

تحلیل و بهینه‌سازی تلفات پیوندگاه فیبرهای نوری تک‌مد و ادوات مبتنی بر فیبرهای کریستال فوتونی در شبکه‌های مخابرات نوری

سمیرا فارسی نژاد^۱، فرامرز اسماعیلی سراجی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، samira_farsinezhad@itrc.ac.ir

۲- استادیار، پژوهشکده فناوری ارتباطات، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، feseraji@itrc.ac.ir

چکیده

به دلیل گسترش روز افزون ادوات نوری مبتنی بر فیبرهای کریستال فوتونی در شبکه‌های مخابرات نوری، اتصال فیبرهای معمولی محیط انتقال به این نوع ادوات بیش از پیش مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به پیوندگاه فیبرهای معمولی و فیبرهای کریستال فوتونی، در این مقاله مد پایه غلاف و مغزی با روش‌های ضریب مؤثر اسکالر و تمام برداری محاسبه شده و نتیجه‌های بدست‌آمده با روش اختلاف محدود در حوزه فرکانس مقایسه شده‌اند. سپس با در نظر گرفتن تقریب گوسی و استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی فوق اثرات خمش و ناهم‌راستایی عرضی در نقطه پیوندگاه فیبرهای تک‌مد و کریستال فوتونی بررسی شده‌اند. بر اساس نتیجه‌های بدست‌آمده از تحلیل ارائه شده، راه‌کاری برای بهینه‌سازی تلفات نقطه پیوندگاه فیبرهای ناهم‌سان پیشنهاد کرده‌ایم که مشابه آن تا کنون گزارش نشده است.

واژه‌های کلیدی

زاویه بحرانی خمش پیوندگاه، ضریب مؤثر اسکالر و تمام برداری، فیبر تک‌مد، فیبر کریستال فوتونی، اختلاف محدود حوزه فرکانس.

۱- مقدمه

اخیراً به دلیل نیاز روز افزون ادوات نوری، اتصال فیبر تک‌مد معمولی به فیبر کریستال فوتونی مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از روش‌های مختلف چون استفاده از عدسی، مخروطی کردن انتهای فیبر و استفاده از اتصال‌گرها توانسته‌اند میزان تلفات را به کمینه مقدار برسانند [۱،۲].

در این مقاله به محاسبه مد پایه غلاف و مغزی و معرفی روش‌های مناسب می‌پردازیم [۳]. سپس با در نظر گرفتن تقریب گوسی و استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی ضریب مؤثر اسکالر [۴]، تمام برداری [۵] و اختلاف محدود حوزه فرکانس^۱ به بررسی اثرات خمش و ناهم‌راستایی عرضی بر نقطه پیوندگاه فیبرهای تک‌مد و کریستال فوتونی می‌پردازیم [۶،۷].

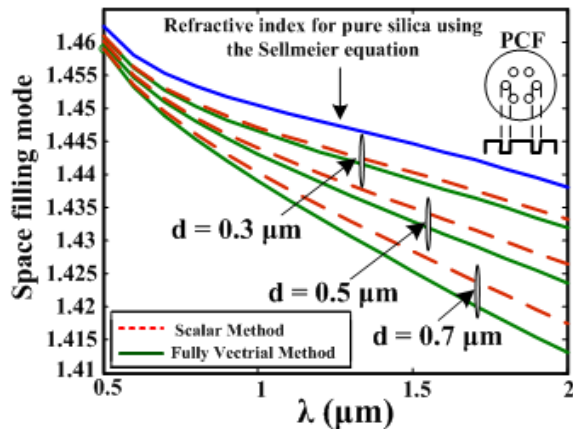
بر اساس نتیجه‌های بدست‌آمده از تحلیل ارائه شده از پارامترها، راه‌کاری برای بهینه‌سازی تلفات نقطه پیوندگاه پیشنهاد کرده‌ایم که مشابه آن تا کنون گزارش نشده است.

فیبر کریستال فوتونی^۱، فیبری تمام سیلیکایی با حفره‌های هوا، به قطر d با آرایه منظم شش ضلعی هستند که فاصله بین حفره‌های مجاور به اندازه Λ است. به طور کلی، دو نوع فیبر کریستال فوتونی وجود دارد، یکی مغزی تهی^۲ و دیگری مغزی پُر^۳. ویژگی تک‌مدی گسترده ESM^۴ این فیبرها سبب کاربرد زیاد آن‌ها در شبکه‌ها مخابرات نوری شده است.

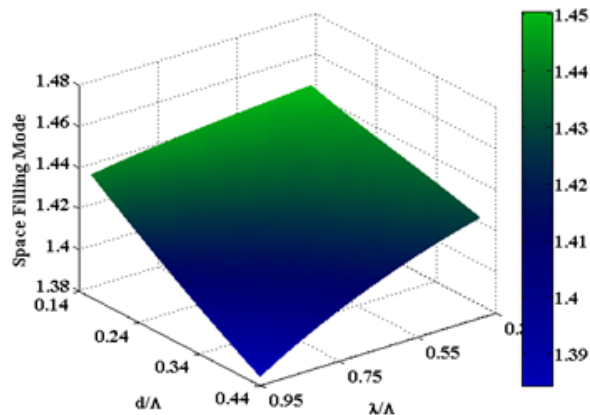
به منظور افزایش سطح مؤثر مدی (A_{eff}) در این فیبرها می‌توان با تغییر پارامترهای Λ و d/Λ ، ضریب شکست و شعاع مغزی آنها را کنترل کرد، بدون این‌که در خاصیت تک‌مدی این فیبرها اختلالی ایجاد شود.

در مقابل، در فیبرهای تک مد^۵ معمولی به منظور افزایش سطح مؤثر مدی با افزایش شعاع مغزی باید از اختلاف ضریب شکست بین مغزی و غلاف کاسته شود، تا ویژگی تک‌مدی آنها از بین نرود که عملاً امکان‌پذیر نیست.

در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش‌های SEIM و FVEIM در محاسبه n_{eff} در طول موج‌های بالا ضعیف عمل می‌کنند.



شکل ۱- تعیین مد پایه‌ی غلاف با روش‌های اسکالر و برداری برای $\Lambda = 2/3 \mu m$ در مقادیرهای متفاوت d .



شکل ۲- تعیین مد پایه غلاف برحسب پارامترهای d/Λ و λ/Λ با روش FVEIM برای $\Lambda = 2/3 \mu m$.

جدول ۱- مقایسه ضریب شکست مؤثر با روش‌های مختلف.

λ (nm)	[γ^2] FEM	DFD	FVEIM	SEIM
۱۴۵۰	۱/۴۴۵۳۹	۱/۴۴۵۳۴	۱/۴۴۷۵۵	۱/۴۴۷۶۱
۱۵۵۰	-	۱/۴۴۴۶۹۸	۱/۴۴۷۲۲	۱/۴۴۷۲۹

مقدار n_{SFM} و n_{eff} محاسبه شده در فیبر ناخمیده برای فیبر خمیده صادق نیست و باید شرط زیر را بر آن اعمال کرد:

$$n_b^2(x, y) = n_s^2(x, y) \left(1 + \frac{2y}{R}\right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $n_b(x, y)$ ضریب مؤثر غلاف فیبر خمیده، $n_s(x, y)$ ضریب مؤثر غلاف فیبر ناخمیده، y جهت خمش و R شعاع بزرگ-خمش فیبر است [۹].

۲- محاسبه مد پایه غلاف و مغزی با روش‌های اسکالر و

تمام برداری

محاسبه پارامتر ضریب شکست پرشدگی فضا n_{SFM} نقش مهمی در طراحی پارامترهای فیبر کریستال فوتونی دارد، زیرا معرف محدوده-ی تک‌مدی در این فیبرها است $[\Lambda]$ و به صورت $n_{SFM} = \beta_{SFM}/k$ تعریف می‌شود که k بردار موج در فضای آزاد و β_{SFM} ثابت انتشار موج است. با محاسبه n_{SFM} و ضریب شکست مؤثر غلاف n_{eff} الگوی میدان مد، شدت، گشودگی عددی، اندازه لکه و دیگر پارامترها در فیبر PCF قابل محاسبه هستند [۴،۵].

در فیبر PCF به‌علت پیچیدگی شرایط مرزی حاصل از وجود حفره‌های هوا در غلاف استفاده از روش‌های تحلیلی برخلاف فیبرهای تک‌مد معمولی، پیچیده است. اما نظم حفره‌های هوا این امکان را می‌دهد تا غلاف را با یک ضریب شکست میانگین، معادل یک فیبر ضریب پله‌ای در نظر گرفت. با در نظر گرفتن تقریب پله‌ای و شرط مرزی نیومان در معادله‌های ماکسول، معادله مشخصه مد پایه مغزی و غلاف با روش SEIM محاسبه می‌شود. با استفاده هم‌زمان میدان الکتریکی و مغناطیسی در توزیع ماتریسی، روش SEIM را می‌توان به روش FVEIM تعمیم داد، که در نتیجه این کار معادله‌های مشخصه‌ها پیچیده‌تر می‌شوند [۴،۹،۱۰].

