




Analysis and Simulation of an Optical Coupler Based on a Single Mode Fiber and a Crystal Photonic Fiber

S. Solooki¹, M. Seifouri^{2*} 

* Associate Professor, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

(Received: 2024/03/14 revised: 2024/06/07 Accepted: 2024/07/14 published: 2024/07/22)

Abstract

A new evanescent-field-based coupler that achieves high coupling efficiency between a single-mode fiber (SMF) and a photonic crystal fiber (PCF) is proposed. Firstly, an introduction of photonic crystal fibers has been discussed. Also, some characteristics of PCF would be proposed. The coupling equations are presented and a numerical solution is obtained in this letter. Optimization of the refractive index, the effective radius of PCF, and the coupling length can enhance the coupling efficiency. It is shown that a maximum coupling ratio of 92% can be achieved for a coupling length of 600 μ m for commercially available SMFs and PCFs. The proposed PCF-SMF fiber coupler opens a path for the development of unique modalities for fiber-optic chemical sensors where the light ingress and egress paths can be via SMF, but the light interaction with analytes of interest occurs in the PCF where enhanced evanescent interactions can be obtained at the multiple air holes.

Keywords: Optical Fiber Coupling, Photonic Crystal Fiber, Evanescent Field, Coupling Ratio

* Corresponding author E-mail: mahmood.seifouri@sru.ac.ir

علمی - پژوهشی

تحلیل و شبیه‌سازی جفت‌کننده نوری مبتنی بر فیبر نوری تک مود و فیبر بلور فوتونی

سپهر سلوکی^۱، محمد صیفوری^{۲*}۱- کارشناسی ارشد ۲- دانشیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله طرحی از یک جفت‌کننده نوری مبتنی بر میدان میرا که دارای بازدهی جفت‌شوندگی بسیار بالایی بین یک فیبر تک مود و یک فیبر بلور فوتونی است، ارائه می‌شود. در بحث پیش رو ابتدا مقدمه‌ای از مشخصات جفت‌کننده‌های PCF^۱ گفته می‌شود سپس معادلات جفت‌شوندگی ارائه می‌شود و پس از آن پاسخ مسئله به روش عددی نیز به دست می‌آید. بهینه‌سازی پارامترهایی چون ضریب شکست، شعاع مؤثر فیبر بلوره فوتونی و طول جفت‌شوندگی هر یک می‌توانند بازدهی جفت‌شوندگی را تا حدی تقویت کنند. در انتهای این مقاله نشان داده می‌شود که مثلاً در طول موج ۱,۵۵ μm، برای یک جفت‌کننده ۶۰۰ μm نسبت جفت‌شوندگی به ۰,۹۲ می‌رسد و البته متناسب با طول جفت‌شوندگی انتخاب‌شده، این نسبت جفت‌شوندگی متغیر هست. کاربرد این نوع جفت‌شوندگی که میان فیبرهای تک مود و فیبر بلوره فوتونی ایجاد می‌شود، در حسگرهای شیمیایی بیشتر دیده می‌شود به صورتی که مسیرهای ورود و خروج نور توسط فیبر تک مود و برهمکنش نور با ماده موردنظر در فیبرهای بلوره فوتونی اتفاق می‌افتد.

کلیدواژه‌ها: جفت‌شوندگی فیبر نوری، فیبر بلوره فوتونی، میدان میرا، نسبت جفت‌شوندگی

۱- مقدمه

دی‌الکترونیک آن وجود دارد. به عبارتی فیبرهای نوری با میکرو ساختارهای سیلیکا- هوا، همان فیبرهای بلوره فوتونی هستند که برای محیط انتقال بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. فیبرهایی از این نوع به دلیل افزایش آثار غیرخطی درزمینه‌ی اپتیک غیرخطی، تولید پالس فوق پیوستار و تقویت‌کننده‌های پارامتری نوری کاربرد دارند [۲].

تخمین زده می‌شود که تلفات ذاتی یک فیبر بلوره فوتونی که متشکل از پراکندگی رالی و تلفات جذب مادون‌قرمز هست، به علت آنکه تنها از شیشه سیلیکای خالص تشکیل شده، کمتر از تلفات یک فیبر تک مود معمولی است. به‌مجرد اینکه نخستین گروه از این نوع فیبرها به بازار عرضه شدند، تضعیف نوری ظرف مدت چند سال به‌سرعت کاهش پیدا کرد [۳]. فیبرهای بلوره فوتونی ساختار دقیقی برای افزاره‌های حسگری انعطاف‌پذیر با عملکرد مطلوب ایجاد کرده است. وابسته به توزیع مکانی یا توزیع ضریب شکست ساختارهای PCF، سازوکارهای هدایت یا هدایت مبتنی بر ضریب شکست یا هدایت مبتنی بر شکاف باند فوتونی هست [۴]. اگر در فیبرهای نوری معمول، چنانچه ضریب شکست هسته از ضریب شکست پوشش بیشتر باشد، سازوکارهای هدایت

ظهور فیبرهای بلوره فوتونی برای نخستین بار به سال ۱۹۹۶ در انگلستان برمی‌گردد. امروزه به علت توانایی آن‌ها در تحدید نور در هسته‌های میان‌تهی و دارا بودن مشخصات تحدید نور که در فیبرهای نوری معمولی کمتر یافت می‌شود، این نوع فیبرهای بلوره فوتونی در فناوری‌های مخابرات فیبر نوری، لیزر فیبری، افزاره‌های غیرخطی، انتقال توان بالا، حس‌گرهای گازی فوق حساس و... کاربرد دارد. طبقه‌بندی‌های خاص‌تری از این نوع فیبرها به فیبرهایی با شکاف باند فوتونی^۲ (PBGF) (فیبرهایی که نور را با استفاده از تأثیرات شکاف باند تحدید می‌کند) فیبرهای حفره‌دار (فیبرهایی که از حفره‌های هوا در سطح مقطع خود استفاده می‌کنند)، فیبر براگ (فیبر با شکاف باند فوتونی که توسط حلقه‌های متمرکز فیلم چندلایه‌ای تشکیل می‌شود) تقسیم‌بندی می‌شود. درواقع فیبری با شکاف باند فوتونی ساختاری است که تغییرات متناوبی در مشخصات

* رایانامه نویسنده مسئول: mahmood.seifouri@sru.ac.ir

^۱ Photonic Crystal Fibers^۲ Photonic Bandgap Fibers

دست خواهد آمد.

