

اصلاح ساختار فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا به منظور ساده سازی فرآیند ساخت آنها

اشکان قنبری^(۱) - مهران نیکو^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - مهندسی برق، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
(۲) کارشناس ارشد - مهندسی کامپیوتر، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۲

خلاصه: در این تحقیق، ساختاری جدید از فیبرهای فوتونیک کریستال پیشنهاد خواهد شد، که در آنها به جای استفاده از حفره‌های هوا در ناحیه پوسته فیبر، از میله‌های سیلیکای تغلیط شده با فلورین ۲٪ به منظور کاهش مشکلات مرتبط با تغییر شکل حفره‌های هوا در فرآیند ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال استفاده خواهد شد. همچنین در ادامه، تعدادی از خواص انتشاری فیبر فوتونیک کریستال پیشنهاد شده با یک فیبر فوتونیک کریستال معمولی سیلیکا همانند فرکانس نرمالیزه، ضریب شکست موثر، پاشندگی کل و پاشندگیهای مراتب بالاتر (۲ و ۳) مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار خواهند گرفت. نهایتاً مشخص خواهد شد که ساختار جدید فیبر فوتونیک کریستال از لحاظ استفاده در فرآیند ساخت بسیار ساده‌تر از فیبر فوتونیک کریستال سیلیکای معمولی می‌باشند و از لحاظ انتشار سالیونهای فمتوثانیه در شرایط مناسبی قرار ندارد. همچنین نشان داده خواهد شد، شرایط فیبر کریستال نوری سیلیکا جهت انتشار سالیونهای فمتوثانیه به مراتب ایده آل تر نسبت به ساختار جدید است.

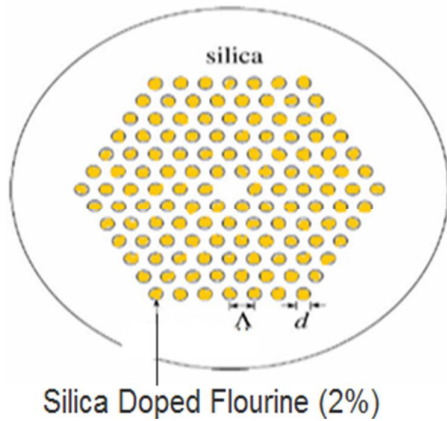
کلمات کلیدی: سیلیکا، فلورین، فیبر فوتونیک کریستال، فمتوثانیه.

۱- مقدمه

کنترل طول موج برای هدایت نور در مناطقی از هسته موجبر با ضریب پایین‌تر استفاده می‌کنند [۱]. فیبرهای کریستال فوتونی هدایت شاخص^۴ همچنین به عنوان فیبرهای ریز ساختار، فیبرهای حفره‌دار نیز نامیده می‌شوند که ویژگی‌های خاصی در کنترل پاشندگی^۵ از خود به نمایش می‌گذارند [۱،۲].

در دهه‌های اخیر بسیاری از کارهای تحقیقاتی به حوزه‌ی فیبر فوتونیک کریستال اختصاص داده شده است. در حقیقت امروزه کنترل تکنولوژیکی ویژگی‌های فیبر فوتونیک کریستال قابل مقایسه با فیبرهای معمولی استاندارد است. فیبرهای کریستال فوتونی هدایت شاخص ویژگی خاصی در کنترل پاشندگی رنگی با تغییر قطر حفره‌ها (d) و فاصله بین حفره‌ها (Λ) را دارند. تاکنون فیبرهای فوتونیک کریستال متنوعی با ویژگیهای پاشندگی قابل توجهی مانند: طول موجهای صفر پاشندگی قابل انتقال به طول موجهای نزدیک مادون قرمز، پاشندگی رنگی فوق سطح، و همچنین یک پاشندگی بزرگ مثبت با یک شیب منفی در محدوده طول موج ۱۵۵۰ نانومتر گزارش شده است.