نتیجه شبیه‌سازی مد پایه غلاف در PCF ناخمیده با دو روش EIM اسکالر و برداری در شکل (۱) نشان داده شده است. با افزایش اندازه‌ی حفره‌های هوا و طول موج از دقت روش اسکالر کاسته می‌شود. با مقایسه روش FVEIM با روش موج تخت [۶] نتیجه‌های بدست آمده برای n_{SFM} کاملاً یکسان هستند و نشان می‌دهد که روش FVEIM می‌تواند با برخورداری از سادگی محاسباتی یک روش مناسب برای تعیین n_{SFM} باشد.

با ترسیم مد پایه غلاف مبتنی بر روش برداری FVEIM برحسب d/Λ و λ/Λ در شکل (۲)، مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج و نسبت پرشدگی هوا (d/Λ)، از ضریب شکست مد پایه غلاف در فیبر ناخمیده کاسته می‌شود.

روش ضریب برداری با این که در محاسبه مد پایه غلاف قوی عمل می‌کند، اما در توصیف برخی پارامترها چون n_{eff} ضعیف است و به روش‌های قوی‌تری مانند FDFD نیاز است [۱۱]. این روش بر پایه گسسته‌سازی فضائی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و میانگین‌گیری از ثابت گذردهی در دو گره مجاور بنیان‌گذاری شده است [۶].

با اعمال شرط مرزی PML^{۱۱} بر معادله‌های ماکسول ضریب شکست مؤثر مغزی قابل محاسبه است [۷]. نتیجه‌های شبیه‌سازی فیبر PCF ناخمیده برای $\Lambda = 6/75 \mu m$ و $d = 2/5 \mu m$ با چهار روش،

۳- اثر خمشی بر اندازه لکه

اندازه لکه مد^{۱۱} از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در طراحی یک پیوند نوری است که در تعیین تلفات خمشی و تلفات نقطه اتصال مورد استفاده قرار می‌گیرد. تلفات ناشی از ناطبیتی در پیوندگاه با رابطه‌ی زیر موسوم به پترمان-۲ تعیین می‌شود [۸]:

$$w_{pII} = a_{eff} \sqrt{2} \left[\frac{J_1(U_{eff})}{W_{eff} J_0(U_{eff})} \right] \quad (2)$$

در رابطه بالا J_0 و J_1 به ترتیب بسل نوع اول مرتبه صفر و یک هستند و a_{eff} شعاع مؤثر فیبر، U_{eff} و W_{eff} پارامترهای مؤثر فیبر هستند که با رابطه‌های زیر تعریف شده‌اند:

$$U_{eff} = k_0 a_{eff} \sqrt{n_{co}^2 - n_{eff}^2} \quad (3)$$

$$W_{eff} = k_0 a_{eff} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{SFM}^2}$$

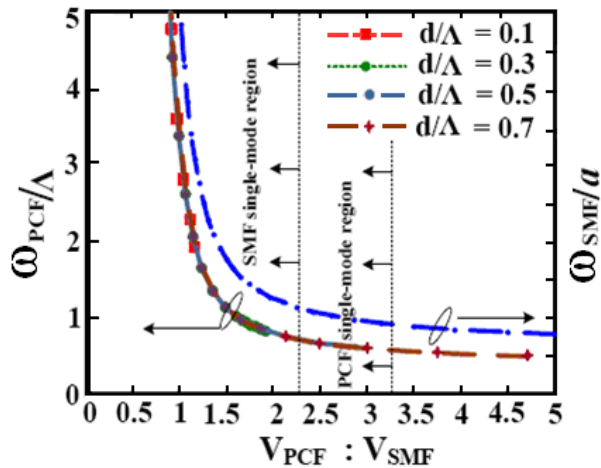
که در آن n_{co} ضریب شکست مغزی و $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ عدد موج و λ_0 طول موج کار است. با ترسیم اندازه لکه فیبرهای PCF و SMF ناخمیده از رابطه (۲) برحسب بسامد بهنجار مشاهده می‌شود که MFD به‌طور مستقیم به بسامد بهنجار وابسته است [۱۳]. در نتیجه نقش تعیین‌کننده‌ی در محاسبه اندازه لکه‌ها دارد [۲،۹].

با در نظر گرفتن تقریب پله‌ای و گوسی [۱۴] رابطه اندازه لکه ω_0 برحسب بسامد بهنجار از رابطه زیر قابل محاسبه است که با رابطه مربوط به فیبرهای ضریب پله‌ای^{۱۱} انطباق دارد [۱۴،۱۵]:

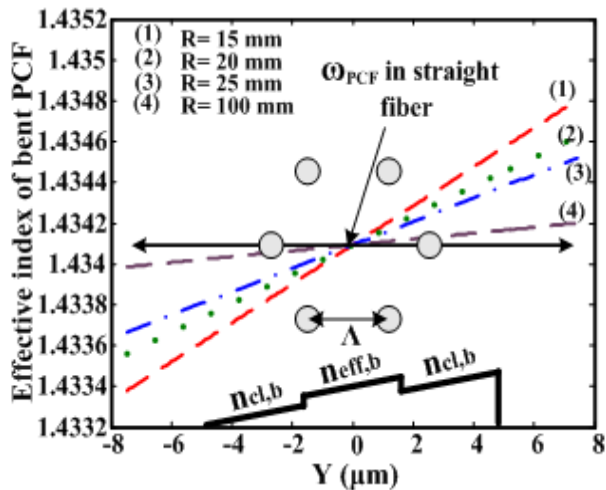
$$\frac{\omega_0}{\Lambda} = \frac{0.489}{V_{eff}^{1/5}} + \frac{0.913}{V_{eff}^{3/2}} + \frac{0.762}{V_{eff}^6} \quad (4)$$

که در آن V_{eff} بسامد بهنجار در فیبرهای کریستال فوتونی است. مطابق شکل (۳)، با ترسیم اندازه لکه برای مقادیر متفاوتی از Λ و d/Λ مشاهده می‌شود که در مقادیر بالای Λ باید پارامتر d/Λ بالا و در مقادیر پایین Λ ، d/Λ کم باشد تا فیبر کریستال فوتونی از حالت تک‌مدی خارج نشود. از طرفی با افزایش بسامد بهنجار (دارای وابستگی مستقیم به n_{SFM} است) و یا طول موج، مقدار اندازه لکه کاهش می‌یابد، در طول موج‌های بلندتر نفوذ میدان به حفره‌های هوا کم‌تر می‌شود. در نتیجه ضریب شکست مؤثر غلاف کم و ضریب شکست مؤثر مغزی زیاد می‌شود [۴،۵].

قبل از تعیین اندازه لکه فیبر خمیده، باید مقدار n_{SFM} در آن محاسبه شود. ضریب شکست مؤثر سطح مقطع یک فیبر خمیده در راستای y با استفاده از رابطه (۱)، در شکل (۴) ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با کاهش شعاع خمشی، تغییرات ایجاد شده در ضریب شکست به‌طور خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۳- وابستگی اندازه لکه به بسامد بهنجار و محدوده تک‌مدی در فیبرهای SMF و PCF ناخمیده.

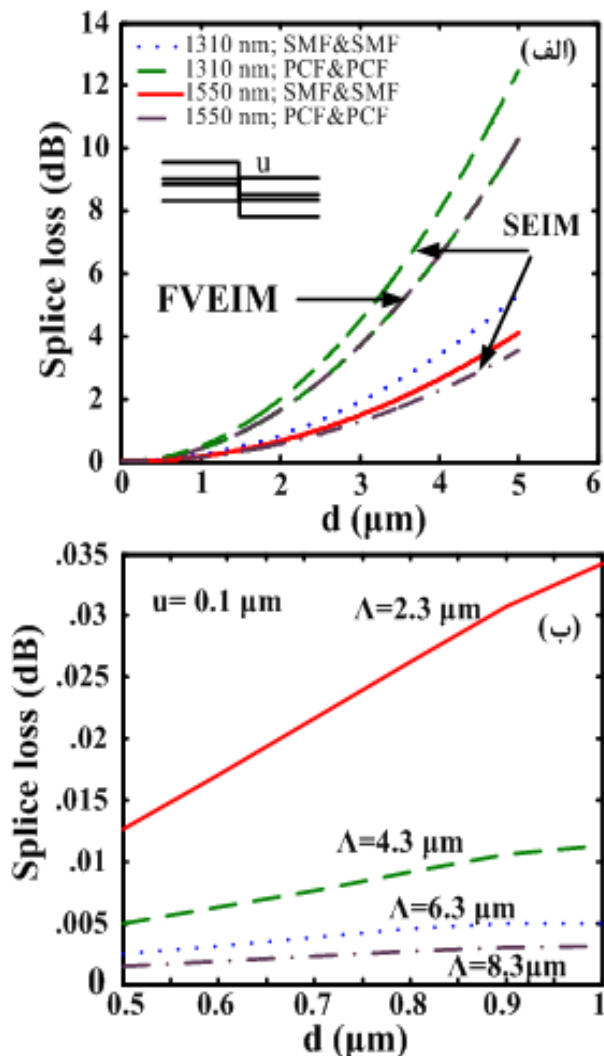


شکل ۴- تغییرات ضریب شکست مؤثر فیبر خمیده در مقایسه با فیبر ناخمیده برای $\Lambda = 2/3 \mu\text{m}$ ، $d = 0/35 \mu\text{m}$ و $\lambda = 1/55 \mu\text{m}$.

