوله‌های مویی مورد نیاز نیز همین اندازه انتخاب شوند، تعداد ۱۱ ردیف لوله‌های مویی در لوله شیشه‌ای پایه قابل بسته‌بندی خواهد بود.

با حذف لوله مویی مرکزی و با احتساب فضای مورد نیاز برای حفره‌های ایجاد شده بین لوله‌های مویی، ۵ ردیف لوله مویی در اطراف لوله مویی مرکزی قرار می‌گیرند، بنابراین با محاسبه به‌صورت زیر:

$$(2) \quad \text{شماره ردیف لوله‌ها:}$$

مرکزی	۱	۲	۳	۴	۵
	۱	۶	۱۲	۱۸	۲۴
	۱	۶	۱۲	۱۸	۲۴

تعداد لوله‌های مویی در هر ردیف:

تعداد کل لوله‌های مویی در ۵ ردیف ۹۱ عدد می‌شود و تعداد ردیف‌های حفره‌های جانبی، یک ردیف بیش‌تر است که در ردیف اضافی تعداد همان ۳۰ حفره است، با این تفاوت که اندازه حفره‌ها در ردیف آخر بزرگ‌تر است. برای سهولت از این اختلاف اندازه

حفره‌ها، از نقطه تماس لوله‌های مویی و جدار داخلی لوله پایه صرف نظر می‌شود. بنابراین، تعداد حفره‌های ایجاد شده در منطقه غلاف در پیش‌سازه در مجموع $91 + 30 = 121$ بدست می‌آید. قطر هر حفره D در پیش‌سازه برابر است با:

$$\left[(19/2)^2 \pi \right] - \left[91 \times (1.6/2)^2 \pi \right] = 100.5752 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

$$100.5752 / 121 = 0.8312 \text{ mm}^2 \Rightarrow D = 1.02 \text{ mm}$$

قطر متناظر هر حفره در فیبر d و نیز فاصله مراکز دو حفره مجاور Λ برابر هستند با:

$$125 / 25 = d / 1.02, \quad d = 5.1 \mu\text{m} \quad (4)$$

$$125 \mu\text{m} / 25 \text{ mm} = \Lambda \mu\text{m} / 1.6 \text{ mm}, \quad \Lambda = 8 \mu\text{m}$$

۳- مرحله‌های ساخت

دو پیش‌سازه با شرایط متفاوت ساخته شدند. در پیش‌سازه اول، لوله‌های مویی با قطرهای داخلی و خارجی به‌ترتیب در حدود ۱/۵ و ۲ mm، به تعداد ۸۵ عدد در ۴ لایه در کنار هم به‌طور حلقه‌وار قرار داده شدند. یک لوله مویی به قطر تقریبی ۲ mm در مرکز قرار داده شد تا نقش مغزی را ایفا کند. مجموعه لوله‌های مویی در یک لوله محافظ به قطر ۲۵ mm × ۱۹ mm قرار داده شد تا در حین فرایند کشش شکل آن حفظ شود. برای چسباندن لوله محافظ به مجموعه لوله‌های مویی، از فرایند فروریزش در دستگاه MCVD استفاده شد. در پیش‌سازه دوم، قطر لوله‌های مویی به‌طور تقریبی تا ۳ میلی‌متر افزایش داده شد و مجموعاً ۳۶ عدد لوله مویی در ۳ لایه در حول لوله مرکزی بسته‌بندی شدند [۵ و ۶].

برای کشیدن پیش‌سازه‌های تهیه شده از برج کشش فیبرنوری متداول استفاده شده است. در شروع فرایند، دما در حدود ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، که در حد دمای کشش فیبرهای معمولی است، تنظیم شد و پیش‌سازه‌ها با سرعت‌های ۱۰، ۱۵، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ متر در دقیقه کشیده شدند و دمای کوره در حین کشش تا چند ده درجه کاهش داده شد.

۴- اندازه‌گیری پارامترها و بررسی نتیجه‌ها

برای اندازه‌گیری مشخصات هندسی فیبر، از جمله قطرهای مغزی و غلاف، از روش میدان نزدیک گسیلیده استفاده شده که توسط دستگاه اندازه‌گیری موجود انجام شد. تلفات فیبرها نیز در دو طول موج مخابرات نوری، یعنی ۱/۳ و ۱/۵۵ میکرومتر، به کمک دستگاه OTDR اندازه‌گیری شد [۸ - ۵]

۴-۱- بحث

نتیجه‌ها نشان می‌دهند که در فیبر تولیدی با سرعت کشش بیش از ۱۲۰ متر در دقیقه از پیش‌سازه اول، به دلیل مخدوش شدن ساختار فیبر، اندازه‌گیری پارامترها امکان‌پذیر نبوده و در مقابل، در پیش‌سازه دوم این پدیده در سرعت‌های کم‌تر از ۱۰۰ متر در دقیقه رخ داده است.

از نظر تلفات، کمترین مقدار در فیبر حاصل از پیش‌سازه اول، با سرعت کشش ۱۰ متر در دقیقه بدست آمده است در حالی که در فیبر ساخته شده از پیش‌سازه دوم، سرعت ۱۲۰ متر در دقیقه کمترین تلفات را بدست داده است. مقدار Λ در پیش‌سازه اول، به دلیل نامنظم بودن جایگاه حفره‌ها، قابل اندازه‌گیری نبوده و در پیش‌سازه دوم کمترین مقدار به دست آمده $13/18$ میکرومتر بوده که در مقایسه با مقدار تئوری، بیش از $1/5$ برابر شده است.

تا کنون ساخت فیبرهای کریستال فوتونی فقط با سرعت کشش پایین گزارش شده است [۴]. نتیجه‌های بدست آمده در این تحقیق بیانگر آن است که کشش با سرعت بالا نیز امکان‌پذیر است و می‌توان فیبرهای کریستال فوتونی با تلفات پایین تولید کرد. تلفات بدست آمده در فیبرهای ساخته شده کم‌تر از 12 dB/km بوده است.