در سالهای اخیر، فیبرهای فوتونیک کریستال^۱ توجه زیادی را در میان انجمنها و محققین اپتیک و فوتونیک به خود جلب کرده است. یکی از مناسبترین کاربردهای کریستالهای فوتونی در امکان تولید ابزارهای نوری یکپارچه با فوتونها به عنوان حاملهای اطلاعات است که متعاقب آن سرعت و پهنای باند در سیستمهای مخابراتی پیشرفته به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. فیبرهای فوتونیک کریستال که نوعی از کریستالهای فوتونی^۲ دو بعدی متشکل از ناحیه نقص مرکزی احاطه شده به وسیله حفره‌های هوا که در طول فیبر بسط داده شده‌اند، در سالهای اخیر توجه زیادی را به علت ویژگیهای منحصر بفردی که نسبت به فیبرهای نوری معمولی دارند به خود جلب کرده است. فیبرهای فوتونیک کریستال به دو نوع شکل کلی تقسیم می‌شوند: گروه اول فیبرهای کریستال فوتونی هدایت کننده شاخص است که نور را به وسیله مجموعه بازتابهای داخلی (TIR) بین هسته و منطقه‌ای با پوشش فلزی و حفره‌های هوا چندانگانه هدایت می‌کند و گروه دوم، از ساختارهای متناوب در نشان دادن تاثیر باند ممنوعه فوتونی^۳ در



شکل (۲): ساختار فیبر فوتونیک کریستال پیشنهاد شده.
Fig. (2): Proposed photonic crystal fiber structure

با تغلیظ^۸ سیلیکای خالص با مقداری ناخالصی، ضریب شکست بسته به نوع ناخالصی اضافه شده کاهش و یا افزایش می‌یابد. تغلیظ سیلیکای خالص با موادی همچون فلورین ضریب شکست آن را کاهش می‌دهد [۷]. در فیبر فوتونیک کریستال پیشنهاد شده، سیلیکا با ماده فلورین و با درصد ناخالصی ۲٪ تغلیظ و در حفره‌های هوا جایگزین خواهد شد. جهت انتشار نور به روش مجموعه بازتابی داخلی در فیبر، لازم است که ضریب شکست هسته بیشتر از ضریب شکست پوسته گردد بنابراین با داشتن طرحی که در آن میله سیلیکای خالص به عنوان هسته فیبر و میله سیلیکای تغلیظ شده با فلورین به عنوان ناحیه پوسته عمل کند، امکان انتشار نور با روش انعکاس داخلی شبیه به فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکای معمولی (شکل (۱)) وجود خواهد داشت.

شکل (۲) ساختار فیبر فوتونیک کریستال اصلاح شده (MPCF) را نشان می‌دهد همان طوری که مشخص است در این ساختار میله سیلیکای خالص به عنوان هسته فیبر و میله‌های سیلیکای تغلیظ شده در پوسته فیبر به جای حفره‌های هوا وجود دارد.

۳- آنالیز خواص انتشاری فیبر فوتونیک کریستال با ساختار

جدید و فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا

ویژگی‌های فیبرهای نوری استاندارد غالباً با پارامتر V نشان داده می‌شوند. اخیراً مشخص گردیده است که فیبرهای فوتونیک کریستال با شبکه مثلثی از حفره‌های هوا به خوبی می‌توانند در عبارت عدد V که از رابطه (۱) به دست خواهد آمد پارامتریزه شوند [۱۰-۸].

$$V\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right) = \sqrt{U^2\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right) + W^2\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right)} \quad (1)$$

که در آن V ، U و W به ترتیب به عنوان فرکانس نرمالیزه (عدد V)، فاز عرضی نرمالیزه و ثابت تضعیف شناخته می‌شوند و از مجموعه روابط زیر قابل محاسبه هستند

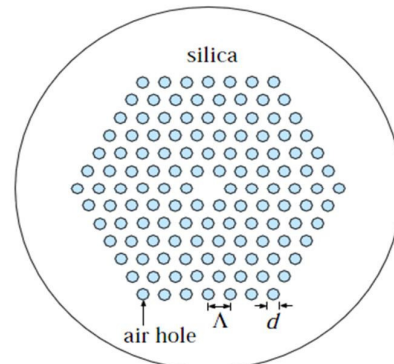
طراحی و ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال با چنین ویژگی‌های مخابراتی مورد نیاز، یک مشکل تکنولوژیکی و اساسی است که تنها با کنترل پارامترها و متغیرهای ماکروسکوپی دخیل در ساخت این موجرها مثل، کنترل دما، طراحی مناسب ابعاد فیبر $\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right)$ و تنظیم میزان کشش و تنش در پروسه ساخت فیبر و ... [۶-۱] قابل رفع می‌باشد.