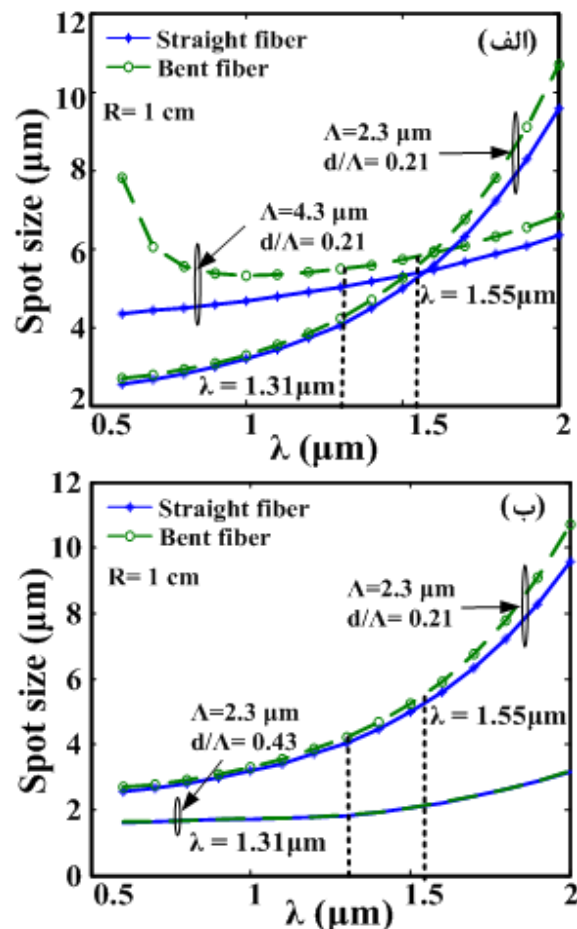
با استفاده از شکل‌های (۳) و (۴)، می‌توان اندازه لکه در یک فیبر خمیده را محاسبه کرد. با ترسیم اندازه لکه فیبر PCF ناخمیده و خمیده بر حسب طول موج، مطابق شکل (۵) مشاهده می‌شود، با خم کردن فیبر اندازه لکه افزایش می‌یابد.

مطابق شکل (۵ الف)، با فرض ثابت بودن نسبت پرشدگی هوا d/Λ و افزایش Λ ، اندازه لکه در برخی طول موج‌های پایین افزایش می‌یابد و در طول موج‌های بالا کاهش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش Λ در طول موج 1520 nm برای نسبت پرشدگی $0/21$ بی‌اثر است و در هر دو مقدار Λ اندازه لکه $5/53 \mu\text{m}$ بدست می‌آید. مطابق شکل (۵ ب)، با افزایش نسبت d/Λ با ثابت بودن Λ ، اندازه لکه کاهش می‌یابد.

که در آن u ناهم‌راستایی عرضی و ω_1 و ω_2 اندازه‌های لکه دو فیبر متصل به هم هستند که شکل (۶) تلفات حاصل از ناهم‌راستایی عرضی در نقطه اتصال دو فیبر هم‌سان را مقایسه می‌کند. با تنظیم پارامترهایی چون λ ، Λ و d/Λ می‌توان فیبرهای PCF را به‌گونه‌ای طراحی کرد که تلفات اتصال به‌شدت کاهش یابد. در شکل (۶ الف) در مقایسه روش‌های SEIM و FVEIM مشاهده می‌شود تلفات اتصال بدست آمده توسط روش SEIM در طول موج 1550 nm نامطلوب است. مطابق شکل (۶ ب)، در طول موج 1550 nm وقتی ناهم‌راستایی عرضی $0.1\ \mu\text{m}$ باشد، با کاهش d و افزایش Λ میزان تلفات اتصال کاهش می‌یابد که با افزایش Λ اثر تغییر d نامحسوس می‌شود.



شکل ۶- مقایسه تلفات حاصل از ناهم‌راستایی عرضی در اتصال فیبرهای PCF هم‌سان با اندازه لکه‌های یکسان (الف) با $d = 2\ \mu\text{m}$ ، $\Lambda = 6.3\ \mu\text{m}$ (ب) برحسب پارامترهای متغیر Λ و d در $\lambda = 1550\text{ nm}$



شکل ۵- اندازه لکه فیبرهای ناخمیده و خمیده برحسب طول موج (الف) با تغییر Λ (ب) با تغییر d/Λ .

با مقایسه نمودارهای شکل (۵)، در صورتی که اندازه لکه ثابت باشد و Λ افزایش یابد، افزایش اندازه لکه برای مقادیر بالاتر Λ محسوس‌تر است. به‌طور مثال، برای $\Lambda = 2.3\ \mu\text{m}$ و $d/\Lambda = 0.21$ ، و برای اختلاف اندازه لکه در فیبرهای ناخمیده و خمیده $0.29\ \mu\text{m}$ و برای $\Lambda = 4.3\ \mu\text{m}$ ، $d/\Lambda = 0.43$ است که حدوداً 48% افزایش نشان می‌دهد.

۴- تلفات اتصال حاصل از ناهم‌راستایی‌ها

از آنجایی که در روش EIM^{۱۲} فیبرهای PCF به فیبرهایی با ضریب شکست پله‌ای تقریب زده می‌شوند [۴،۹]، می‌توان جزئی مد اصلی یا ضریب انتقال توان حاصل از تزویج فیبرها را با در نظر گرفتن تقریب گوسی محاسبه کرد. توان عبوری از نقطه اتصال دو فیبر با ناهم‌راستایی عرضی به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۵،۱۶]:

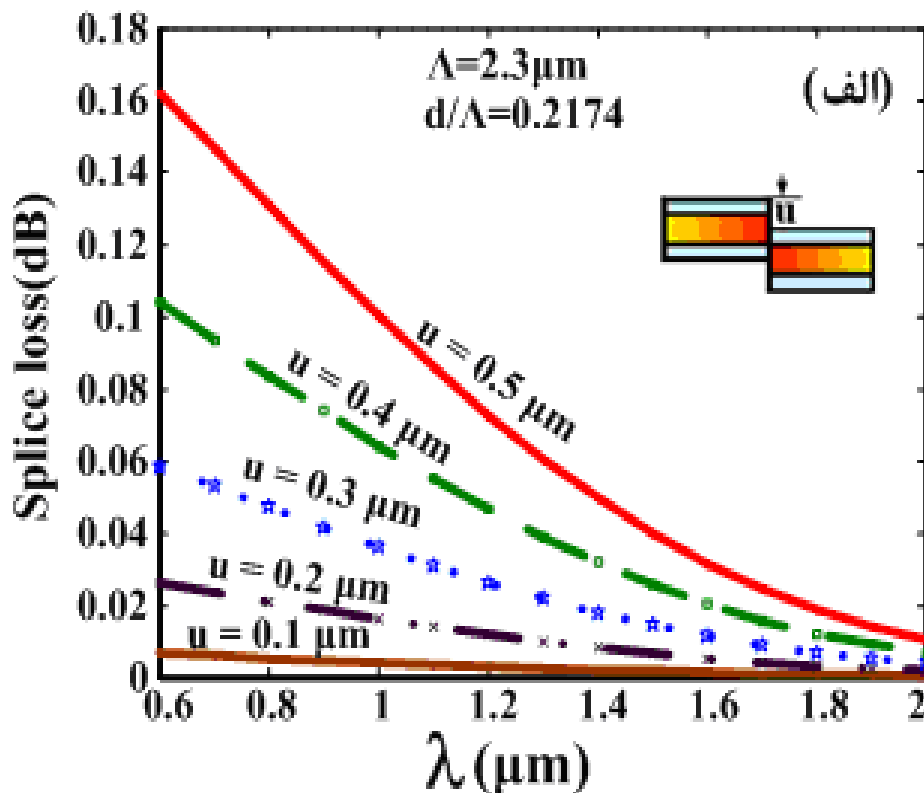
$$T_u = \frac{4\omega_1^2\omega_2^2}{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2} \exp\left(-\frac{2u^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}\right) \quad (5)$$

$$L_D = \frac{4\omega_1\omega_2}{(D^2/k_0^2) + (\omega_1^2 + \omega_2^2)} \quad (6)$$

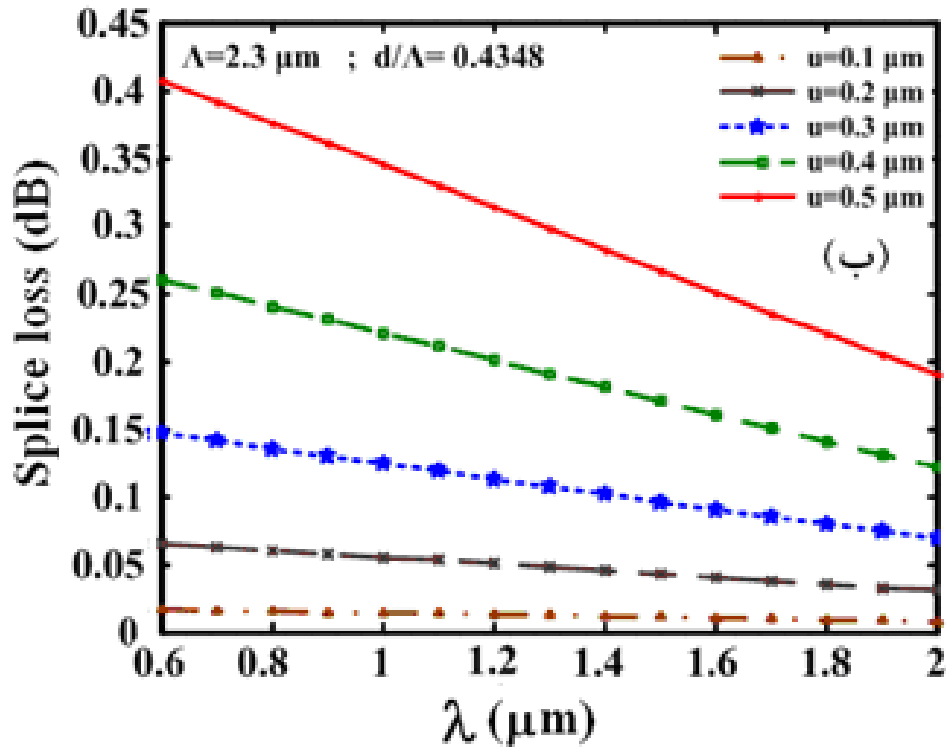
که در آن ω_1 و ω_2 اندازه لکه دو فیبر، D جابه‌جایی طولی و k_0 عدد موج است.