۵- تحلیل و مقایسه پارامترهای بدست آمده با روش

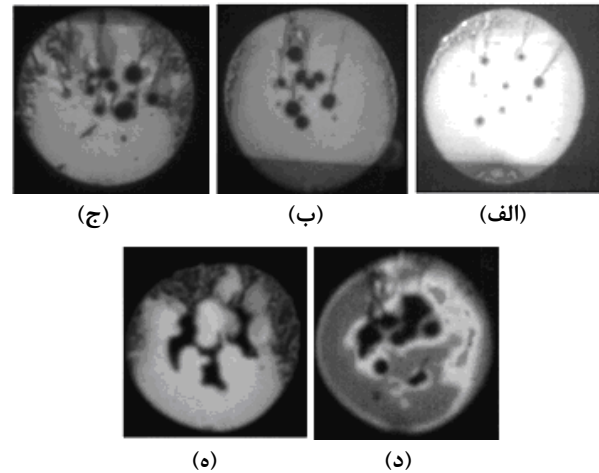
ضریب شکست مؤثر

روش ضریب شکست مؤثر^۴ از ساده‌ترین روش‌های موجود برای محاسبه پارامترهای فیبرهای کریستال فوتونی است. در این روش ابتدا در ناحیه غلاف^۵ یک سلول واحد دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود و سپس با حل معادله‌های ماکسول در این ناحیه و در نهایت با اعمال شرایط مرزی در آن، مقدار ضریب شکست غلاف و سپس یک ضریب شکست مؤثر برای کل فیبر تعیین می‌شود [۹ و ۱۰]. ویژگی‌های فیبرهای کریستال فوتونی مشابه یک فیبر ضریب پله‌ای معمولی، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد و برای تعیین پارامترهای مختلف فیبر کریستال فوتونی از همان رابطه‌های فیبر معمولی ضریب پله‌ای استفاده می‌شود [۱۳ - ۱۱].

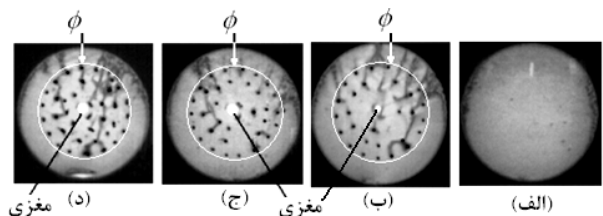
معادله ضریب شکست غلاف پس از حل معادله‌های ماکسول و اعمال شرایط مرزی پیوستگی تابع و مشتق تابع در مرز بین هوا و سیلیکا، بدست می‌آید. حل معادله ماکسول با روش ضریب مؤثر به صورت زیر بدست می‌آید [۸ و ۱۴]:

$$\begin{aligned} \psi &= A I_0(WR), \quad \text{for air hole} \\ &= B J_0(RU) + C Y_0(RU), \quad \text{for silica region} \end{aligned} \quad (5)$$

در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب تصویرهای سطح مقطع فیبرهای تولیدی از پیش‌سازه‌های اول و دوم نشان داده شده‌اند که با سرعت‌های V مختلف کشیده شده‌اند. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که ایجاد حفره‌ها در سطح مقطع فیبر در هر دو حالت وابستگی شدیدی به سرعت کشش پیش‌سازه دارد.



شکل ۲- تصویرهای سطح مقطع‌های فیبرهای تولیدی از پیش‌سازه اول. (الف) $V=5 \text{ m/min}$ (ب) $V=10 \text{ m/min}$ (ج) $V=15 \text{ m/min}$ (د) $V=120 \text{ m/min}$ (ه) $V=150 \text{ m/min}$ [5].



شکل ۳: تصویر سطح مقطع فیبرهای تولیدی از پیش‌سازه دوم. (الف) $V=5, 10, 15 \text{ m/min}$ (ب) $V=100 \text{ m/min}$ ، $\phi=82 \mu\text{m}$ (ج) $V=120 \text{ m/min}$ ، $\phi=83 \mu\text{m}$ (د) $V=150 \text{ m/min}$ ، $\phi=82 \mu\text{m}$ [5, 6].

در پیش‌سازه اول با افزایش سرعت کشش شکل حفره‌ها از حالت دایره‌ای خارج شدند و فاصله بین آن‌ها به هم نزدیک‌تر شده است در صورتی که در پیش‌سازه دوم افزایش سرعت کشش باعث بهبود در ایجاد حفره‌ها شده و در سرعت‌های پایین $5, 10$ و 15 متر در دقیقه حفره‌ها ایجاد نشده‌اند. یکی از دلایل اختلاف نتیجه بین کشش دو پیش‌سازه می‌تواند ناشی از اندازه قطر لوله‌های مویی بکار رفته در آن‌ها باشد. خلاصه نتیجه‌های اندازه‌گیری فیبرهای کریستال فوتونی تولید شده از دو پیش‌سازه در جدول (۱) ارائه شده است [۷].

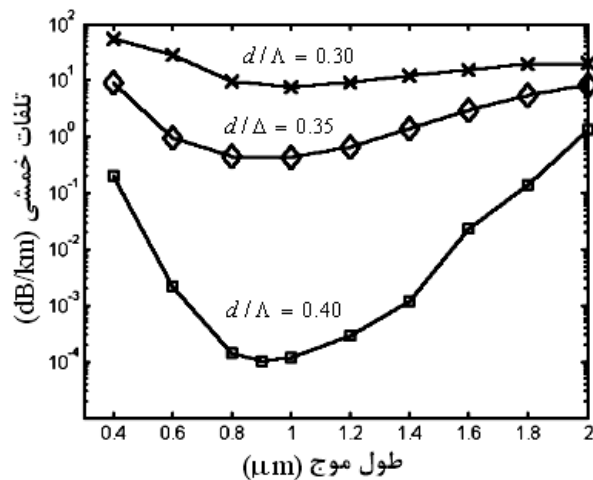
توزیع شدت میدان دور در خروجی فیبر کریستال فوتونی مبتنی بر تحلیل ضریب مؤثر را می‌توان با رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۸، ۱۱ و ۱۳]:

$$I(\theta) = \begin{cases} \frac{U^3 W^2}{(U^2 - \alpha^2)(W^2 + \alpha^2)} \left[J_0(\alpha) - \alpha J_1(\alpha) \frac{J_0(U)}{U J_1(U)} \right]^2, & \text{for } \alpha \neq U \\ \frac{U^3 W^2}{2V_{\text{eff}}^2 U J_1(U)} \left[J_0^2(\alpha) + J_1^2(\alpha) \right]^2, & \text{for } \alpha = U \end{cases} \quad (12)$$

که در آن $\alpha = k_0 \rho_{\text{eq}} \sin \theta$ و شعاع مغزی آن $\rho_{\text{eq}} = 0.64 \Lambda$ که Λ فاصله بین حفره‌های هوا، U و W پارامترهای فیبر کریستال فوتونی برای V_{eff} معین هستند و با رابطه (۷) تعیین می‌شوند.