در این تحقیق به منظور جلوگیری از تغییر شکل حفره‌های هوا فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا (SPCF) معمولی و همچنین به منظور به حداقل رسانیدن مشکلات مرتبط با ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال، یک ساختار جدیدی از فیبرهای فوتونیک کریستال ارائه خواهد گردید که در آن به جای استفاده از حفره‌های پر شده از هوا در ناحیه پوسته^۶، از حفره‌های پر شده از سیلیکای تغلیظ شده با ماده فلورین^۷ ۲٪ استفاده می‌شود. با پیشنهاد چنین ساختاری نهایتاً مشخص می‌گردد که در کنار تسهیل در فرآیند ساخت، فیبر پیشنهاد شده خواص انتشاری مناسبی را به جهت انتشار سالیونتها تجربه خواهد نمود.

۲- ساختار فیبر فوتونیک کریستال پیشنهاد شده

شکل (۱)، نمای یک فیبر فوتونیک کریستال با شبکه مثلثی از حفره‌های هوا را نشان می‌دهد که در آن d قطر حفره هوا و Λ ، گام حفره است. ضریب شکست سیلیکا ۱/۴۵ است. در مرکز، یک حفره هوا حذف شده و تشکیل مرکز ناقص با ضریب شکست بالایی را داده است که به عنوان هسته فیبر عمل می‌کند [۴].

از مهمترین مشکلات در ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال، وجود بد شکلی در حفره‌های هوا، ظهور حفره‌های اضافه، و اختلال در تقارن ساختاری فیبر می‌باشد. اگرچه فیبرهای فوتونیک کریستال مزایای زیادی نسبت به فیبرهای تک مد معمولی دارد، اما در استفاده عملی از این موجرها با شکست روبرو شده است که علت اصلی این مشکلات، ناشی از بد شکلی و تغییر شکل حفره‌های دایروی در حین پروسه ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال معمولی است.



شکل (۱): شماتیک یک فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا [۴]
Fig. (1): Silica photonic crystal fiber schematic

(۲) قابل محاسبه خواهد بود. شکل (۳-الف) و شکل (۳-ب)، به ترتیب پارامتر V فیبر کریستال نوری سیلیکا و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید را بر حسب طول موج نرمالیزه و به ازای مقادیر

مختلف قطر حفره هوای نرمالیزه ($\frac{d}{\Lambda}$) بر حسب طول موج نرمالیزه

نشان می‌دهد. همان طوری که از این اشکال مشخص است، هر دو ساختار فیبر، شرایط عملکرد تک مدی ($V=2.405$) را دارا هستند.

فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا حداکثر به ازای طراحی فیبر برای

$\frac{d}{\Lambda} \approx 0.45$ شرط عملکرد تک مدی را حفظ می‌کند حال آنکه از

شکل (۳-ب) مشخص است که برای فیبر فوتونیک کریستال با

ساختار جدید حالت عملکرد تک مدی، حداکثر به ازای طراحی فیبر با

$\frac{d}{\Lambda} \approx 0.52$ امکان پذیر خواهد بود. طراحی یک مقدار عددی بالا در

طراحی قطر حفره هوای نرمالیزه فیبرهای کریستال نوری (مرتبط با

طراحی عدد V)، فرآیند ساخت فیبر را بسیار ساده‌تر می‌سازد. به

عبارتی دیگر، در فرآیند ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال بدیهی

است که هرچه مقیاسهای طراحی ابعاد فیبر بزرگتر انتخاب گردند،

دقت لازم در پروسه ساخت کمتر، هزینه‌های ساخت پایین‌تر و در

نتیجه فرآیند ساخت آسانتر است. جدا از آن، طراحی یک قطر حفره

هوای نرمالیزه با مقدار بالاتر در نهایت بد شکلی حفره‌های دایروی

موجود در منطقه پوسته فیبر را بسیار کاهش می‌دهد. بنابراین، بر

اساس نتایج بیان شده، ساختار فیبر پیشنهاد شده جهت کاربرد در

فرآیند ساخت بسیار ایده‌آل‌تر نسبت به فیبرهای فوتونیک کریستال

سیلیکا می‌باشند. از دیگر نکات قابل ذکر در مقایسه شکل‌های (۳-الف

و ب)، کاهش مقدار پارامتر V در تمام محدوده طول موجهای دلخواه

در فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده، به دلیل اختلاف کم

ضریب شکست هسته و پوسته می‌باشد. به ازای $\frac{d}{\Lambda} = 0.8$ و

$\frac{\lambda}{\Lambda} = 1$ ، مقدار پارامتر V برای فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا برابر