۲- مشخصات جفت‌کننده‌های PCF و ویژگی‌های

یک جفت‌کننده PCF-SMF

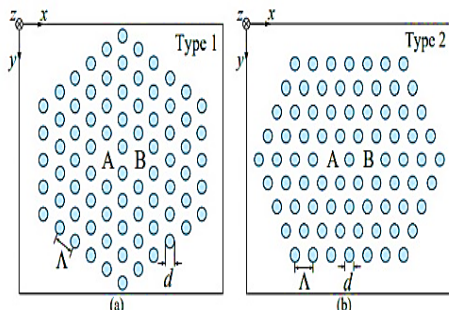
ساختار جفت‌کننده‌های فیبر نوری به همان صورت که در شکل ۱ آمده است که Λ مقدار پیچ حفره، d قطر حفره بوده و ضریب شکست سیلیکای پس‌زمینه به مقدار 1.45 باشد، فرض می‌شود. فاصله بین مراکز دو هسته A و B در شکل ۱ (الف)، $\sqrt{3}\Lambda$ بوده که این فیبر بلوره فوتونی نوع ۱ و در شکل ۱ (ب) این فاصله 2Λ بوده که این نیز فیبر بلوره فوتونی نوع ۲ نامیده می‌شود. شکل ۲ بیانگر وابستگی پیچ حفره به طول جفت‌شوندگی (L) برای دو نوع جفت‌کننده داده‌شده در شکل ۱ را به صورتی که $d/\Lambda = 0.5$ (رابطه مربوط به اندازه ثابت شبکه) نمایش می‌دهد. در این شکل طول موج عملکرد $\lambda = 1.55 \mu m$ بوده و برای دو نوع مود قطبیده در جهت x و y به دست آمده است [۸]. طول جفت‌شوندگی با استفاده از ثابت انتشار β_e و β_o مربوط به مودهای زوج و فرد توسط رابطه زیر (رابطه (۱)) توصیف می‌شود:

$$(1) \quad L = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o}$$

$$L_{\lambda 1} : L_{\lambda 2} = \text{even} : \text{odd}$$

$$L_{\lambda 1} : L_{\lambda 2} = \text{odd} : \text{even}$$

یک جفت‌کننده فیبر بلوره فوتونی اگر در هریک از حالت‌های جفت‌شوندگی بار^۳ و جفت‌شوندگی متقاطع^۴ قرار گیرند طول‌موج‌های مختلف و طول جفت‌شوندگی مختلف خواهند داشت که برای اولین بار پارامتر $L_{\lambda 1}$ در طول موج λ_1 و برای دومی پارامتر $L_{\lambda 2}$ در طول موج λ_2 مقادیر طول جفت‌شوندگی خواهند بود. با توجه به اینکه فاصله مراکز A و B در فیبر نوع ۱ نزدیک‌تر از فاصله مراکز در فیبر نوع ۲ بوده، در نتیجه با وجود قطر حفره و پیچ یکسان، طول جفت‌شوندگی در فیبر نوع ۱ کوتاه‌تر از فیبر نوع ۲ هست.



شکل (۱). نمایش سطح مقطع جفت‌کننده‌های فیبر بلوره فوتونی.

(الف) نوع ۱ و (ب) نوع ۲ [۸].

مبتنی بر ضریب شکست خواهد بود. سازوکار هدایت مبتنی بر شکاف باند فوتونی در ساختارهایی که دارای شکاف باندهای ممنوع برای انتقال نور شده و در نتیجه آن‌ها نور به ناحیه هسته محدود شده، استفاده می‌شود. در برخی ساختارهای خاص فیبرهای بلوره فوتونی، سازوکار هدایت ترکیبی استفاده خواهد شد [۵]. فیبرهای بلوره فوتونی به دلیل وجود حفره‌های هوا در پوشش فیبر آن‌ها، کاربردهای علمی مهمی در حس‌گرهای شیمیایی دارند و امکان نفوذ گاز، یون‌ها و محلول‌ها را به دست می‌دهد. این موضوع منجر به افزایش حجم برهم‌کنش بین نور و ماده می‌گردد؛ اما به علت تضعیف شدید فیبر، استفاده از فیبرهای بلوره فوتونی محدود خواهد بود [۶] و [۷].

بسیاری از تحقیقات در سال‌های اخیر پیرامون چگونگی جفت‌شوندگی نور در مود هسته فیبرهای بلوره فوتونی متمرکز شده است. دو محقق به نام‌های Hua و Fu [۱۲] جفت‌کننده تنظیم‌پذیری از نوع PCF به منظور میکروسکوپی نوری غیرخطی ارائه کرده‌اند که در آن جفت‌کننده قادر به ارسال باریکه لیزر برای برانگیختگی و شکافتن فلورسانس برای آشکارسازی است [۱۲]. محقق دیگری به نام Kim [۸] جفت‌کننده تنظیم‌پذیر دیگری مبتنی بر روش سایش جانبی^۱ ارائه کرد. با کنترل زاویه تطبیق بین دو فیبر بلوره فوتونی که با روش سایش جانبی جفت شده‌اند، نسبت جفت‌شوندگی به بیش از 90% خواهد رسید [۸]. در پژوهش‌های آن‌ها، تلفات الحاقی و تضعیف انتشار در فیبرهای بلوره فوتونی در نظر گرفته نشده بود. مسلم است که تلفات الحاقی و تضعیف انتشار در فیبرهای تک مود قابل‌چشم‌پوشی است [۹]. با این حال در شرایطی که این نوع فیبرها به‌عنوان حس‌گرهای شیمیایی عمل می‌کنند، برهم‌کنش نور و ماده تنها با استفاده از قراردادن یک پوشش برای ماده اتفاق می‌افتد که این موضوع نه تنها برای مجتمع‌سازی فیبر مضر است؛ بلکه حجم برهم‌کنش بین نور و ماده نیز کمتر خواهد بود؛ بنابراین، توسعه حس‌گرهای شیمیایی از نوع فیبر نوری که از فیبرهای تک مود برای ورود و خروج نور و قسمت کوتاهی از فیبرهای بلوره فوتونی برای تقویت برهم‌کنش نور - ماده می‌گیرد، اتفاق می‌افتد. چنین سامانه‌هایی با استفاده از بهترین ویژگی‌های هر دو نوع فیبرهای بلوره فوتونی (PCF) و فیبر تک مود (SMF) به حس‌گرهای شیمیایی فوق‌العاده حساس منجر می‌شوند [۹].