در شکل (۸ الف)، تلفات اتصال فیبرهای SMF به SMF و فیبرهای PCF به PCF در دو طول موج ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر بر حسب ناهم‌راستایی ترسیم شده است. در شکل (۸ ب)، تلفات اتصال دو فیبر PCF بر حسب طول موج، با تغییر D نشان داده شده است. با مقایسه اتصال دو فیبر SMF و دو فیبر PCF مشاهده می‌شود که پایین‌ترین تلفات اتصال برای فیبرهای تک مد در طول موج ۱۳۱۰ نانومتر بدست می‌آید در حالی که برای فیبرهای PCF، کمترین تلفات اتصال در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر حاصل می‌شود. تحلیل منحنی‌های شکل (۸) با روش‌های SEIM و FVEIM انجام شده است.

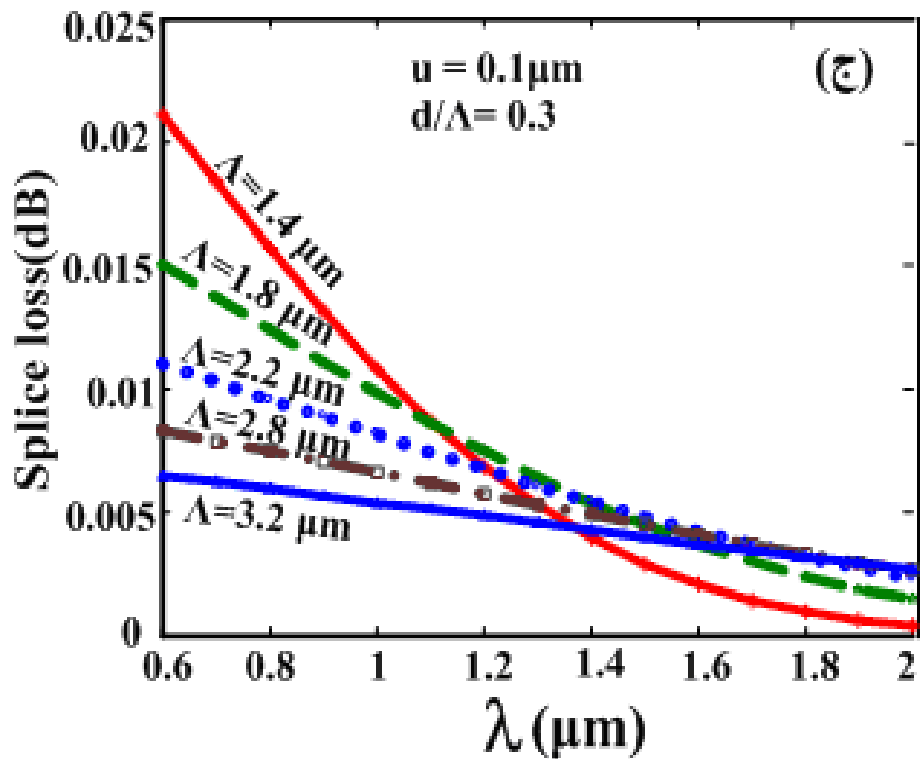
در شکل (۷) اثر افزایش ناهم‌راستایی و اثر افزایش d/Λ و Λ بر تلفات در نقطه اتصال ترسیم شده‌اند. در شکل (۷ الف) مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج اثر افزایش ناهم‌راستایی عرضی نامحسوس می‌شود. در مقایسه با شکل (۷ الف)، با افزایش d/Λ تلفات اتصال مطابق شکل (۷ ب) نیز افزایش می‌یابد، ولی فقط افزایش Λ موجب کاهش تلفات در طول موج‌های کوتاه می‌شود که در شکل (۷ ج) نشان داده شده است. در طول موج‌های بلند با کاهش Λ تلفات کمتر می‌شود و با افزایش نسبت d/Λ از تلفات حاصل از اتصال دو فیبر هم‌سان PCF به شدت کاسته می‌شود. از آنجایی که طول موج مورد استفاده در مخابرات نوری ۱۵۵۰ nm و ۱۳۱۰ nm است افزایش Λ اثر چندانی بر افزایش تلفات نخواهد داشت. از جمله پارامترهای اثرگذار بر توان انتقالی در اتصال هم‌بافت^{۱۳} می‌توان به ایجاد جابه‌جایی طولی اشاره کرد که از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۱۵]:



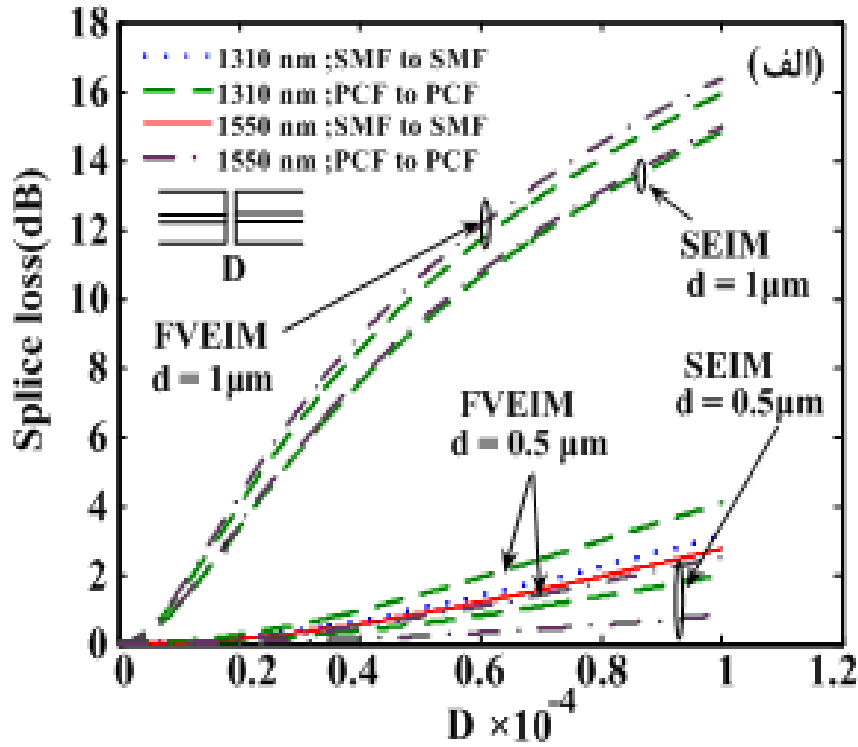
شکل ۷- تلفات ناهم‌راستایی عرضی بر حسب طول موج (الف) $\Lambda = 2/3 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda = 0/217 \mu\text{m}$



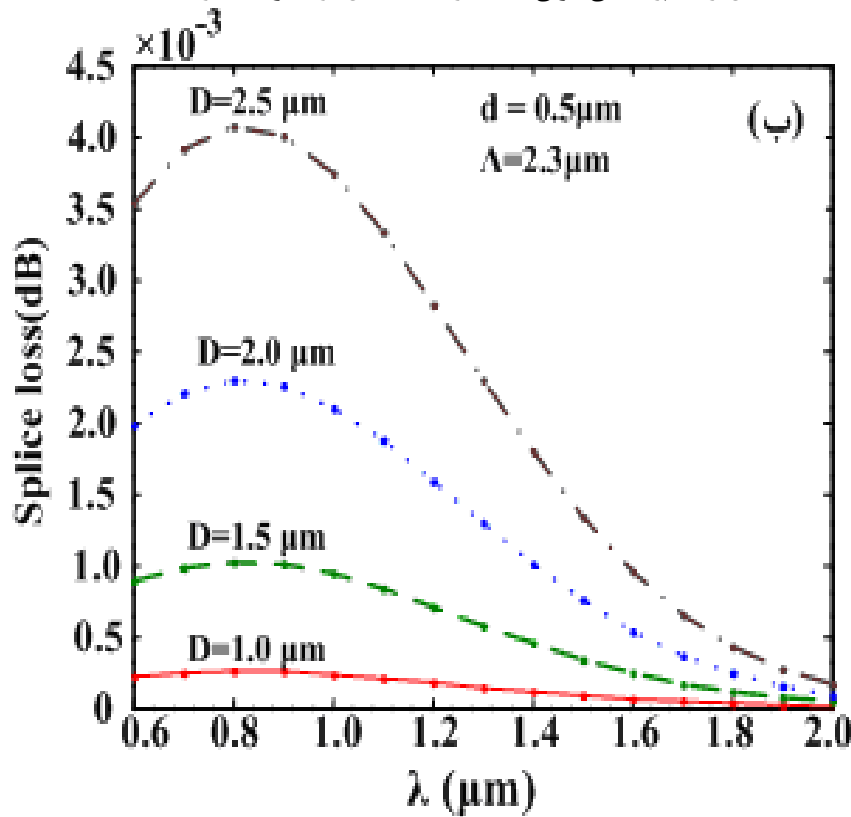
شکل ۷- تلفات ناهم‌راستایی عرضی بر حسب طول موج (ب) $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0.4348$