2.79 می‌باشد درحالیکه به ازای همین مقادیر قطر هوای نرمالیزه و

طول موج نرمالیزه، مقدار پارامتر V برابر با 2.54 در فیبر فوتونیک

$$V\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right) = \frac{2\pi a_{\text{eff}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2(\lambda) - n_{\text{FSM}}^2(\lambda)}$$

و

$$U\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right) = \frac{2\pi a_{\text{eff}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2(\lambda) - n_{\text{eff}}^2(\lambda)} \quad (۲)$$

و

$$W\left(\frac{d}{\Lambda}, \frac{\lambda}{\Lambda}\right) = \frac{2\pi a_{\text{eff}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{eff}}^2(\lambda) - n_{\text{FSM}}^2(\lambda)}$$

که در آنها، a_{eff} شعاع مؤثر هسته فیبر است و به صورت $a_{\text{eff}} = \frac{\Lambda}{\sqrt{3}}$ محاسبه می‌گردد، n_{co} ضریب شکست هسته فیبر

است (برای شیشه سیلیکا ۱/۴۵ ثابت فرض می‌گردد [۴]) و

$n_{\text{FSM}}(\lambda)$ ضریب شکست پوسته می‌باشد. $n_{\text{eff}}(\lambda)$ به عنوان

ضریب مؤثر مد پایه شناخته می‌شود و λ محدوده طول موج

عملکردی است. روش عنصر محدود تمام برداری (FEM) تواند جهت

تجزیه و تحلیل خواص انتشاری در فیبرهای فوتونیک کریستال

سیلیکا به کار گرفته شود. همچنین در عوض آن می‌توانیم از روش

روابط تجربی (ERM) برای آنالیز خواص بنیادی استفاده کنیم [۴].

بدین صورت که: در مرحله اول با استفاده از روابط زیر متغیرهای V

و W به ازای مقادیر دلخواهی از قطر حفره هوای نرمالیزه، محدوده

طول موج دلخواه (λ) و مقادیر مختلفی از پیچ (Λ) با دقت بسیار

مناسبتی نسبت به مقادیر به دست آمده از روش عنصر محدود تمام

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

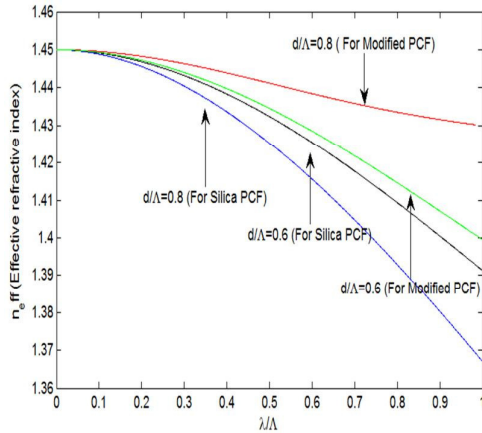
برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].

برداری به دست خواهند آمد [۸-۹].



شکل (۴): ضرایب شکست موثر فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده به ازای مقادیر مختلف قطر حفره هوای نرمالیزه
 Fig. (4): Effective refractive index of Silica and Modified photonic crystal fibers for different values of normalized air holes

۳-۱- تجزیه و تحلیل پاشندگی در فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید

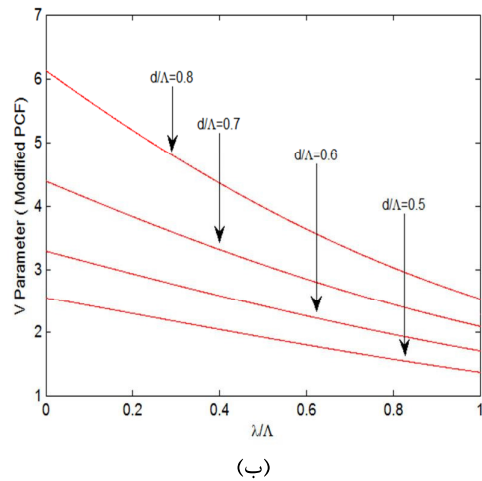
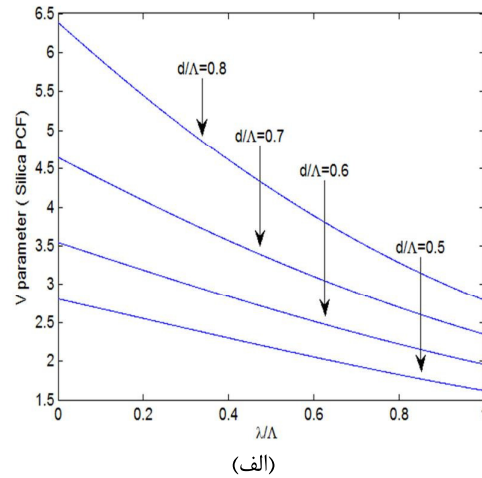
پاشندگی در فیبرهای نوری یک پدیده شناخته شده است که باعث پهن شدن پالسهای نوری منتشر شده در موجبر در حوزه زمان می‌شود. پاشندگی فیبرهای فوتونیک کریستال به متغیرهای طول موج (λ)، پیچ (Λ)، و سایز حفره هوای نرمالیزه ($\frac{d}{\Lambda}$) وابستگی دارد که این وابستگی، امکان انتقال طول موج پاشندگی صفر^{۱۲} به طول موجهای قابل رویت و همچنین نزدیک فروسرخ را فراهم می‌آورد [۹-۱۱]. پاشندگی موجبری، D_w ، یک فیبر فوتونیک کریستال برای طول موجهای متفاوت از مقادیر $n_{eff}(\lambda)$ با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$D_w(\lambda) = \frac{-\lambda \partial^2 \text{Re}[n_{eff}(\lambda)]}{c \partial \lambda^2} \quad (4)$$

که در آن c سرعت نور در خلاء است. با فرض مستقل بودن سهم پاشندگی ماده‌ای و پاشندگی موجبری در موجبر [۴]، نهایتاً پاشندگی ماده‌ای (D_m) باید به پاشندگی موجبری اضافه گردد تا پاشندگی کل فیبر (D_t) همان طوری که در فرمول (۵) دیده می‌شود محاسبه گردد [۵].

$$D_t(\lambda) = \underbrace{\frac{-\lambda \partial^2 \text{Re}[n_{eff}(\lambda)]}{c \partial \lambda^2}}_{D_w} + \underbrace{\frac{-\lambda \partial^2 n_s(\lambda)}{c \partial \lambda^2}}_{D_m} \quad (5)$$

که در آن، $n_s(\lambda)$ ، ضریب شکست هسته موجبر مربوطه با جنس سیلیکا است و از فرمول، Sellmier، محاسبه می‌گردد [۵]. شکل (۵)، نمودار پاشندگی کل را در فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده را نمایش می‌دهد. بر خلاف فیبرهای معمولی، با استفاده از فیبرهای فوتونیک کریستال

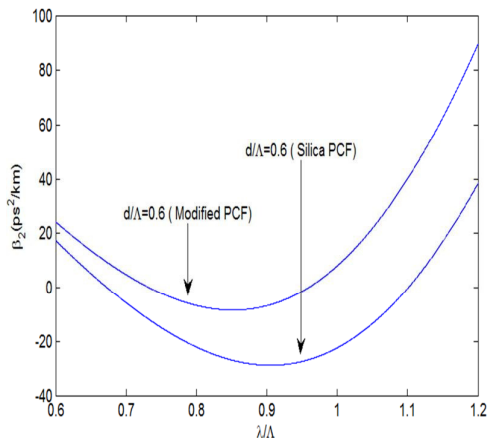


شکل (۳-الف و ب): پارامتر V به ازای مقادیر مختلف قطر حفره هوای نرمالیزه برای فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده
 Fig. (3): a & b. V parameter of Silica and modified photonic crystal fibers for different values of normalized air holes