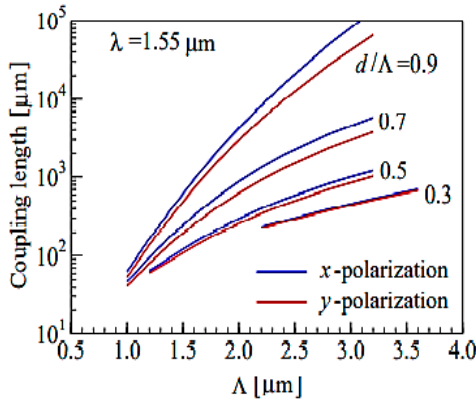
در پژوهش پیش رو، طراحی‌ای از یک جفت‌کننده PCF-SMF و نتایج عددی جفت‌شوندگی بین فیبرهای تک مود و فیبرهای بلوره فوتونی موجود ارائه خواهد شد. روشی برای تقویت بازدهی جفت‌شوندگی به‌وسیله بهینه‌سازی ضریب شکست، شعاع مؤثر فیبر بلوره فوتونی و طول جفت‌شوندگی به

³ Bar-coupled state

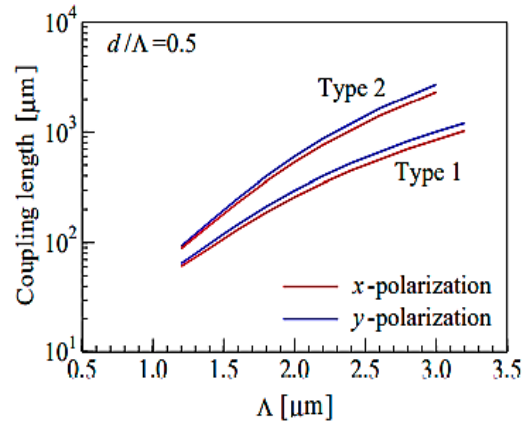
⁴ Cross-coupled state

¹ Side-Polishing

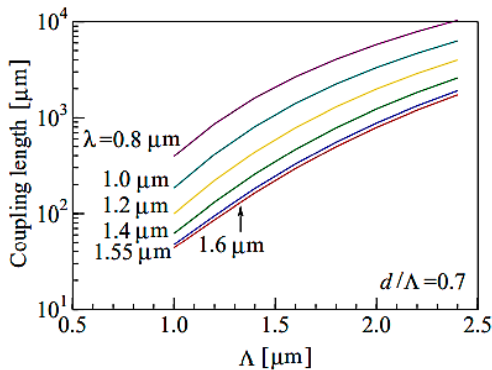
² Single Mode Fiber



شکل (۳). طول جفت‌شوندگی جفت‌کننده‌های مختلف PCF برحسب پیچ با $d/\Lambda = [0.3, 0.5, 0.7, 0.9]$.



شکل (۴). طول جفت‌شوندگی جفت‌کننده‌های PCF با $d/\Lambda = 0.5$.



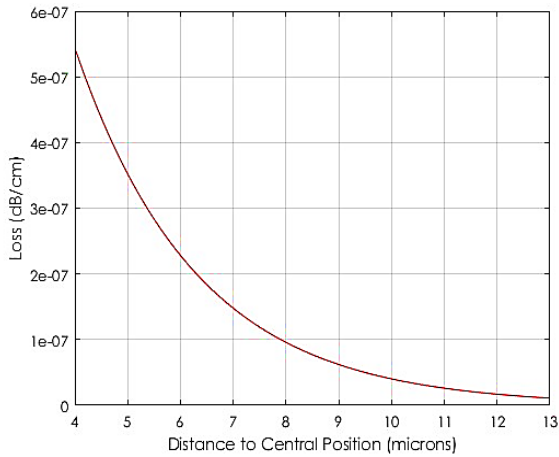
شکل (۴). وابستگی طول جفت‌شوندگی به پیچ - حفره برای جفت‌کننده PCF با $d/\Lambda = 0.7$.

برای فیبر تک‌مود، میدان نوری غالباً در ناحیه هسته محدود می‌شود؛ اما میدان میرا به خارج از ناحیه پوشش نیز نفوذ می‌کند و در جهت شعاعی در داخل محدوده طول‌موج نور به سرعت زوال پیدا می‌کند؛ بنابراین، جفت‌شوندگی نور از یک فیبر تک‌مود به فیبر دیگر با استفاده از سایش لایه پوشش و آوردن هسته‌های دو فیبر نزدیک به یکدیگر در داخل بازه طول‌موج امکان‌پذیر خواهد بود [۱۱]. رویکرد مشابهی برای دستیابی به جفت‌کننده‌های PCF-SMF نیز به کار گرفته می‌شود.

ابتدا محاسباتی پیرامون طراحی یک جفت‌کننده PCF-SMF بهینه ارائه خواهد شد. شکل ۵ یک دیگرام شماتیک از یک جفت‌کننده SMF به PCF هست. پارامترهایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند: قطر پوشش $125 \mu\text{m}$ ، متوسط قطر حفره‌های هوا (d) $4.23 \mu\text{m}$ و فاصله مرکز به مرکز بین دو حفره هوای مجاور (Λ) $8.2 \mu\text{m}$ هست. قطرهای هسته و پوشش فیبر تک‌مود به ترتیب $8.2 \mu\text{m}$ و $125 \mu\text{m}$ هست. تمامی شبیه‌سازی‌ها برای طول‌موج 1550 nm انجام می‌شود.