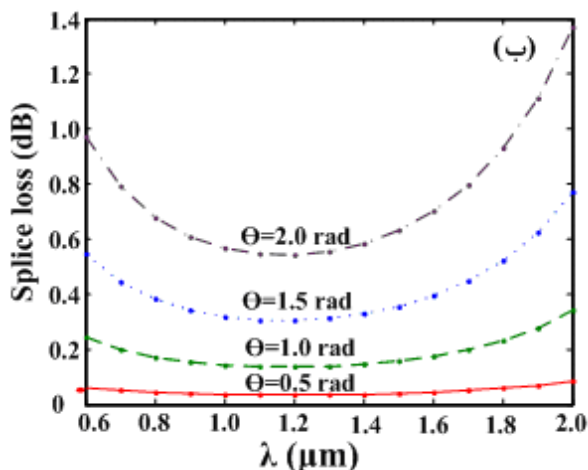
شکل ۷- تلفات ناهم‌راستایی عرضی بر حسب طول موج شکل ۷- (ج) تلفات حاصل از ناهم‌راستایی عرضی و اثر Λ



شکل ۸- تلفات حاصل از ناهمراستایی طولی (الف) در نقطه اتصال دو فیبر SMF و PCF با $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$



شکل ۸- تلفات حاصل از ناهمراستایی طولی (ب) دو فیبر PCF برحسب طول موج



شکل ۹- (ب) تلفات اتصال بر حسب طول موج برای ناهم‌راستایی زاویه‌ای مختلف.

شکل ۹- تلفات حاصل از ناهم‌راستایی زاویه‌ای

۵- تلفات اتصال فیبرهای PCF و SMF

اگر در نقطه اتصال دو فیبر اتصال کاملی داشته باشیم، ضریب توان حاصل از تزویج دو فیبر از رابطه زیر تعیین می‌شود [۹]:

$$T_{\max} = \left[\frac{2\omega_{\text{PCF}}\omega_{\text{SMF}}}{(\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2)} \right]^2 \quad (۸)$$

که در آن ω_{SMF} اندازه لکه فیبر تک‌مد و ω_{PCF} اندازه لکه فیبر PCF است. با استفاده از رابطه (۸) می‌توان تلفات اتصال ناشی از نابرابری اندازه لکه را محاسبه کرد. مقدار ω_{SMF} با طول موج مورد استفاده در مخابرات نوری ثابت است و مقدار ω_{PCF} رابطه مستقیمی با d/Λ و Λ دارد. در صورت استفاده از فیبر استاندارد SMF-28e می‌توان ویژگی‌های یک فیبر کریستال فوتونی را به گونه‌ای تعیین کرد که تلفات به کمینه مقدار خودش برسد. مثلاً در $\Lambda = 6/41 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda = 0/345$ مطابق شکل (۱۰)، تلفات پیوندگاه به کمینه مقدار می‌رسد.

در شکل (۱۰) تلفات اتصال و توان تزویجی برای دو نوع لکه یعنی پترمان-۲ و باریکه گوشه، ترسیم شده است. مطابق این شکل، در دو نقطه $\Lambda = 2/3 \mu\text{m}$ و $\Lambda = 6/41 \mu\text{m}$ ، مقدار تلفات اتصال کمینه است. در نقطه اول، مقدار Λ مناسب نیست، زیرا در این نقطه تلفات حاصل از نابرابری اندازه شعاع‌های دو فیبر به شدت افزایش می‌یابد.

از انواع فیبرهای PCF می‌توان به ASSB-PCF^{۱۴} اشاره کرد که دارای سه ضریب شکست: ۱- ضریب شکست حفره‌های موجود در غلاف $n_1 = 1/428$ ، ۲- ضریب شکست غلاف n_c با $n_c - n_1 = 0/15$ و ۳- ضریب شکست مغزی که از سیلیکای خالص است که با در نظر گرفتن پاشش ماده از رابطه سلمیر^{۱۵} محاسبه می‌شوند [۱۷].

البته میزان تلفات به طراحی و پارامترهای اولیه فیبر کریستال فوتونی بستگی دارد و با افزایش پارامتر قطر حفره‌های هوا این تلفات به شدت افزایش می‌یابد. با ترسیم این نمودار برای Λ مختلف مشاهده می‌شود افزایش Λ متناسب با افزایش تلفات است.

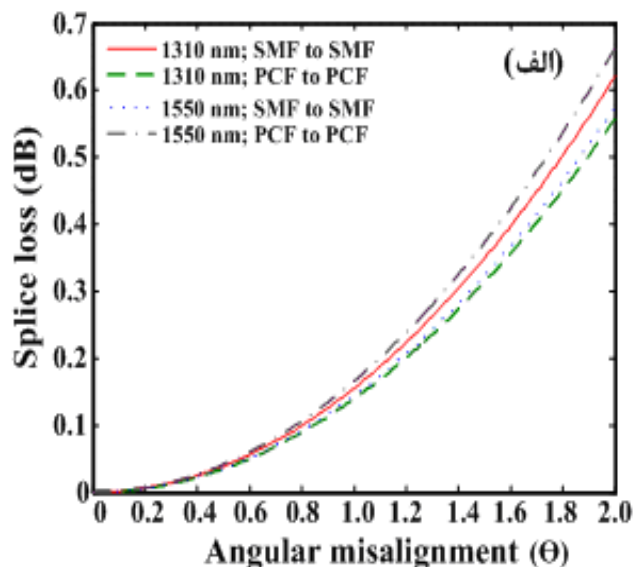
طول موج با تلفات حاصل از جابه‌جایی طولی با قطر حفره‌های هوا نسبت مستقیم دارد. در مقدارهای کوچک d تلفات حاصل از جابه‌جایی به شدت کاهش می‌یابد و این کاهش در طول موج‌های بلندتر دارای تلفات شدیدتری است.

از دیگر ناهم‌راستایی ایجاد شده در پیوندگاه می‌توان به ناهم‌راستایی زاویه‌ای θ اشاره کرد که بر توان انتقالی در پیوندگاه اثر می‌گذارد و با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$T(\theta) = \left[\frac{2\omega_1\omega_2}{(\omega_1^2 + \omega_2^2)} \right]^2 \exp \left[-\frac{k_0^2 n_1^2 \theta^2 \omega_1^2 \omega_2^2}{2(\omega_1^2 + \omega_2^2)} \right] \quad (۷)$$

که در آن n_1 ضریب شکست ناحیه میانی بین دو فیبر است. با فرض $\omega_1 = \omega_2$ ، میزان تلفات ناهم‌راستایی زاویه‌ای در پیوندگاه بین فیبرهای SMF به SMF و PCF به PCF برای طول موج‌های ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر در شکل (۹ الف) نشان داده شده است.

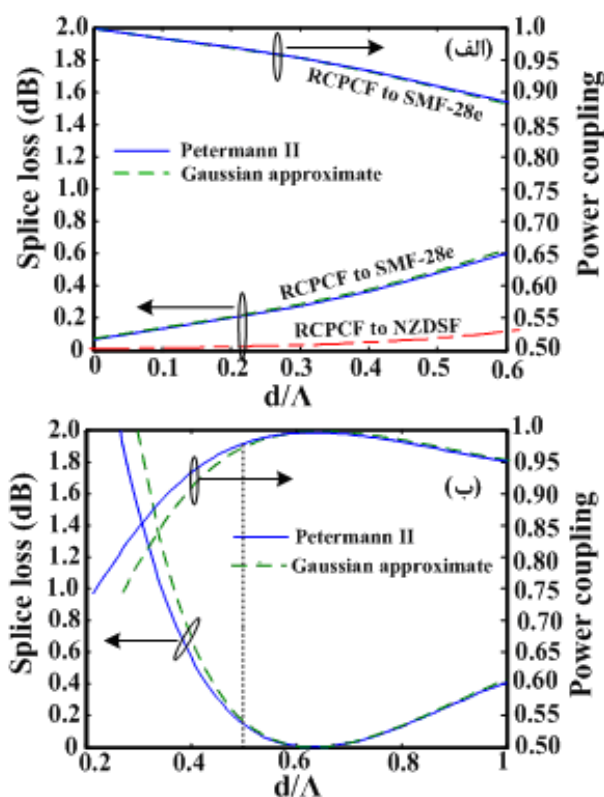
شکل (۹ ب) تلفات اتصال بر حسب طول موج را با تغییر زاویه ناهم‌راستایی نشان می‌دهد. در زاویه‌های مختلف تلفات اتصال در محدوده ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر به حداقل می‌رسد. با توجه به شکل (۹ ب) می‌توان مقدار بهینه d/Λ در بازه ۰/۶۸ تا ۰/۶۱ قرار داد که در عمل از ۰/۵ بیشتر وجود ندارد.