۵-۱- تعیین تلفات فیبرهای کریستال فوتونی ساخته شده

در بررسی فیبر کریستال فوتونی پارامترهایی نظیر قطر حفره d ، فاصله بین حفره‌ها Λ و کسر پرشدگی هوا d/Λ در سیلیکا حایز اهمیت هستند. در شکل (۴) تلفات خمشی یک فیبر کریستال فوتونی برحسب طول موج با $\Lambda = 2/3 \mu\text{m}$ برای d/Λ مختلف ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش کسر d/Λ تلفات کل در فیبر برحسب طول موج کاهش می‌یابد و منحنی تلفات در هر حالت دارای یک کمینه است [۷].



شکل ۴- تلفات خمشی برحسب طول موج.

۵-۲- نتیجه‌های تجربی

پنج قطعه فیبر حفره‌دار از دو پیش‌ساز آماده شده با سرعت‌های مختلف تولید شده‌اند. نتیجه‌های اندازه‌گیری تلفات فیبرها و کسر d/Λ با تعیین مقدار میانگین قطر حفره‌ها و فاصله بین آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌اند [۵ و ۷].

که در آن J_0, Y_0, I_0 تابع‌های بسل هستند. با اعمال شرایط مرزی در معادله‌ها خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} A I_0(W) &= B J_0(U) + C Y_0(U) \\ B &= \frac{A}{J_0(U)} \left[I_0(W) - \frac{C}{A} Y_0(U) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن U و W به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$U = k_0 a \sqrt{n_s^2 - n_{\text{cl}}^2} \quad (7)$$

$$W = k_0 a \sqrt{n_{\text{cl}}^2 - n_a^2}$$

که در آن n_s و n_{cl} به ترتیب ضریب شکست مغزی و غلاف، a شعاع مغزی، $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ و λ_0 طول موج نور در خلاء است. ضریب‌های ثابت A, B, C با اعمال شرایط مرزی با رابطه‌های زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} A W I_1(W) &= -\frac{A}{J_0(U)} \left[I_0(W) - \frac{C}{A} Y_0(U) \right] - C U Y_1(U) \\ C &= \frac{A [W I_1(W) J_0(U) + U J_1(U) I_0(W)]}{U [J_1(U) Y_0(U) - J_0(U) Y_1(U)]} \end{aligned} \quad (8)$$

$$B = \frac{A}{J_0(U)} \left\{ I_0(W) - \frac{Y_0(U) [W I_1(W) J_0(U) + U J_1(U) I_0(W)]}{U [J_1(U) Y_0(U) - J_0(U) Y_1(U)]} \right\}$$

برای محاسبه تلفات از همان رابطه‌های تلفات فیبر معمولی با ضریب شکست مؤثر و ضریب شکست غلاف استفاده می‌شود که براساس رابطه زیر است [۱۴]:

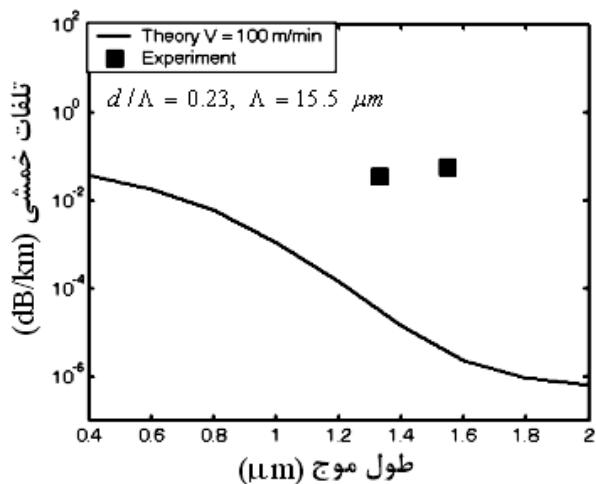
$$\begin{aligned} \alpha \text{ (dB/m)} &= 4.343 \left(\frac{\pi}{4 \rho_{\text{eq}} R_c} \right)^{0.5} \left(\frac{U_{\text{eff}}}{V_{\text{eff}} K_1(W_{\text{eff}})} \right)^2 \left(\frac{1}{W_{\text{eff}}} \right)^{1.5} \\ &\times \exp \left(-\frac{4 R_c W_{\text{eff}}^3 \Delta_{\text{eff}}}{3 \rho_{\text{eq}} V_{\text{eff}}^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن R_c شعاع خمش و $U_{\text{eff}}, V_{\text{eff}}, W_{\text{eff}}$ پارامترهای فیبر، ρ_{eq} شعاع مغزی و Δ_{eff} اختلاف نسبی مؤثر ضریب شکست بین مغزی و غلاف در فیبر کریستال فوتونی است.