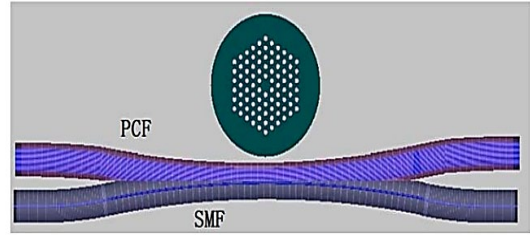
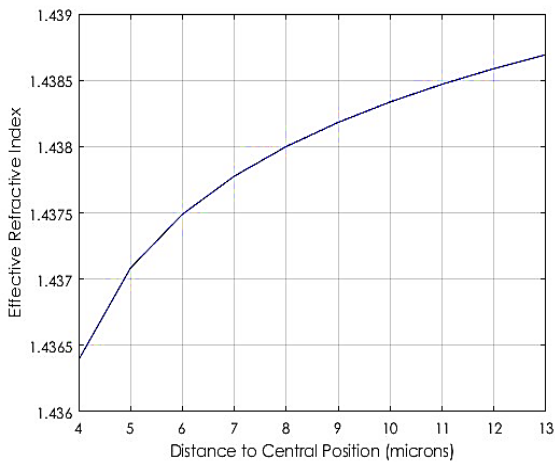
شکل ۳ طول جفت‌شوندگی را برحسب میزان پیچ جفت‌کننده‌هایی با $d/\Lambda = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ در شرایطی که $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ باشد، نشان می‌دهد. هرچه اندازه ثابت شبکه کوچک‌تر باشد و در نتیجه مقدار d/Λ کمتر باشد طول جفت‌شوندگی جفت‌کننده‌ها کوتاه‌تر خواهد بود. علاوه بر این، به علت آن‌که دو هسته در راستای موازی با محور x قرار گرفته‌اند و جفت‌شوندگی مود قطبیده در راستای x قوی‌تر از مود در راستای y است در نتیجه طول جفت‌شوندگی مودی که در راستای محور x قطبیده است نیز کوتاه‌تر از طول جفت‌شوندگی مود در راستای y هست. اگرچه به‌منظور دستیابی به طول جفت‌شوندگی‌های کوتاه‌تر، وجود جفت‌کننده قوی میان هسته‌ها ضروری به نظر می‌رسد اما جفت‌شوندگی هرچه شدیدتر منجر به نسبت‌های میرایی کم‌تری می‌گردد که این نتیجه مطلوبی نیست؛ بنابراین، جفت‌کننده‌های PCF با استفاده از مود قطبیده در راستای y مدنظر قرار می‌گیرند.

ساختارهایی که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیانگر اختلاف کمی در طول جفت‌شوندگی برای مودهای قطبیده در راستای x و y هستند. این اختلاف ممکن است با تعریف یک دوشکستی ساختاری در داخل هسته‌ها کم‌تر شود. با تنظیم ابعاد حفره‌های هوا در نزدیکی دو هسته، این دوشکستی پدید می‌آید که در جهت بهتر شدن این اختلاف در طول جفت‌شوندگی بین دو مود قطبش متفاوت مؤثر واقع می‌شود. شکل ۴ بیانگر وابستگی پیچ حفره به طول‌های جفت‌شوندگی با $d/\Lambda = 0.7$ بوده و طول‌موج عملکرد (λ) به‌عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود. با کاهش طول‌موج عملکرد، طول جفت‌شوندگی افزایش می‌یابد [۱۰].



شکل (۶). (الف) ضریب شکست یک فیبر تک مود برحسب فاصله ساییده شده تا نقطه مرکزی فیبر (ب) تلفات یک فیبر تک مود برحسب فاصله ساییده شده تا نقطه مرکزی فیبر

مرحله بعدی محاسبه جفت شونددگی میان یک SMF ساییده شده و یک PCF ساییده شده برای تغییر فاصله شکاف میان دو وجه ساییده شده هست. طول شکاف که همان فاصله بین دو وجه ساییده شده هست حدوداً $0.02\mu m$ بوده و فاصله هسته تا هسته $10.285\mu m$ هست. با ایجاد شکاف، بازدهی جفت شونددگی مودها به سرعت کاهش می‌یابد. وقتی که طول شکاف از $8\mu m$ بزرگ‌تر است، بازدهی مود ۱ کم‌تر از ۰.۱ هست درحالی‌که وقتی طول شکاف از $9\mu m$ بیش‌تر باشد، راندمان مود ۲ تقریباً نزدیک به صفر خواهد بود. در شبیه‌سازی، در پیوند مرکزی در جفت کننده PCF-SMF، طول شکاف حدوداً $0.02\mu m$ هست. میزان جفت شونددگی توان به‌نحار شده مودها با مود هسته PCF به‌اندازه ۰.۳۶۵ هست. روشن است که کاهش طول شکاف، بازدهی جفت شونددگی را افزایش خواهد داد که در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل (۵). دیاگرام شماتیک یک جفت کننده PCF-SMF [۱۰]

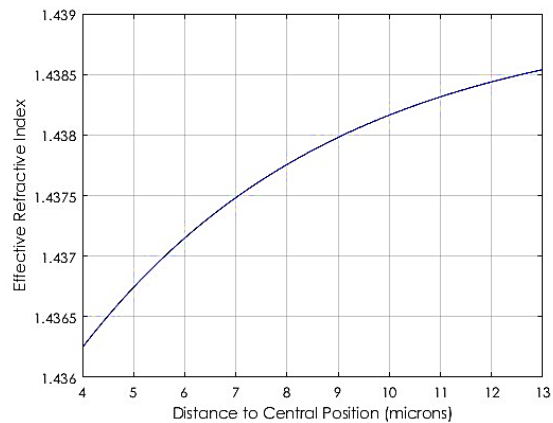
۳- محاسبات عددی و شبیه‌سازی ساختار

۳-۱ شبیه‌سازی‌های اولیه هر دو مدل فیبر

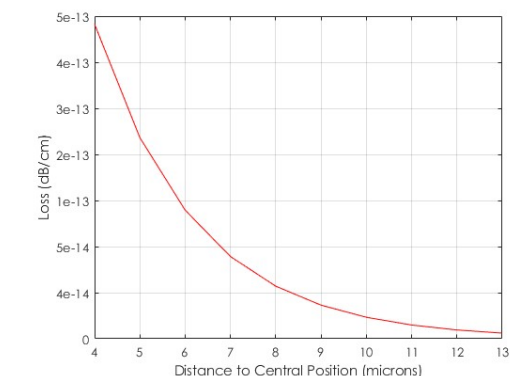
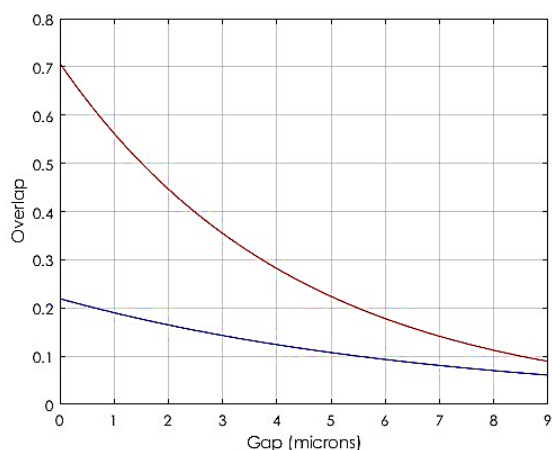
در اولین سری از محاسبات به مقایسه ضرایب شکست و تلفات فیبرهای SMF و PCF که بافاصله‌های مختلف از دو طرف نسبت به مرکز فیبر ساییده شده‌اند پرداخته خواهد شد. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ (الف) و ۶ (ب)، ۷ (الف) و ۷ (ب) نمایش داده شده است، ضرایب شکست مؤثر و تلفات مودهای اساسی فیبرها برحسب موقعیت سایش، رفتار مشابهی دارند. هنگامی که فاصله سیقل نسبت به موقعیت مرکزی فیبر $6\mu m$ است، رفتار تلفات و ضریب شکست فیبر بلوره فوتونی تغییراتی خواهد داشت و درعین حال، شعاع مؤثر SMF و PCF به ترتیب $4.1\mu m$ و $5.65\mu m$ هست که در نمودار شکل‌های ۱۰ (الف) و ۱۰ (ب) مشخص است. شعاع مؤثر یک فیبر بلوره فوتونی از رابطه (۲) به دست می‌آید