شکل ۹- (الف) در نقطه اتصال فیبرهای هم‌سان SMF و PCF

$$u_e \theta_e = \frac{\lambda (\omega_{SMF}^2 + \omega_{PCF}^2)}{2\pi n_0 \omega_{SMF} \omega_{PCF}} \quad (9)$$

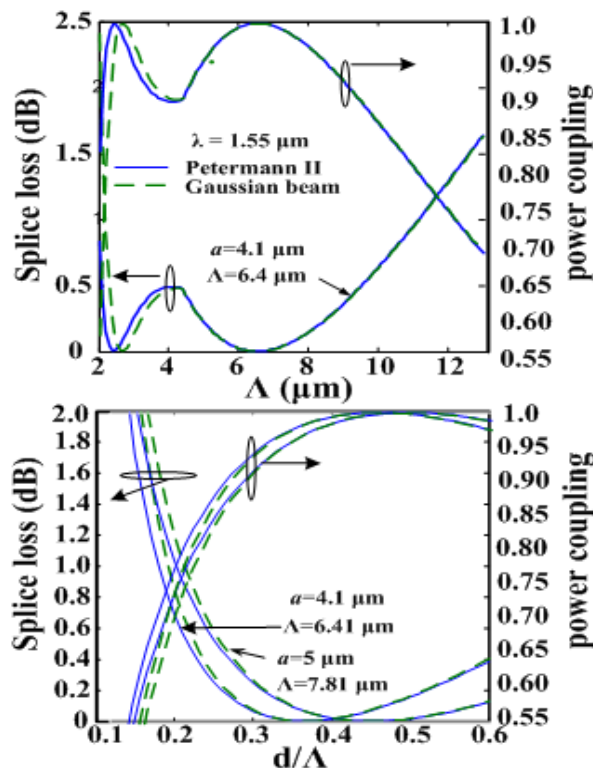
این رابطه یادآور رابطه عدم قطعیت در مکانیک کوانتومی است، زیرا با کوچک شدن یکی از پارامترها، پارامتر دیگر باید بزرگ شود تا این رابطه برقرار بماند. پس هر دو نوع ناهم‌راستایی به‌طور هم‌زمان نمی‌توانند به بیشینه مقدار برای قابل قبول بودن تزویج برسند [۱۵]. در صورتی که اتصال کامل باشد، همان‌طور که در شکل (۱۰) بیان شد تلفات حاصل از نقطه پیوندگاه تقریباً ۰/۳dB است.



شکل ۱۱- (الف) اتصال ایده‌آل فیبر RCPCF به فیبر SMF-28e و (ب) اتصال ایده‌آل فیبر SMF-28e به ASSB-PCF با گام $\Lambda=6/41 \mu\text{m}$

مطابق شکل (۱۲)، ممکن است در پیوندگاه دو فیبر مقداری خمش ایجاد شود. بنابراین، به‌علت تغییر اندازه لکه در فیبر خمیده (مطابق شکل ۵) تلفات در پالس منتشره در فیبر افزایش می‌یابد.

شدت نور در فیبر SMF-28e ناخمیده با شعاع مغزی $4/1 \mu\text{m}$ و گشودگی عددی $1/14$ [۱۸] و فیبر PCF ناخمیده و خمیده با $\Lambda=6/41 \mu\text{m}$ و $d/\Lambda=0/345$ در شکل (۱۳) ترسیم شده است.



شکل ۱۰- توان و ضریب تزویج در نقطه اتصال دو نوع فیبر تک‌مد و معرفی پارامترهای بهینه در فیبر کریستال فوتونی برای کمینه شدن تلفات.

به‌منظور بررسی تلفات کمینه در نقطه اتصال فیبرهای تک‌مد و کریستال فوتونی، استفاده از فیبرهای تک‌مد از نوع NZDSF^{۱۶} در نقطه اتصال با فیبرهای کریستال فوتونی از نوع Ge-RCPCF^{۱۷} و CPCF^{۱۸} بررسی شده و نتیجه تحلیل در شکل (۱۱) ترسیم شده است [۹]

مشاهده شده که در صورت استفاده از مجموعه این فیبرها میزان تلفات در تمامی مقدارهای d/Λ به‌شدت کاهش می‌یابد، ولی مطابق شکل (۱۱ الف)، مقدار Λ را باید با توجه به نوع فیبر و اندازه شعاع فیبر تک‌مد انتخاب کرد. همان‌طور که می‌دانیم یک پیوندگاه همواره نمی‌تواند آرمانی باشد، ولی می‌توان مقدار هر یک از پارامترها را به‌گونه‌ای محاسبه کرد که مقدار تزویج توان در پیوندگاه به‌بیشینه برسد.

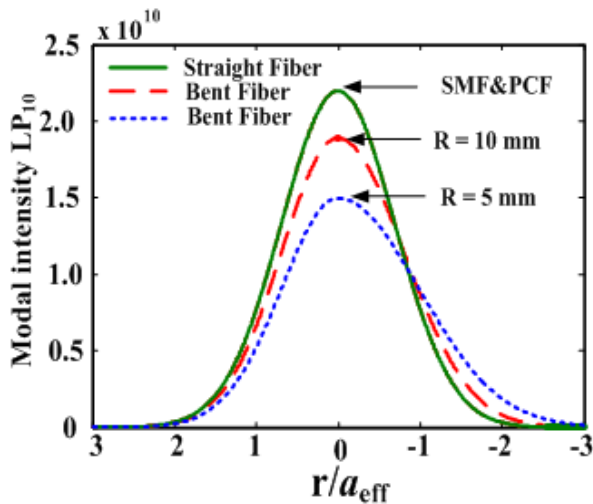
با فرض وجود ناهم‌راستایی عرضی و زاویه‌ای، مقدار بیشینه جابه‌جایی و ناهم‌راستایی که توان انتقالی را به $1/e$ کاهش می‌دهد عبارت است از:

برای تعیین تلفات خمشی مجاز در مقایسه با تلفات پیوندگاه، باید میزان تلفات خمشی را از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\alpha \Lambda (\text{dB/km}) = 8.686 \frac{1}{8\sqrt{6\pi}} \frac{1}{n_s} \frac{\Lambda \lambda}{A_{\text{eff}}} \frac{1}{\sqrt{x}} F(-x) \quad (11)$$

$$x = \frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 V_{\text{PCF}}^3$$

$$V_{\text{PCF}} = \frac{2\pi}{\lambda} a_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{sfm}}^2}$$



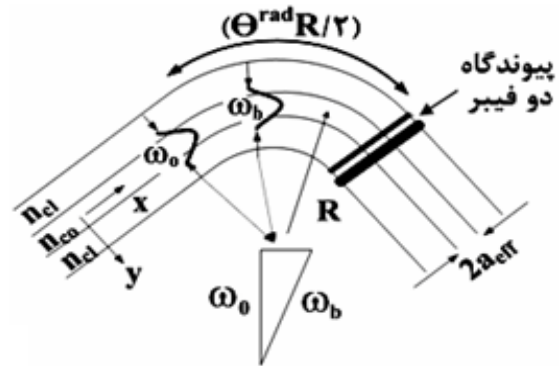
شکل ۱۲- اثر خمشی بر شدت نور در فیبرهای کریستال فوتونی با $d/\Lambda = 0.345$ و $\Lambda = 6.41 \mu\text{m}$

در رابطه بالا $A_{\text{eff}} = \pi(MFD/2)^2$ و R شعاع خمشی فیبر است. همچنین باید توجه داشت که مقدار شعاع خمشی در عمل دارای حداقل مقدار موسوم به شعاع بحرانی (R_c) است که با رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۹]:

$$R_c \approx \sqrt{\beta^2 - \beta_{\text{cl}}^2} / (\beta - \beta_{\text{cl}})^2 = \Lambda^3 / V_{\text{PCF}}^3 \quad (12)$$

که در آن β ثابت انتشار مغزی و β_{cl} ثابت انتشار مد پایه غلاف است. با استفاده از رابطه (۱۲)، تلفات خمشی مطابق شکل (۱۴ الف) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود در صورت ثابت بودن مقدار Λ ، با افزایش طول موج از تلفات خمشی کاسته می‌شود. از طرفی در طول موج‌های ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر، اختلاف تلفات حاصل از اندازه‌های مختلف d/Λ نامحسوس است. در واقع می‌توان گفت در طول موج‌های بلند، اثر d/Λ بر تلفات خمشی ناچیز است. با ترسیم تلفات خمشی مطابق شکل (۱۴ ب) با ثابت بودن d/Λ ، افزایش Λ باعث کاهش تلفات خمشی می‌شود. بنابراین مطابق این نتیجه، می‌توان راه‌کاری برای اتصال فیبر PCF به فیبر SMF-28e معرفی کرد.