شکل (۴)، تغییرات ضریب شکست^{۱۲} فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده^{۱۱} را به ازای مقادیر یکسان قطر حفره هوای نرمالیزه و در یک محدوده یکسانی از طول موج نرمالیزه ($\frac{\lambda}{\Lambda}$) نشان می‌دهد. همان طوری که از این شکل مشخص است، هرچه طول موج نرمالیزه افزایش می‌یابد، مقادیر ضریب شکست موثر فیبرهای کریستال نوری سیلیکا و اصلاح شده در $\frac{d}{\Lambda}$ های بزرگ دچار اختلاف بیشتری شده و از هم فاصله می‌گیرند. از سوی دیگر، مقادیر ضریب شکست موثر فیبرهای کریستال نوری سیلیکا و اصلاح شده در $\frac{d}{\Lambda}$ های کوچک‌تر و در تمام محدوده طول موجهای نرمالیزه، دارای اختلاف کمتری هستند و مقادیر آنها به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

نکته قابل اهمیت در این شکل آن است که پاشندگی سرعت گروهی به دست آمده در محدوده طول موجهای نرمالیزه (۸/ تا ۱) برای فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا نسبت به فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده دارای مقدار منفی تر و تخت تری است که این امر، نهایتاً، در انتشار سالیونها بسیار حائز اهمیت است و بیانگر ایده آلی فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا نسبت به ساختار جدید خواهد بود. دلیل این موضوع آن است که کمینه شدگی پاشندگی مرتبه ۲ در طراحی های فیبر فوتونیک کریستال نهایتاً موجب افزایش طول پاشندگی $(L_D \propto \frac{1}{\beta_2})$ [۱۳] خواهد گشت. هرچه طول پاشندگی در طراحی های فیبر بیشتر باشد در نتیجه در انتشار ایده آل و تولید پالسهای لیزری فشرده تر با کیفیت تر تاثیر مناسبی خواهد داشت. از سویی دیگر کسب یک منطقه پاشندگی مرتبه (۲) تخت نهایتاً موجب کاهش پاشندگی های مراتب بالاتر و کاهش اثر تخریبی آنها بر روی پالسهای نوری در دوره فمتوثانیه خواهد بود.

وقتی انتشار پالسهای نوری در دوره های فمتوثانیه مورد توجه قرار می گیرد، پاشندگی مرتبه سه^{۱۴} مهم می شود و باید در معادله عمومی غیر خطی شرودینگر^{۱۵} اعمال گردد [۸-۱۵]. در شکل (۷)، پاشندگی مرتبه سه بر حسب طول موج نرمالیزه برای فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده به ازای $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ رسم گردیده است. در این شکل کاملاً مشخص است که در همان ناحیه از طول موجهای نرمالیزه (۸/ تا ۱) که یک پاشندگی سرعت گروهی منفی تقریباً تخت وجود دارد، فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده دارای مقادیر کوچکی از پاشندگی های مراتب سوم می باشند. هر چند مقدار پاشندگی مرتبه ۳ فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا به مراتب کوچکتر است.



شکل (۶): نمودار پاشندگی مرتبه ۲ برای فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده

Fig. (6): Second-order dispersion diagram of silica and modified photonic crystal fibers