$$r = \Lambda - d/2 \quad (2)$$

منطقی است که از یک مدل دولایه برای تحلیل مودهای جفت شونددگی میان PCF و SMF استفاده خواهد شد. مودهای اساسی با عمق سایش PCF به‌اندازه $56.4\mu m$ و عمق سایش SMF به‌اندازه $58.4\mu m$ در شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (ب) مشاهده می‌شود.

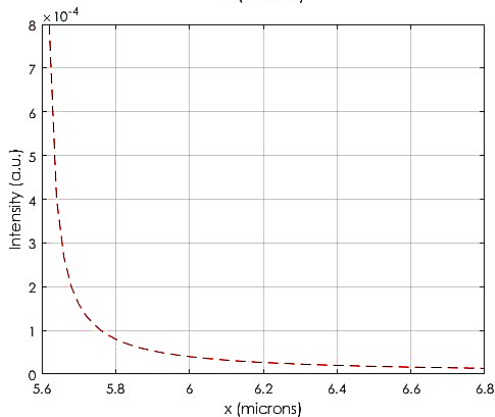
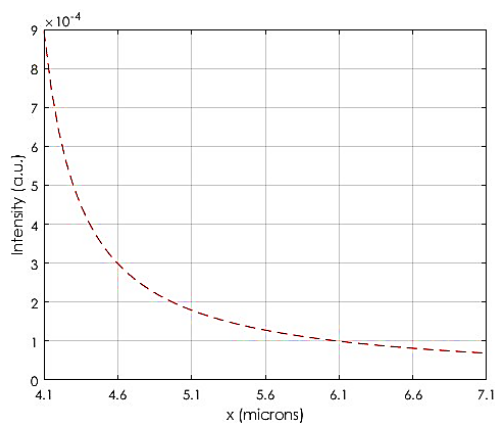


ترکیبی از نایجایی زاویه‌ای و عرضی است. در این مورد هسته PCF با ضریب شکست کم‌تر تنها به‌عنوان لایه پوششی دوم برای SMF عمل می‌کند و توان قادر به جفت‌شدن به هسته PCF نخواهد بود. مطابق با شکل ۱۱، به محض اینکه ضریب شکست هسته PCF نزدیک به ضریب شکست هسته SMF می‌شود، جفت شونده‌گی توان ماکزیمم به دست می‌آید. به هنگام افزایش یا کاهش ضریب شکست، جفت شونده‌گی توان به فرم نمایی کاهش پیدا خواهد کرد.

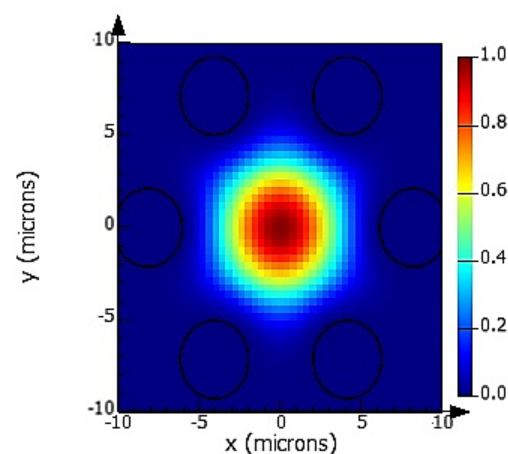
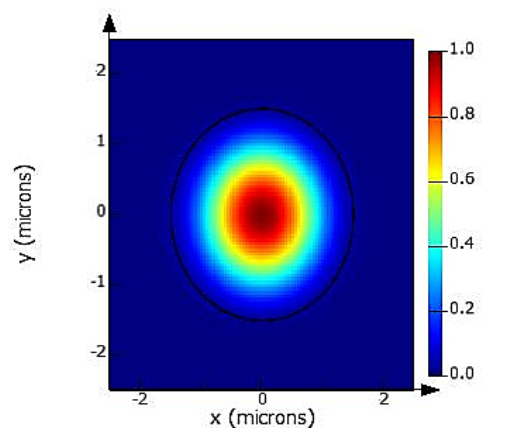


شکل (۷). (الف) ضریب شکست یک فیبر بلوره فوتونی برحسب فاصله ساییده شده از نقطه مرکزی فیبر. (ب) تلفات یک فیبر بلوره فوتونی برحسب فاصله ساییده شده از نقطه مرکزی فیبر

شکل (۹). تأثیر افزایش طول شکاف بر بازدهی جفت شونده‌گی



شکل (۱۰). (الف) نمایش میدان میرا برای یک فیبر تک‌مود (ب) نمایش میدان میرا یک فیبر بلوره فوتونی

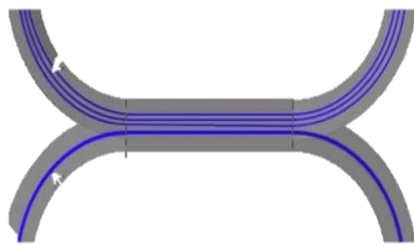


شکل (۸). (الف) نمایش مود اصلی یک فیبر تک‌مود (ب) نمایش مود اصلی یک فیبر بلوره فوتونی

همچنین ضریب شکست هسته فیبر پارامتری مهم به شمار می‌رود و بر جفت شونده‌گی میدان میرا تأثیرگذار است. بر طبق نظریه میدان میرا، اگر ضریب شکست هسته در PCF کم‌تر از ضریب شکست پوشش در SMF باشد، جفت شونده‌گی توان خیلی کمی وجود دارد. جفت شونده‌گی توان بین دو فیبر ناشی از