مطابق این نمودار، برای فیبر PCF و SMF-28e ناخمیده، شدت میدان‌ها تقریباً برهم منطبق می‌شوند، اما با خم شدن فیبر PCF اندازه لکه از یک سوی نمودار به صورت نامتقارن افزایش و از سمت دیگر کاهش می‌یابد. در نتیجه تلفات حاصل در نقطه اتصال به شدت افزایش می‌یابد.



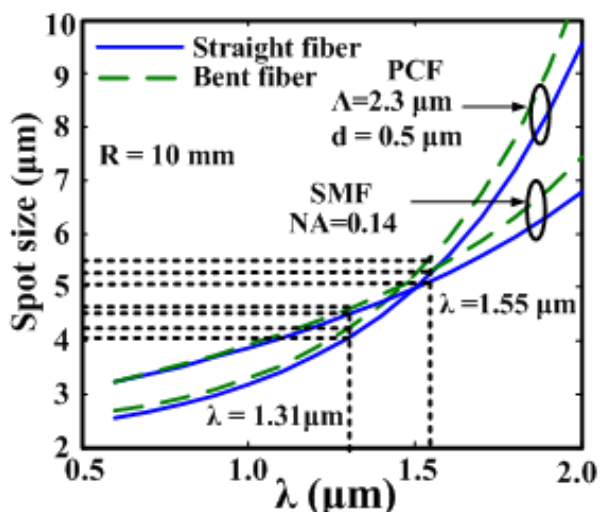
شکل ۱۳- خمشی ایجاد شده در پیوندگاه و اثر خمشی بر اندازه لکه. θ زاویه خمشی بر حسب رادیان است.

طبق محاسبات انجام شده اندازه لکه فیبر SMF ناخمیده $5.14 \mu\text{m}$ و فیبر PCF ناخمیده $5.15 \mu\text{m}$ می‌شود و در صورت خم شدن فیبر PCF، اندازه لکه به صورت نامتقارن $0.18 \mu\text{m}$ افزایش می‌یابد. بنابراین، تلفات حاصل از جابه‌جایی ایجاد شده در اندازه لکه نسبت به محور فیبرها ناشی از خمشی در محل پیوندگاه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$L_u = -10 \log \left\{ \left[\frac{2 \omega_{\text{SMF}} \omega_{\text{PCF}}}{(\omega_{\text{SMF}}^2 + \omega_{\text{PCF}}^2)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2u^2}{\omega_{\text{SMF}}^2 + \omega_{\text{PCF}}^2} \right] \right\} \quad (10)$$

که در آن u مقدار ناهم‌راستایی عرضی ایجاد شده در پیوندگاه است. این نوع تلفات به علت جابه‌جایی اندازه لکه‌ها به اندازه u حاصل می‌شود. با استفاده از این رابطه می‌توان تلفات اتصال یک فیبر خمیده به یک فیبر ناخمیده را در دو سمت محور فیبرها محاسبه کرد. حال بر اساس نتیجه‌های فوق، اگر دو فیبر مورد نظر در پیوندگاه دارای اندازه لکه‌های نابرابر باشند، با خم کردن یکی از فیبرها می‌توان اندازه لکه آن را با لکه فیبر دیگر هم‌سان کرد. برای جبران ناتطبیقی ایجاد شده در اندازه لکه فیبر ناخمیده می‌توان از ناهم‌راستایی عرضی فیبرها در پیوندگاه بهره جست.

برای استفاده از راه‌کار فوق، باید پارامترهای نظیر شعاع خمشی، اندازه لکه فیبر خمیده، میزان انحراف فیبر خمیده از محور مرکزی تا نقطه پیوندگاه محاسبه شوند.



شکل ۱۵- اندازه لکه در فیبرهای SMF و PCF خمیده و ناخمیده.

با توجه به نتیجه‌های شکل (۱۴) و (۱۵)، پارامترهایی را در نظر گرفتیم که تقریباً بیشینه تلفات خمشی در آن‌ها روی می‌دهد، پس می‌توان از این روش به همراه ایجاد ناهم‌راستایی عرضی به‌منظور کمینه کردن تلفات پیوندگاه دو فیبر استفاده کرد.

۶- زاویه بحرانی خمشی در نقطه پیوندگاه

به‌منظور استفاده از این راه‌کار در عمل می‌توان تمامی پارامترهای خمشی را قبل از انجام اتصال تنظیم کرد، ولی چون در اتصال نتیجه‌های شبیه‌سازی با عمل هم‌خوانی کامل ندارد، به‌منظور کنترل پارامترها می‌توان بعد از انجام اتصال مقدار پارامترهای خمشی را کنترل کرد. به این منظور مطابق شکل (۱۶)، پارامتری به نام θ_c یا زاویه بحرانی خمشی را معرفی می‌کنیم که دارای وابستگی مستقیم به شعاع خمشی، تلفات خمشی و میزان انحراف از محور فیبر خمیده از پیوندگاه است.

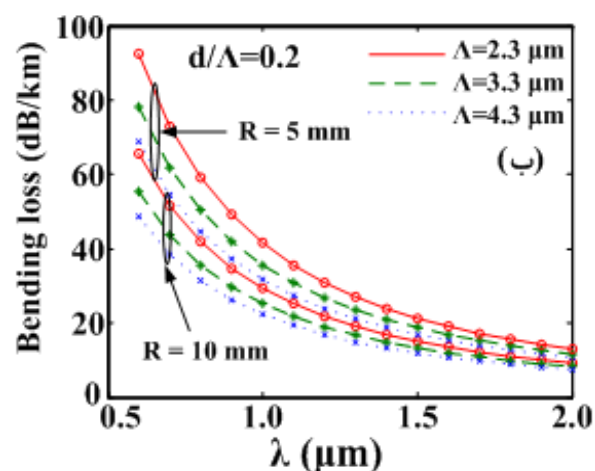
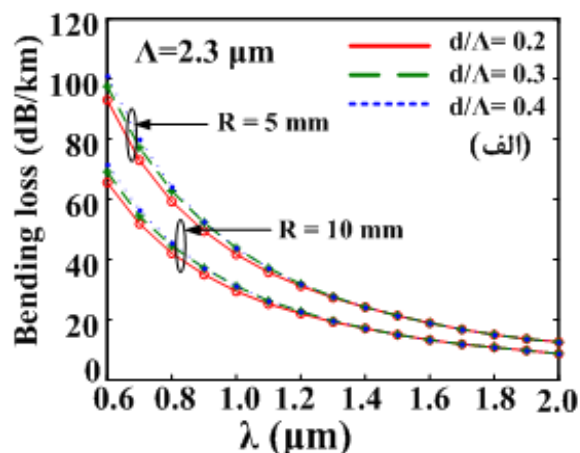
با توجه به مثلثات شکل (۱۶)، زاویه خمشی پیوندگاه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{R \tan(\theta^{\text{rad}})}\right) \quad (13)$$

$$\theta^{\text{rad}} = \arcsin\left(\frac{y^2}{R^2} - 1\right)$$

در رابطه (۱۳)، y میزان انحراف فیبر خمیده از محور تا نقطه پیوندگاه است و بیشینه مقدار آن برابر با شعاع خمشی R است.

مقدار این زاویه برای مثال توصیف شده به ازای $y=50 \mu\text{m}$ برابر $5/299^\circ$ است. با استفاده از شعاع بحرانی در رابطه (۱۳)، زاویه بحرانی خمشی پیوندگاه به‌صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۱۴- تلفات خمشی بر حسب طول موج برای دو شعاع خمشی $R=5 \text{ mm}$ و $R=10 \text{ mm}$ (الف) با d/Λ متغیر و Λ ثابت (ب) با Λ متغیر و d/Λ ثابت.

در شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود بیش‌ترین تلفات در طول موج‌های کوتاه ایجاد می‌شود و فاصله‌ای که پالس نوری در فیبر خمیده طی می‌کند به اندازه $(\theta^{\text{rad}} R/2)$ در طول فیبر خمیده است (مطابق شکل ۱۲). در نتیجه در طول موج 1550 nm و شعاع خمشی $R=1 \text{ cm}$ در فیبر PCF با $\Lambda=2/3 \mu\text{m}$ و $d=0/5 \mu\text{m}$ مقدار تلفات خمشی به اندازه $\theta^{\text{rad}} \times 10^{-5} \times 7/6$ و در شعاع خمشی $R=0 \text{ mm}$ تلفات به اندازه $\theta^{\text{rad}} \times 10^{-4} \times 4/99$ می‌شود که این مقدار در برابر تلفات ناشی از نابرابری اندازه لکه خیلی کم‌تر است.

با ترسیم اندازه لکه دو فیبر SMF-28e و PCF مطابق شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود که در برخی طول موج‌ها اندازه لکه PCF خمیده با SMF ناخمیده برابر شده و در نقطه‌های دیگر اندازه لکه PCF ناخمیده با SMF-28e خمیده یکسان شده است. بنابراین، در این نقطه‌ها، کمینه تلفات اتصال حاصل نابرابری اندازه لکه به‌دست می‌آید.