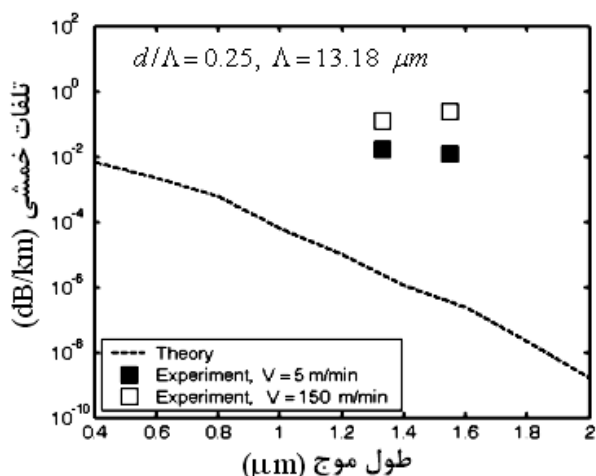
برای محاسبه گشودگی عددی و بسامد مؤثر نیز از رابطه‌های مشابه فیبرهای استاندارد استفاده می‌کنیم [۱۲]:

$$NA = \sqrt{n_s^2 - n_{\text{cl}}^2} \quad (10)$$

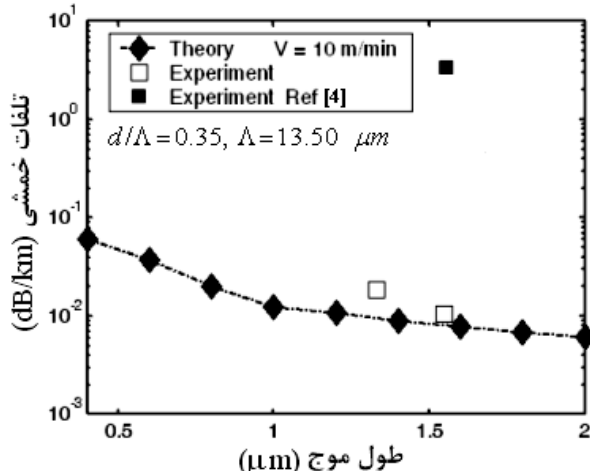
$$V_{\text{eff}} = k_0 \rho_{\text{eq}} \sqrt{n_s^2 - n_{\text{cl}}^2} \quad (11)$$



شکل ۶- تلفات خمشی فیبر شماره (۳) برحسب طول موج و نتیجه‌های تجربی بدست آمده.



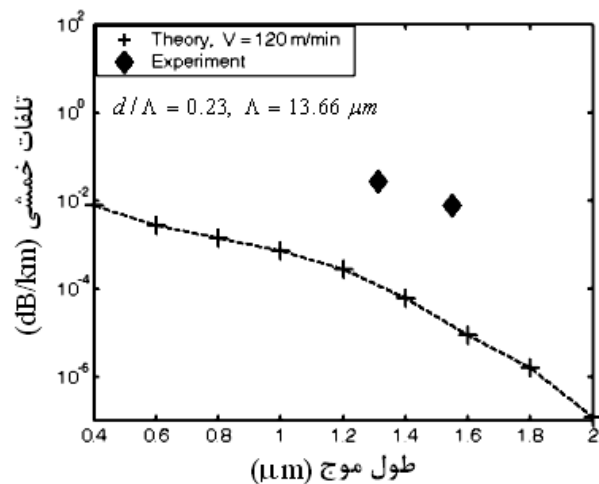
شکل ۷- تلفات خمشی فیبرهای (۱) و (۵).



شکل ۸- مقایسه تلفات خمشی فیبر (۲) با نمونه مشابه مرجع [۴].

شکل‌های (۵) و (۶) مقایسه منحنی‌های تجربی و نظری تلفات خمشی برحسب طول موج مربوط به فیبرهای (۴) و (۳) را نشان می‌دهند. کسر پرشدگی هوا برای فیبرهای (۳) و (۴) از پیش‌سازه (۲) برابر است ولی فاصله بین حفره‌هایشان Λ متفاوت است. فیبر (۴) با Λ کوچک‌تر، دارای تلفات کم‌تری نسبت به فیبر (۳) است. همچنین، فیبرهای (۱) و (۵) به‌ترتیب از پیش‌سازه‌های (۱) و (۲) دارای کسر پرشدگی یکسانی هستند و به‌دلیل برابری فاصله بین حفره‌ها در این دو فیبر، منحنی‌های تلفات آن‌ها برای مقایسه با منحنی نظری در یک محور مختصات در شکل (۷) ترسیم شده‌اند. با توجه به تصویرهای شکل (۲) مشاهده می‌شود که در فیبر (۱) یکی از حفره‌ها در مغزی قرار گرفته است و فیبر فقط دارای یک ردیف حفره در غلاف است [۵ و ۶]. این دو مورد باعث شده که تلفات به مقدار قابل ملاحظه‌ای در این فیبر بالا برود و تا حدی از مقدار پیش‌بینی شده نظری فاصله داشته باشد. همین مورد را در فیبر شماره (۳) در شکل (۳) نیز می‌توان مشاهده کرد.

از میان فیبرهای ساخته شده بیش‌ترین کسر پرشدگی مربوط به فیبر (۲) است و همان‌طوری که مقدار نظری پیش‌بینی می‌کند کمترین تلفات در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر مربوط به همین فیبر است و این در حالی است که این فیبر تنها دارای یک ردیف از حفره هوا بر کم بودن تعداد ردیف‌های حفره غلبه پیدا کرده است. در شکل (۸) منحنی تلفات تجربی با منحنی نظری مقایسه شده‌اند که تقریباً بر هم منطبق هستند. نتیجه تجربی بدست آمده با نتیجه مشابه در مرجع [۴] نیز مقایسه شده است.



شکل ۹- تلفات خمشی برحسب طول موج و نتایج تجربی بدست آمده از فیبر (۴).

۵-۳- بحث و بررسی نتیجه‌های تجربی

در فیبر شماره (۲) که از نظر مشخصات نسبت به فیبرهای دیگر مطلوب‌تر است، مشاهده می‌شود که افزایش سرعت کشش پیش‌سازه (۱) باعث بزرگ شدن حفره‌ها شده که این خود باعث پایین آمدن تلفات شده است. این امر بیانگر آن است که برای داشتن حفره‌های بزرگ‌تر نیازی به تغییر ابعاد لوله‌های مویین نیست، بلکه با افزایش سرعت کشش این پدیده میسر خواهد بود. فیبر شماره (۵) نسبت به فیبرهای دیگر دارای حفره‌های منظم‌تری است و با برخورداری از سه ردیف کامل حفره‌ها، در ردیف دوم ۱۲ حفره و در ردیف سوم ۱۸ حفره دارد و از این نظر شباهت زیادی به مدل نظری پیدا می‌کند. این مسأله باعث شده است که تلفات آن در حدود تلفات فیبر (۲) قرار گیرد. همین وضعیت در فیبر (۴) نیز مشاهده می‌شود.