SMF و PCF می‌باشند. β_P و β_S ثوابت انتشار مودها در SMF و PCF بوده و C_{SP} و C_{PS} ضرایب جفت شوندهای فیبرهای SMF و PCF می‌باشند که توسط همپوشانی فضایی مودهای موج‌بر برهمکنش و با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$C_{ij} = -\frac{\omega \epsilon_0}{4 P_0} \int_{A_j} (n^2 - n_j^2) E_i^* \cdot E_j dx dy \quad (۵)$$



شکل (۱۲). آرایش شماتیک یک جفت کننده نوری [۹]

که $i, j = S, P$ و فرض می‌شود که خود جفت شوندهای نادیده گرفته شود. ω فرکانس زاویه‌ای سیگنال نوری است. P_0 توان تزریق شده کل به داخل فیبر تک مود بوده و E_i و E_j توزیع میدان الکتریکی در مودهایی است که برهمکنش دارند. n توزیع ضریب شکست و n_j ضریب شکست هسته فیبر ز ام هست. A_j ناحیه انتگرال‌گیری است به هنگامی که مود اساسی فیبر ناپایدار i ام با بخش هدایت‌شده فیبر j ام همپوشانی داشته باشد. چنانچه ضرایب جفت شوندهای مشخص باشد، حل معادلات (۱) و (۲) به راحتی امکان‌پذیر است. سهم جفت شوندهای برای جفت‌کننده‌های فیبر نوری معمول به محض اینکه آن‌ها برای هر دو هسته شعاع یکسان در نظر بگیرند، مشخص خواهد شد. محققانی به نام Snyder و Ankiwicz [۹] جفت‌کننده‌های فیبر نوری با شعاع‌های مؤثر متفاوت را تحلیل کرده‌اند. در پژوهشی که انجام خواهد شد، دو فیبر PCF و SMF با شعاع‌های مؤثر متفاوت در نظر گرفته خواهد شد؛ بنابراین، ضرایب جفت شوندهای با استفاده از میدان‌های مود به دست‌آمده توسط شبیه‌سازی مودی حاصل شده و $C_{PS} = 0.001333$ و $C_{SP} = 0.001456$ خواهد بود. به صورت ثابت انتشار برای فیبرهای SMF و PCF به ترتیب به صورت $\beta_S = 5.8252$ و $\beta_P = 5.82431$ خواهد بود.

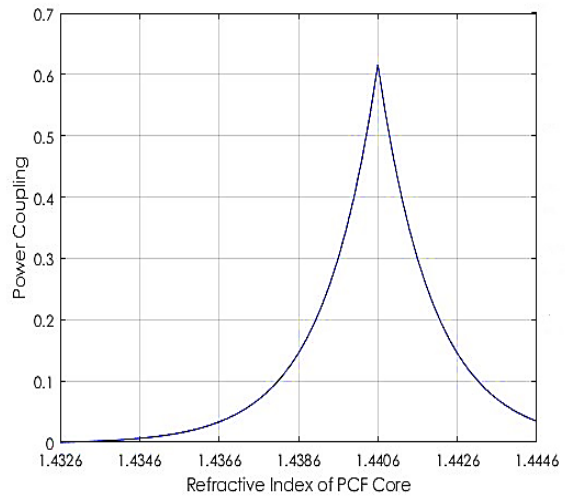
همچنین مقدار پارامتر مود عرضی به صورت زیر در رابطه (۶) خواهد بود:

$$W = 1.1428 V - 0.996 \quad (۶)$$

برای $1.5 \leq V \leq 2.5$ خطا کمتر از 0.2% خواهد بود و $W^2 + U^2 = V^2$ است. U و W پارامترهای مود عرضی بوده و از روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند:

$$W^2 = a^2(\beta^2 - n_{cl}^2 k_0^2) \quad (۷)$$

$$U^2 = a^2(n_{cl}^2 k_0^2 - \beta^2) \quad (۸)$$



شکل (۱۱). تأثیر ضریب شکست بر جفت شوندهای توان

۳-۲ محاسبات عددی و به دست آوردن نسبت جفت شوندهای در یک جفت کننده PCF-SMF

در ساختار اصلی ارائه شده در مرجع [۹] بازه طول جفت شوندهای از ۰ تا ۲۴۰۰ میکرومتر برای فیبرهای موازی در نظر گرفته شده است؛ اما در ساختار شبیه‌سازی شده در این مقاله طول جفت شوندهای تا ۳۰۰۰ میکرومتر نیز گسترده شده است. همچنین در خروجی در مرجع [۹] با در اختیار داشتن طول جفت شوندهای ۱۷۲۰ میکرومتر به نسبت جفت شوندهای ۹۳ درصد می‌رسد؛ اما در ساختار شبیه‌سازی شده این مقاله تنها برای طول جفت شوندهای ۶۰۰ میکرومتر این نسبت به بیش از ۹۲ درصد می‌رسد که نسبت به ساختار قبلی ارتقا پیدا کرده است. این بخش، محاسبات برای یک جفت‌کننده کامل PCF-SMF ارائه می‌شود. شبیه‌سازی انتشار تمام موج ساختار دقیق جفت‌کننده با استفاده از نرم‌افزار لومریکال نشان داده شده است. نتایج با راه‌حل تحلیلی مود جفت شده که برای توصیف جفت شوندهای بین دو موج‌بر موازی ارائه می‌شود، قابل مقایسه خواهد بود.