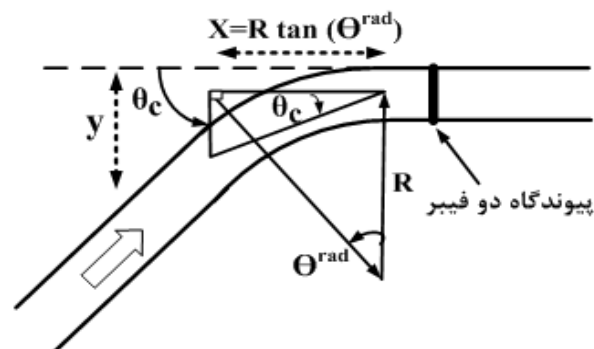
حاصل در پیوندگاه فیبرهای SMF و PCF را مورد تحلیل و بررسی قرار داده، پارامترهایی را معرفی کردیم که در صورت داشتن یک اتصال کامل تلفات کمینه به دست آید. با علم به این که هیچ اتصالی به طور کامل صورت نمی‌گیرد و امکان ایجاد هر نوع ناهم‌راستایی و یا حتی ایجاد خمش در نقطه اتصال وجود دارد، به بررسی این پارامترها و تلفات حاصل از آنها پرداختیم. سپس بررسی راه‌کاری برای اتصال فیبر SMF به PCF ارائه شد و نشان داده شده که استفاده هم‌زمان از خمش و ناهم‌راستایی عرضی در پیوندگاه می‌تواند سبب بهینه شدن پارامترهای پیوندگاه شود، بدون این که محدودیتی برای پارامترهای Δ و یا d/Λ ایجاد شود. در انتها برای کنترل بیشتر بر نقطه پیوندگاه فیبر خمیده به فیبر ناخمیده زاویه‌ای به نام زاویه بحرانی خمش در پیوندگاه را معرفی کردیم.

۸- تقدیر و تشکر

از حمایت مالی مرکز تحقیقات مخابرات ایران از پروژه با کد ۸۶۳۱۳۵۱ قدردانی می‌شود.

۹- مراجع

- [1] Y. Tseng, T. Hung, and J. Liu; "A Fiber Splicing-Plane-Inspection Technique Using Lense-Fiber Interference for the Cascaded Fiber Fabrication", J. Lightwave Technol., Vol. 25, No. 3, pp 803-810 (2007).
- [2] G.E.Town, J.T.Lizier; "Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion", Optic. Lett., Vol. 26, No. 14, pp.1042-1044 (2001).
- [3] S. Farsinezhad, Faramarz E. Seraji, Farzad T. Hamedani; "A mechanism to optimize splice loss in optical communication links", in Proceeding of ICEE 2008, May 13-15, Tehran (2008).
- [4] R. K. Sinha, A. D. Varshney; "Dispersion properties of photonic crystal fiber: comparison by scalar and fully vectorial effective index methods", Opt. & Quant Electron., Vol. 37, No. 8, pp. 711-722.(2005).
- [5] Y. Li, Ch. Wang, and M. Hu; "A fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: application to dispersion calculation", Opt. Commu., Vol. 238, Issues 1-3, 1 August 2004, pp. 29-33 (2004).
- [6] Z. Zhu and T. G. Brown; "Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fiber", Opt. Exp. Vol. 10, 853-864 (2002).



شکل ۱۶- توصیف زاویه بحرانی خمش در پیوندگاه دو فیبر.

$$\theta_c = \arctan \left\{ y / R \tan \left[\arcsin \left[(y^2 / R_c^2) - 1 \right] \right] \right\} \quad (14)$$

مطابق رابطه (۱۴)، مقدار زاویه بحرانی خمش در پیوندگاه به شعاع خمش و میزان انحراف فیبر خمیده از محور تا نقطه پیوندگاه وابسته است.

استفاده از دو پارامتر ایجادکننده تلفات ناهم‌راستایی و خمش، به طور هم‌زمان در نقطه اتصال این امکان را برای ما فراهم می‌سازد تا تلفات پیوندگاه فیبر SMF و فیبر PCF با ساختارهای مختلف را کمینه کنیم [۲۰]. قابل ذکر است نتیجه راه‌کار ارائه شده در عمل به طور آرمانی بدست نمی‌آید و برای دستیابی به خطای بین نتیجه‌های تئوری و عملی نیاز به پیاده‌سازی آن دارد که انتظار می‌رود در آینده گزارش شود.

۷- نتیجه‌گیری

در نتیجه مقایسه دو روش SEIM و FVEIM به منظور محاسبه ضریب شکست مد پایه غلاف با روش موج تخت مشاهده شد، با افزایش اندازه حفره‌های هوا در غلاف به شدت از دقت روش SEIM در برابر روش FVEIM کاسته می‌شود و نتیجه‌های حاصل شبیه‌سازی این پارامتر با استفاده از FVEIM کاملاً با نتیجه‌های روش ضریب فوریه مطابقت دارد.

به منظور محاسبه ضریب شکست مؤثر غلاف از روش‌های SEIM، FVEIM و FDFD استفاده کردیم. در مقایسه‌ی این روش‌ها مشاهده شد که روش‌های SEIM و VEIM در محاسبه این پارامتر ضعیف عمل می‌کنند. نتیجه‌های حاصل را با روش FEM مقایسه کردیم که از آن میان روش FDFD با خطائی از مرتبه 10^{-4} به نتیجه‌های این روش میل می‌کند.

اثر خمش بر ضریب شکست مؤثر مغزی و غلاف بررسی شده و نشان داده شد که تغییرات ایجاد شده در ضریب شکست مغزی و غلاف سبب افزایش اندازه لکه در فیبر ناخمیده نسبت به فیبرهای خمیده می‌شود. همچنین، بر اساس نتیجه‌های تحلیلی بدست آمده، تلفات

- 19] S. M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, M. Albertsen, J. R. Folkenberg, A. Bjarklev, and D. Bonacinni; **"Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers"**, *Optic. Exp*, Vol. 12 (8), pp. 1775-1779, (2004).
- ۱۰- پی‌نوشت‌ها
-
- 1- Photonic Crystal Fiber: PCF
 2- Hollow Core
 3- Solid Core
 4- Endlessly Single Mode: ESM
 5- Single-Mode Fiber: SMF
 6- Scalar Effective Index Method: SEIM
 7- Fully-Vectorial Effective Index Method: FVEIM
 8- Fully-Vectorial Finite Difference Frequency Domain: FVDFD
 9- Perfectly Matched Layer: PML
 10- Mode Field Diameter: MFD
 11- Step Index Fiber: EIM
 12- Effective Index Method: EIM
 13- Splice
 14- All-Solid Silica Based Photonic Crystal Fiber
 15- Sellemier
 16- Non-Zero Dispersion Shifted Fiber: NZDSF
 17- Germanium-doped Raised-Core PCF: GE-RCPCF
 18- Conventional Photonic Crystal Fibers: CPCF
- [7] Sh. Guo, F. Wu, H. Tai, R. S. Rogowski, and S. Albin; **"Loss and dispersion analysis of microstructured fibers by finite-difference method"**, *Opt. Exp.* Vol. 12, pp. 3342-3352 (2004).
- [8] Zhaoming Zhu and Thomas Brown; **"Analysis of the space filling modes of photonic crystal fibers"**, *Opt. Exp.* 8, 547-554 (2001).
- [9] Faramarz. E. Seraji, M. Rashidi, V. Khasheie; **"Parameter analysis of a photonic crystal fiber with raised-core index profile based on effective index method"**, *Chinese Optic. Lett.* Vol. 4, No. 8, pp. 442-445 (2006).
- 10] J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, V. Finazzi, and D.J. Richardson; **"Understanding bending losses in holey optical fibers"**, *Opt. Commun.* 227, (4-6), 317-335 (2003).
- 11] F. Asghari, Faramarz. E. Seraji, and A. Zendeenam; **"Determination of Refractive Index of Photonic Crystal Fibers Using Full-Vectorial Finite-Difference Based on Yee Mesh and Comparison with Other Methods"**, in *Proceeding of Iran Phy. Conf.*, Kashan University, Iran, pp. 13-16 (2008).
- 12] H.P. Uranus, and H.J.W.M. Hoekstra; **"Modelling of microstructured waveguides using a finite-element-based vectorial mode solver with transparent boundary conditions"**, *Optic. Exp.* Vol. 12, Issue 12, pp. 2795-2809 (2004).
- 13] M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg; A. Bjarklev; **"Mode-Field Radius of Photonic crystal fibers Expressed by the V-parameter"**, *Opt. Lett.*, Vol. 28, No. 23, pp. 2309-2311 (2003).
- 14] Ming-Leung V. Tse, Peter Horak, Francesco Poletti, and David J. Richardson; **"Designing Tapered Holey Fibers for Soliton Compression"**, *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. 44, No. 2, pp. 192-198 (2008).
- 15] A. Ghatak, K. Thyarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge University Press, UK, (2002).
- 16] M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, A. Bjarklev; **"Mode-Field Radius of Photonic crystal fibers Expressed by the V-parameter"**, *Opt. Lett.*, Vol. 28, No. 23, pp. 2309-2311 (2003).
- 17] Ming Yang Chen; **"All-solid silica-based photonic crystal fibers"**, *Opt. Commun.*, Vol. 266, Issue 1, pp. 151-158 (2006).
- 18] Corning Inc, www.corning.com, accessed, January 2005.