تلفات خمشی در فیبر حفره‌دار به صورت یک سهمی است که دارای دلبه در طول موج‌های بلند و کوتاه است و نسبت به فیبر معمولی که تنها دارای یک لبه است، در بازه وسیع‌تری بکار می‌رود، شکل (۴). لبه اول که در طول موج‌های کوتاه‌تر به وجود می‌آید به این علت است که نور در طول موج‌های کوتاه که در حد ابعاد قطر حفره باشد، به شدت در داخل حفره‌ها تضعیف می‌شود. به همین دلیل اختلاف ضریب شکست بین مغزی و غلاف بسیار کاهش یافته و باعث افزایش تلفات و ایجاد لبه اول می‌شود. لبه دیگری که در انتهای سهمی دیده می‌شود مشابه فیبر معمولی است.

کمینه سهمی تلفات در نزدیکی $\Lambda/2$ رخ می‌دهد. در فیبرهایی که Λ بزرگی دارند بازه وسیع‌تری برای استفاده وجود دارد. به‌طور مثال، اگر بخواهیم که کمینه تلفات در این فیبر با سایر ادوات مخابراتی هماهنگی داشته باشد باید Λ را در بازه $2/8$ تا $2/5$ میکرومتر طراحی کرد.

برای نتیجه‌گیری در مورد دو نوع پیش‌سازه ساخته شده می‌توان گفت که پیش‌سازه (۲) سطح مقطع غلاف را در مقایسه با نسبت کامل‌تری می‌پوشاند و از این جهت ارجحیت بیش‌تری به پیش‌سازه (۱) دارد. از سوی دیگر در پیش‌سازه (۱) در سرعت‌های پایین‌تر، فیبر با حفره‌های بزرگ‌تر بدست آمده که در کاهش تلفات کمک قابل ملاحظه‌ای کرده است. شاید بتوان گفت در مجموع تلفاتی از این پارامترهای ساخت این دو پیش‌سازه ما را به مدل مطلوبی که هر دو امتیاز را دارا باشد رهنمون می‌سازد.

۶- اندازه‌گیری گشودگی عددی، بسامد بهنجار و**توزیع شدت میدان فیبرهای کریستال فوتونی**

یکی از پارامترهای تعیین کننده در فیبرهای کریستال فوتونی کسر پرشدگی هوا (d/Λ) در ناحیه غلاف است. در شکل (۹) نمودارهای گشودگی عددی برحسب طول موج برای $\Lambda=2/3$ و مقادیرهای مختلف d/Λ ترسیم شده‌اند.

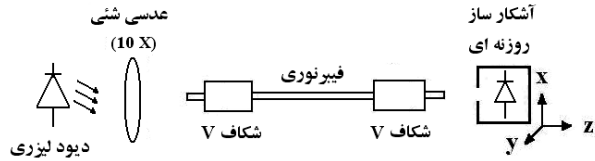
در طول موج‌های بلندتر، با افزایش نسبت d/Λ گشودگی عددی افزایش می‌یابد در حالی که طول موج‌های کوتاه‌تر عکس آن اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، با افزایش ابعاد حفره‌ها، چون درصد هوا نسبت به ماده سیلیکا در غلاف افزایش می‌یابد ضریب شکست غلاف کم می‌شود و بنابراین گشودگی عددی افزایش می‌یابد [۱۵].

در شکل (۱۰)، نمودارهای گشودگی عددی برحسب d/Λ برای بازه طول موج از $0/6$ تا $1/55$ میکرومتر ترسیم شده‌اند. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش نسبت d/Λ گشودگی‌های عددی متناظر برحسب طول موج افزایش یافته‌اند. بدین ترتیب با کنترل قطر حفره‌های هوا موجود در غلاف می‌توان گشودگی عددی فیبر را متناسب با کاربرد تغییر داد.

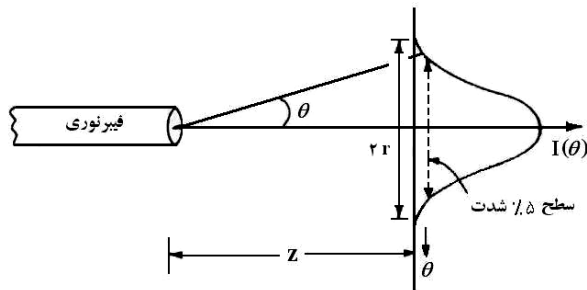
کمیت مهم دیگر مقدار بسامد بهنجار مؤثر V_{eff} است که تک مد بودن طول موج‌های مختلف را در فیبر نوری کریستال فوتونی تعیین می‌کند. در شکل (۱۱)، منحنی‌های V_{eff} برحسب طول موج با پارامتر d/Λ نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که مقدار V_{eff} نیز تابع کسر پرشدگی هوا d/Λ است. با تغییر قطر حفره‌های هوا و یا فاصله بین آن‌ها، بازه تک مد بودن فیبر را می‌توان تغییر داد [۱۵].

۶-۱- چینی آزمایش و نتیجه‌های تجربی

برای پیاده‌سازی روش ضریب مؤثر برای اندازه‌گیری NA در فیبر کریستال فوتونی، از چینی آزمایش شکل (۱۲) استفاده کردیم که در آن یک آشکارساز روزنه‌ای روی یک مکان‌یاب میکرونی نصب شده که در سه جهت x ، y و z می‌تواند حرکت کند. نور یک دیود لیزری توسط یک عدسی شیئی با بزرگنمایی 10X وارد فیبر می‌شود. در شکل (۱۳) نمودار میدان دور در عرض خروجی فیبر نشان داده شده که با تغییر زاویه θ بدست آمده است. با داشتن فاصله آشکارساز از انتهای خروجی فیبر (z)، شعاع (r) و تغییر زاویه θ ، گشودگی عددی در نقطه 5% توان خروجی با رابطه تقریبی $NA \cong \tan \theta = \sin \theta = r/z$ محاسبه می‌شود [۱۲].