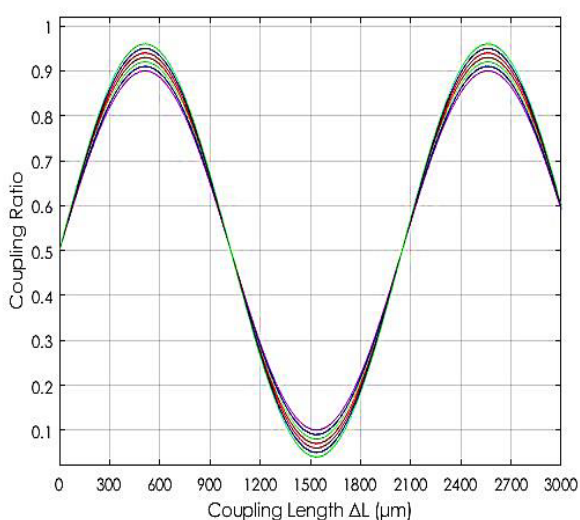
پیش‌تر جفت‌کننده ناپایدار SMF به‌ویژه برای شرایط جفت شوندهای ضعیف به دقت مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. جفت‌کننده ناپایدار به‌نوعی این‌گونه تعبیر می‌شود که شرایط جفت شوندهای در یک بازه طول موجی خاص و طول جفت شوندهای خاص همیشه پایدار نیست. برای یک جفت شوندهای ساده بین PCF و SMF، معادله جفت شوندهای مود اساسی و بافاصله انتشار z به فرم زیر در روابط (۳) و (۴) آمده است:

$$\frac{dE_S(z)}{dz} = i\beta_S E_S(z) + iC_{PS} E_P(z) \quad (۳)$$

$$\frac{dE_P(z)}{dz} = i\beta_P E_P(z) + iC_{SP} E_S(z) \quad (۴)$$

در اینجا، $E_P(z)$ و $E_S(z)$ دامنه مودهای اساسی فیبرهای

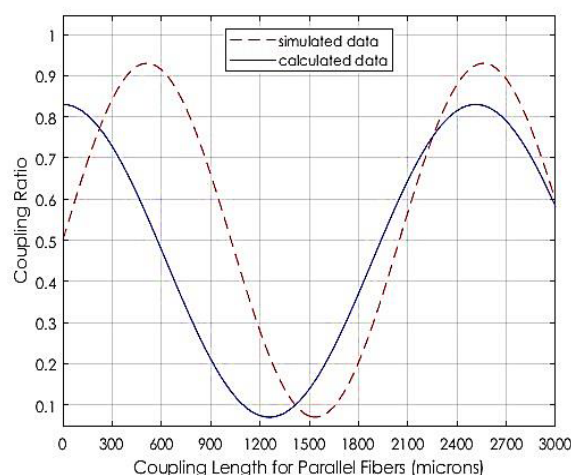
در پژوهش پیش رو، برخی از مشخصات مهم جفت‌کننده PCF-SMF در طول موج 1550 nm مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت؛ اما برای استفاده از چنین جفت‌کننده‌ای برای برخی کاربردها مانند حس‌گرهای شیمیایی، اطلاعات لازم از جمله اینکه محدوده طول موج عملکرد افزاره چقدر باید باشد ضروری است؛ چراکه ضریب جفت شونده با تغییر طول موج تغییر می‌کند. برای برخی کاربردهای کلی‌تر حس‌گرهای شیمیایی، طول موج عملکرد معمولاً در محدوده (1535 nm-1565 nm) مطلوب و مناسب به نظر می‌رسد.



شکل (۱۴). نسبت جفت شونده برحسب طول جفت شونده و با طول موج‌های 1535-1565 nm

نسبت جفت شونده PCF-SMF برحسب طول موج در شکل ۱۵ (الف) و (ب) به تصویر درآمده است. همچنین نسبت جفت شونده برحسب طول جفت شونده که در واقع همان طول موج بر جفت شونده است (ΔL) و در بازه طول موجی 1535-1565 nm نیز در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. مطابق شکل‌ها به نظر می‌رسد که به محض افزایش طول موج نسبت جفت شونده برای طول جفت شونده $600 \mu\text{m}$ افزایش می‌یابد در حالی که در همین شرایط نسبت جفت شونده برای طول جفت شونده $1760 \mu\text{m}$ کاهش می‌یابد. از بررسی نمودار نسبت برای طول جفت شونده $600 \mu\text{m}$ ، مشاهده می‌شود که نسبت جفت شونده برحسب طول موج از 0.897 تا 0.921 افزایش پیدا می‌کند و برای طول جفت شونده $1760 \mu\text{m}$ ، نسبت جفت شونده برحسب طول موج از 0.203 تا 0.183 کاهش پیدا می‌کند. از محاسبات فوق چنین برداشت می‌شود که بیشینه اختلاف نسبت جفت شونده در محدوده طول موجی مشخص شده 2-3% است.

در اینجا a شعاع هسته فیبر n_{cl} ضریب شکست پوشش، n_{co} ضریب شکست هسته و k_0 ثابت انتشار فیبر در خلأ هست [۱۱]. ابتدا به صورت عددی جفت شونده ناپایدار میان SMF و PCF موازی با استفاده از مدل موج بر موازی بالا محاسبه می‌شود. نسبت توان جفت شونده به عنوان تابعی از طول جفت شونده ΔL (که تنها از شروع محدوده موازی اندازه‌گیری می‌شود) در شکل ۱۳ نمودار خط‌چین شده قابل مشاهده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، بیانگر یک مشخصه وابستگی سینوسی با دوره تناوب 2.5 mm هست و مشخص می‌کند که طول جفت‌کننده بهینه برای بازدهی جفت شونده بیشینه که در حدود 83% است، 2.6 mm است. شبیه‌سازی کامل موج بر که در شکل ۱۳ آمده است نیز بیانگر وابستگی سینوسی طول جفت‌کننده است. شبیه‌سازی موج بر کامل بیانگر بازدهی جفت شونده بیشینه‌ای در حدود 92% و دوره 2.1 mm است.



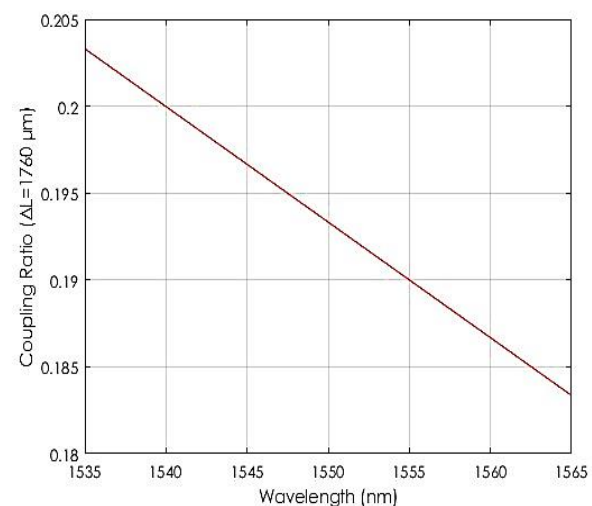
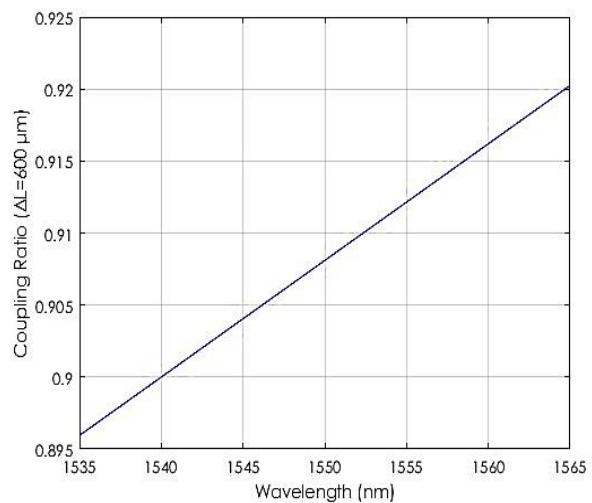
شکل (۱۳). نسبت جفت شونده برحسب طول جفت شونده با دور محاسباتی و شبیه‌سازی