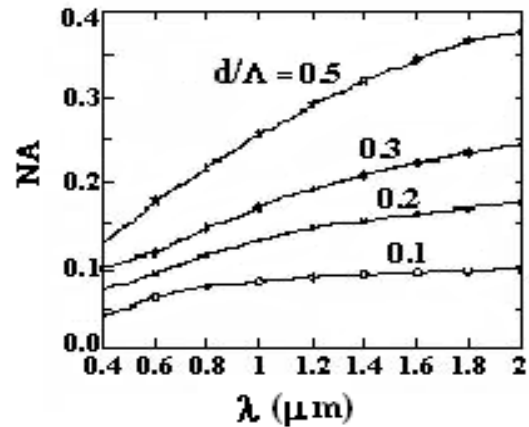
شکل ۱۲- چینش آزمایش برای اندازه‌گیری گشودگی عددی فیبر نوری کریستال فوتونی [۱۳ و ۱۵].



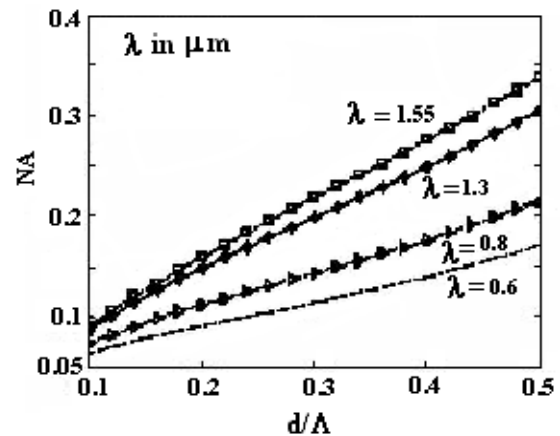
شکل ۱۳- نمودار میدان دور و زاویه پرتو خروجی از فیبر تحت آزمایش [13, 15].

با استفاده از چینش آزمایش شکل (۱۲)، اندازه‌گیری گشودگی عددی دو فیبر کریستال فوتونی شماره ۳ و ۴ در راستای x و y انجام گرفته است [۵ و ۷]. با داده‌های ثبت شده منحنی‌های تجربی گشودگی عددی دو فیبر در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) برحسب طول موج ترسیم شده‌اند و هر یک را با منحنی نظری مطابق با رابطه (۱۰) مقایسه کرده‌ایم. منحنی‌های با خط پیوسته نمودارهای نظری هستند. مطابق پیش‌بینی‌های نظری، عملاً با افزایش طول موج، گشودگی‌های عددی فیبرهای مورد مطالعه نیز افزایش یافته‌اند. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) بسامد بهنجار مؤثر این دو فیبر را به‌طور تجربی (نقطه‌های توپر) و نظری (خط پیوسته) نشان می‌دهند.

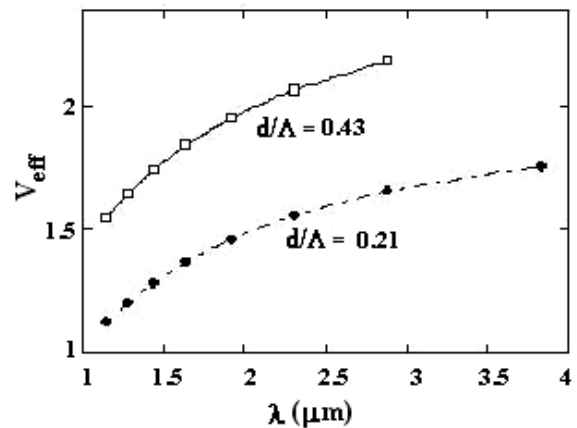
مبتنی بر توزیع شدت میدات دور در رابطه (۱۲)، در نتیجه‌های آزمایش‌های انجام شده مشاهده شده که در طول موج‌های کوتاه، شدت نور به‌صورت مدهای نشی به داخل غلاف توزیع شده است، در صورتی‌که در طول موج‌های بلند، نور بیش‌تر داخل مغزی محصور شده است. این پدیده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری برای طول موج ۶۳۳ و ۱۳۱۰ نانومتر در شکل (۱۸) نشان داده شده است [۷ و ۱۵]. چنین پدیده‌ای در مرجع [۴] نیز گزارش شده است.



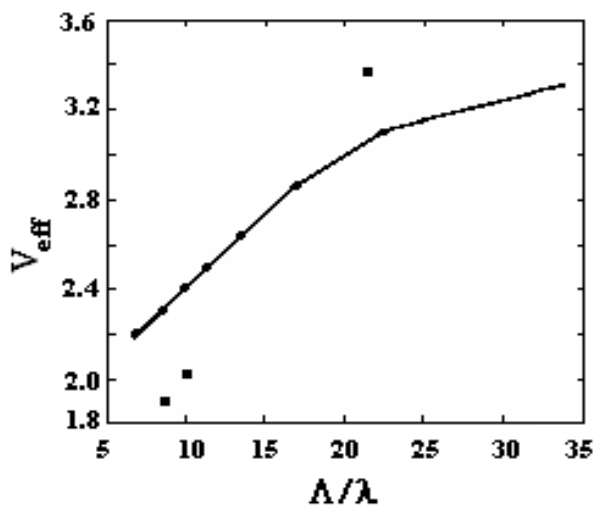
شکل ۹- گشودگی عددی بر حسب طول موج برای d/Λ متفاوت.



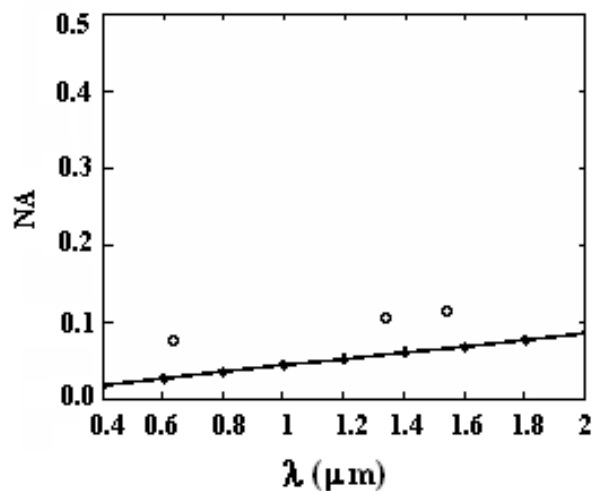
شکل ۱۰- گشودگی عددی بر حسب d/Λ برای طول موج‌های مختلف.



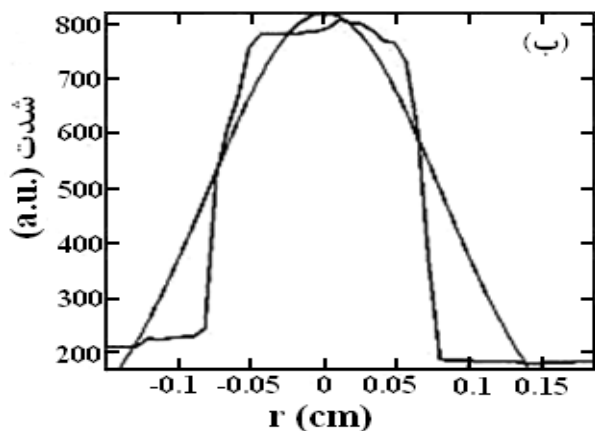
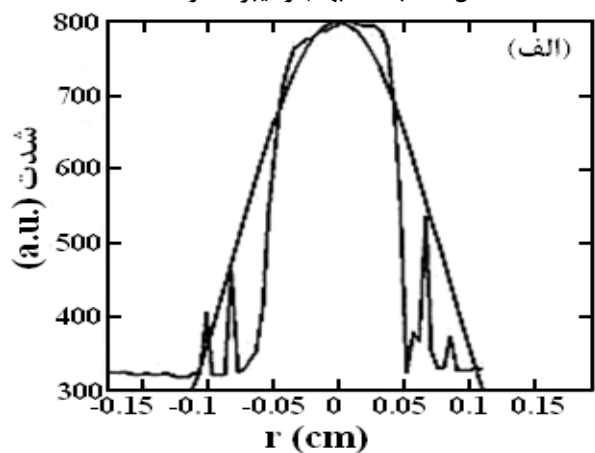
شکل ۱۱- بسامد قطع برحسب طول موج برای دو مقدار متفاوت d/Λ



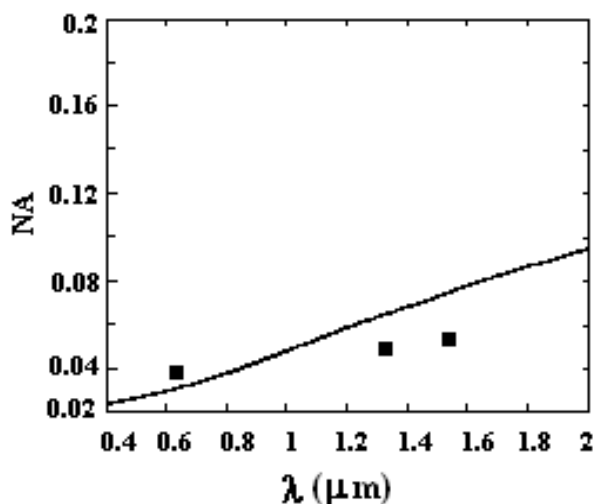
شکل ۱۷- بسامد بهنجار فیبر شماره (۴) [۶].



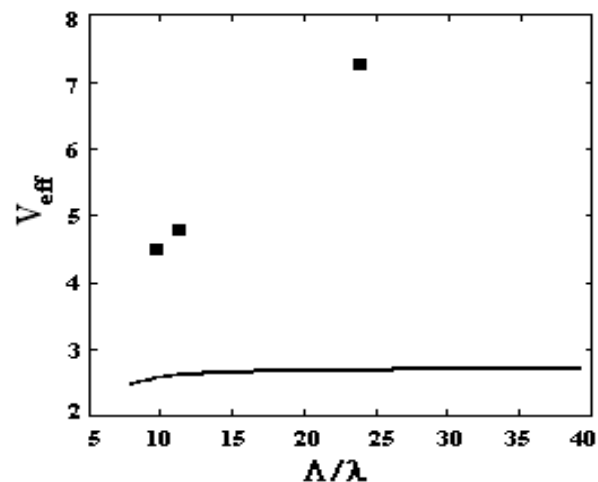
شکل ۱۴- گشودگی عددی فیبر شماره (۳) [۶].



شکل ۱۸- توزیع شدت میدان دور اندازه گیری شده (الف) در طول موج ۶۳۳ نانومتر و (ب) در طول موج ۱۳۱۰ نانومتر [۶ و ۱۴]



شکل ۱۵- گشودگی عددی فیبر شماره (۴) [۶].



شکل ۱۶- بسامد بهنجار فیبر شماره (۳) [۶].

۷- نتیجه گیری

در این مقاله فیبرهای نوری کریستال فوتونی طراحی و با سرعت بالا ساخته شدند و نتیجه‌های به دست آمده با روش ضریب

طول موج‌های بلند، میدان نور بیش‌تر در مغزی فیبر و در طول موج‌های کوتاه به‌صورت مدهای نشتی در غلاف منتشر می‌شود. نتیجه‌های بدست آمده نشان داده که این پدیده منجر به اثرگذاری مهمی در گشودگی عددی و بسامد بهنجار فیبرهای نوری کریستال فوتونی می‌شود. همچنین نشان داده شده که این دو پارامتر وابستگی مستقیم به حفره‌های هوا و فاصله بین آن‌ها در نوع فیبرها دارند. نتیجه‌های اندازه‌گیری پارامترها توافق خوبی با تحلیل نظری داشته‌اند.

شکست مؤثر تحلیل و مقایسه شده‌اند. نتیجه‌های ساخت نشان می‌دهند که فیبرهای تولید شده با سرعت بالا از کیفیت نسبتاً مطلوبی برخوردار هستند. تلفات به‌دست آمده کم‌تر از ۱۲ dB/km بوده که در مقایسه با نتیجه‌های موجود در مراجع، نتیجه قابل ملاحظه‌ای است.

با تحلیل پارامترهای فیبرهای کریستال فوتونی ساخته شده نشان داده شد که کم‌ترین فاصله بین حفره‌ها در فیبرهای ساخته شده منجر به کاهش تلفات در فیبرهای حفره‌دار می‌شود. گشودگی عددی و بسامد بهنجار مؤثر فیبرهای نوری کریستال فوتونی به‌طور تجربی در طول موج‌های کوتاه و بلند اندازه‌گیری شده‌اند. به‌طور نظری و تجربی نشان داده شده که در فیبرهای کریستال فوتونی، در

جدول ۱- خلاصه نتیجه‌های بدست آمده از فیبرهای کریستال فوتونی تولیدی [۷].