اختلاف بین نتیجه شبیه‌سازی موج بر و محاسبات عددی مدل موج بر عجیب نیست؛ چراکه در شبیه‌سازی، شعاع مؤثر هسته و ضریب شکست در فیبر بلور فوتونی به دقت تخمین زده می‌شود؛ اما در مدل موج بر محاسبات عددی تقریبی انجام می‌شود. معادلات تحلیلی جفت شونده تنها مود اصلی یا اساسی فیبر بلور فوتونی را در نظر می‌گیرند در حالی که در شبیه‌سازی مودهای پوشش هم در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، در نظر گرفتن یا ننگرفتن پوشش بیانگر اختلاف جزئی‌ای هست که این نیز طبق بررسی‌های صورت گرفته ناشی از همپوشانی کمی بین مود اساسی و مودهای اصلی پوشش از مرتبه 10^{-8} است. مدل موج بر موازی راهنمای اولیه خوبی برای طراحی بهینه جفت‌کننده‌های PCF-SMF است.

جفت‌کننده موردنظر در طول جفت شوندگی $600\mu\text{m}$ در محدوده طول‌موجی $1535\text{--}1565\text{ nm}$ به بیشینه نسبت جفت شوندگی بیش از ۹۲٪ دست پیدا می‌کند که بسیار چشمگیر است. جفت‌کننده SMF-PCF معرفی‌شده، مؤلفه‌ای مهم در حس‌گرهای فیبر نوری جدید به شمار می‌رود که هم‌زمان از فیبرهای تک‌مود برای ورود و خروج نور و از فیبرهای بلوره فوتونی برای حسگری بهره می‌گیرند. در حس‌گرهای شیمیایی، می‌توان با کنترل طول جفت شوندگی و تنظیم طول‌موج در محدوده مشخص موردنیاز، به جفت شوندگی بالا برای اهداف حسگری دست پیدا کرد.

۵- مراجع

- [1] Katsusuke Tajima, Jian Zhou, Kazuhide Nakajima, and Kiminori Sato, "Ultralow Loss and Long Length Photonic," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, , vol. 22, no. 1, pp. 7-10, 2004.
- [2] Maryam Karimi, " Analysis of Photonic Crystal fibers Using Finite Difference Frequency Domain Method," *Journal Of Applied Electromagnetics*, , vol. 6, no. 2, pp. 33-42, 2018, (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1397.6.2.4.2>
- [3] J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J.P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, "All silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt.Lett*, vol. 21, pp. 1547-1549, 1996.
- [4] J. Villatoro and J. Zubia, "New perspectives in photonic crystal fibre," *Optics & Laser Technology*, pp. 67-75, 2016.
- [5] X. Sun, "Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal," *Opt. Lett.* , vol. 32, pp. 2484-2486, 2007.
- [6] J. B. J. e. al., "Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor," *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1974-1976, 2004.
- [7] Z. He, F. Tian, Y. Zhu, N. Lavlinskaia, and H. Du, "Long-Period gratings in photonic crystal fiber as an optofluidic label-free biosensor," *Biosensors Bioelectron*, vol. 26, pp. 4774-4778, 2011.
- [8] H. Kim, J. Kim, U. C. Paek, B. H. Lee, and K. T. Kim, "Tunable Photonic crystal fiber coupler based on a side-polishing technique," *Opt.Lett*, vol. 29, pp. 1194-1196, 2004.
- [9] Heming Wei, Yinian Zhu, and Sridhar Krishnaswamy, "Numerical Analysis of Waveguide Coupling Between Photonic Crystal Fiber and Single-Mode Fiber," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 27, no. 20, pp. 2142-2145, 2015.
- [10] Kunimasa Saitoh, Yuichiro Sato, and Masanori Koshiba, "Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers," *OPTICS EXPRESS*, vol. 11, no. 24, pp. 3188-3195, 2003.
- [11] H. S. Jang, K. N. Park, and K. S. Lee, "Characterization of tunable photonic crystal fiber directional couplers," *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 18, pp. 3688-3693, 2007.
- [12] D. Hua and L. Fu, "Numerical analysis of coupling characteristics of tunable photonic crystal fiber coupler for nonlinear optical microscopy," *IEEE*



شکل (۱۵). (الف) نسبت جفت شوندگی برای طول‌موج‌های ۱۵۳۵-۱۵۶۵ nm با طول جفت شوندگی $600\mu\text{m}$ (ب) نسبت جفت شوندگی برای طول‌موج‌های ۱۵۳۵-۱۵۶۵ nm با طول جفت شوندگی $1760\mu\text{m}$

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از معرفی مختصری از مشخصات جفت‌کننده‌های فیبر بلوره فوتونی به ارائه طرحی با عنوان جفت‌کننده PCF-SMF پرداخته شد. جفت شوندگی بهینه مؤثر بین فیبرهای تک‌مود و بلوره فوتونی به صورت عددی در نرم‌افزار لومریکال و با استفاده از مازول‌های FDTD و Mode Solution و شبیه‌سازی شد. نتایج عددی بیانگر آن است که با کنترل طول جفت شوندگی، نسبت جفت شوندگی بالا قابل‌دسترس خواهد بود. با تغییر شعاع و ضریب شکست پوشش و همین‌طور هسته و با کنترل طول جفت شوندگی تقریباً انتقال کامل توان انجام خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این جفت‌کننده، عملکرد نسبتاً خوبی از خود به نمایش می‌گذارد؛ یعنی

Photon. Technol. Lett., vol. 24, no. 2, pp. 125–127,
Jan. 15, 2012.