طول فیبر (m)	تلفات (dB/km)		Λ (um)	قطر مغزی (um)	قطر غلاف (um)	قطر فیبر (um)	سرعت کشش (m/min)	پیش‌سازهای ساخته شده
	در ۱/۳ (um)	در ۱/۵۵ (um)						
۱۰۸۴	۱۳۲	۲۴۹	*	*	*	۱۱۹	۵	پیش‌ساز اول
۹۶۰	۱۸/۵۶	۱۰/۶۶	*	*	*	۱۱۹	۱۰	
۴۹۰	۳۵/۴۳	۵۷/۳۶	۱۵/۶۶	-	۸۲	۱۲۴	۱۰۰	پیش‌ساز دوم
۸۰۰	۱۷/۷۲	۱۱/۶۳	۱۳/۵۰	۱۴/۵۰	۸۳	۱۲۴	۱۲۰	
۷۳۰	۱۷/۵۹	۱۱/۷۸	۱۳/۱۸	۱۴	۸۲	۱۲۴	۱۵۰	

جدول ۲- نتیجه‌های اندازه‌گیری تلفات فیبرهای کریستال فوتونی ساخته شده.

تلفات در ۱۵۵۰ nm (dB/m)	تلفات در ۱۳۰۰ nm (dB/m)	d/ Λ	سرعت کشش (m/min)	پیش‌ساز	فیبرهای تولید شده
۰/۲۴۹	۰/۱۳۲	۰/۲۶	۵	(۱)	فیبر (۱)
۰/۰۱۰۶۶	۰/۰۱۸۵۶	۰/۳۵	۱۰	(۱)	فیبر (۲)
۰/۰۵۷۳۶	۰/۰۳۵۴۳	۰/۲۳	۱۰۰	(۲)	فیبر (۳)
۰/۰۱۱۶۳	۰/۰۱۷۷۲	۰/۲۳	۱۲۰	(۲)	فیبر (۴)
۰/۰۱۱۷۸	۰/۰۱۷۵۹	۰/۲۶	۱۵۰	(۲)	فیبر (۵)

"Fiber With Photonic Crystal Cladding", Opt. Lett., Vol. 21, No.19, pp. 1547 - 1549, 1996.

- [3] T.M. Monro, D.J. Richardson; "Holey Optical Fibres: Fundamental Properties and Device Applications", C. R. Physique, Vol. 4, pp. 175-186, 2003.

۸- مراجع

- [1] P.St. J. Russell, T.A. Birks, J.C. Knight, R. F. Cregan, J.-P. De Sandro; "Silica/Air Photonic Crystal Fibres", Jap. J. Appl. Phys, 37 Suppl. 37-1, pp. 45 - 48, 1998.
- [2] J.C. Knight, T.A. Birks, P.St. J. Russell, D.M. Atkin; "All-Silica Single-Mode Optical

Method", Proc. 12th Optic and Photonics Conf. Iran, Shiraz Univ., Feb 2006.

۹- پی‌نوشت‌ها

-
- 1- Holey Fiber
 - 2- Photonic Crystal Fiber (PCF)
 - 3- Air-Silica Fiber
 - 4- Effective Index Method
 - 5- Cladding

- [4] J.B. Eom, K.W. Park, T.J. Eom, Y. Chung, W.T. Han, U.C. Paek, B.H. Lee; **"Transmission and Numerical Aperture Measurement of Photonic Crystal Fiber"**, OECC 2001, Post Deadline PDP2.05, 2001.
- [5] F.E. Seraji, A.R. Hassani, N. Granpayeh, M.S. Zabihi, A.R. Bahrapour, H. Amiri, **"Design and Fabrication of Holey Fibres"**, Proc. 10th Photonics Conf. Iran, Kerman, pp. 64 - 66, 28 - 29 Jan. 2004.
- [6] F.E. Seraji, M. Rashidi, M. Karimi; **"Characteristics of Holey Fibers Fabricated at Different Drawing Speeds"**, Chinese Opt. Lett., Vol. 5, Issue 3, pp. 131-134, 2007.
- [7] F.E. Seraji, M. Rashidi, M. Karimi; **"Analysis and Comparison of Attenuation of Fabricated Holey Fibres by Effective Refractive Index Method"**, Proc. 11th Optics and Photonics Conf. Iran, Shahid Beheshti Univ., Tehran, pp. 276-280, 2 - 3 Feb 2005.
- [8] 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, pp. 442-445, 2006.
- [9] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou, A. Bjarklev; **"A New Class of Optical Waveguides"**, Optical Fiber Technol., Vol 5, pp. 305 - 330, 1999.
- [10] T.M. Monro, D.J. Richardson, N.G.R. Broderick, P. J. Bennett; **"Holey Optical Fibers: An Efficient Modal Model"**, IEEE J. Lightwave Technol, Vol.17, No. 6, pp.1093, 1999.
- [11] S.K. Varshney, R.K. Sinha; **"Characterization of Photonic Crystal Fibers from Far Field Measurements"**, J. Micro. Optoelectron., Vol. 2, No. 6, Dec 2002.
- [12] N.A. Mortensen, J. R. Folken, P. M. W. Skovgaard, J. Broeng; **"Numerical Aperture of Single-Mode Photonic Crystal Fibers"**, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 14, No. 8, pp. 1094-1096, 2002.
- [13] A. Ghatak, K. Thyagarajan, **Introduction to Fiber Optics**, Cambridge University Press, New Delhi, 2002.
- [14] R.K. Sinha, M.P. Sing, S.K. Varshney; **"Propagation Characteristics of Photonic Crystal Fibers"** J. Optical Commu., Vol. 24, No. 5, pp 192 - 198, 2003.
- [15] M. Rashidi, F.E. Seraji; **"Measurement of Numerical Aperture and Normalized Frequency of Photonic Crystal Fibers with Analysis Based on Effective Index**