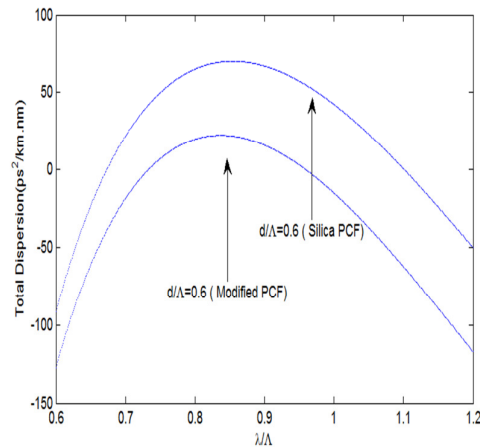
امکان انتقال نقطه صفر پاشندگی به زیر ۱۳۰۰ نانومتر امکان پذیر خواهد بود. در این شکل مشخص است که فیبرهای طراحی شده هر کدام دارای ۲ نقطه صفر پاشندگی در محدوده طول موجهای نزدیک فرو سرخ (کمتر از ۱۳۰۰ نانومتر)، یعنی ۱۱۱۰ نانومتر و ۹۵۰ نانومتر و همچنین طول موجهای قابل روئت یعنی ۶۷۵ نانومتر و ۷۴۰ نانومتر به ترتیب برای فیبر کریستال نوری سیلیکا و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید هستند. این نکته قابل مقایسه با طراحی های فیبر کریستال نوری خواهد بود که دارای فقط یک نقطه صفر پاشندگی آن هم در ناحیه فرورسرخ و یا فرو سرخ دور هستند [۱۱]. کسب دو نقطه صفر پاشندگی در طراحی و مهندسی فیبرهای فوتونیک کریستال در کاربرد آنها در تولید پالسهای لیزری و طیف ابرپویستار بسیار با اهمیت است.

پاشندگی سرعت گروهی (GVD) (یا اصطلاحاً متغیر β_2) فیبرهای فوتونیک کریستال می تواند مستقیماً از فرمول زیر محاسبه گردد [۱۲].

$$GVD(\beta_2) = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D_t(\lambda) \quad (۶)$$

از آنجا که از دیگر اهداف این تحقیق، طراحی دو نوع فیبر فوتونیک کریستال برای رسیدن به کمینه پاشندگی سرعت گروهی منفی به منظور انتشار سالیون^{۱۳} مناسب در فیبرها می باشد، از این رو پاشندگی سرعت گروهی به عنوان تابعی از طول موج نرمالیزه به پیچ در حوزه طیف قابل روئیت و نزدیک فرو سرخ به ازای یک کسر بر شدگی هوای

نرمالیزه وسیع ($\frac{d}{\Lambda} = 0.6$) در شکل (۶) رسم گردید.



شکل (۵): نمودار پاشندگی کل برای فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا و

اصلاح شده بر حسب $\frac{\lambda}{\Lambda}$ و به ازای $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$

Fig. (5): Total dispersion of silica and modified photonic crystal fibers as a function of $\frac{\lambda}{\Lambda}$ for $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$

۴- انتشار سالیتهای فمتونانیه و تولید ابرپیوستار در فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده

معادله موجی که انتشار پالسهای نوری را از طریق فیبرهای نوری نشان می‌دهد، می‌تواند از معادلات ماکسول حاصل گردد [۱۶، ۱۹]. مطالعه اثرات خطی و غیر خطی در فیبرهای نوری مستلزم استفاده از پالسهای نوری با پهنای فمتو ثانیه^{۱۶} است. وقتی چنین پالسهایی از طریق فیبر نوری منتشر می‌شود، هر دو اثر خطی و غیر خطی بر روی شکل پالس و طیف آن تأثیر می‌گذارد. اگر $A(z,t)$ را تغییر دامنه پالس در نظر بگیریم، دیده خواهد شد، معادله دیفرانسیلی که انتشار پالسهای نوری را از طریق فیبر نوری نشان می‌دهد و به معادله عمومی غیر خطی شرویدینگر شناخته شده است، به فرم کلی زیر می‌باشد [۸].

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \underbrace{\frac{i\beta_2}{2T_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_3}{6T_0^3} \frac{\partial^3 A}{\partial \tau^3}}_{\text{Linear-Effects}} + \underbrace{i\gamma(|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0 T_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial \tau} - \frac{T_R}{T_0} A \frac{\partial |A|^2}{\partial \tau})}_{\text{Nonlinear-effects}}$$

که در آن $\tau = \frac{T}{T_0}$ زمان نرمالیزه است. T زمان نزول، T_0 پهنای

پالس اولیه معادل با $(T_0 \approx \frac{T_{FWHM}}{1.76})$ که در آن T_{FWHM} پهنای پالس نیم بیشینه است. β_2, β_3 به ترتیب پاشندگی سرعت گروهی و پاشندگی مرتبه ۳ (TOD) می‌باشند. ω_0 فرکانس زاویه‌ای مرکزی و γ ضریب غیر خطی است که با رابطه زیر تعریف می‌گردد،

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} c} \quad (7)$$

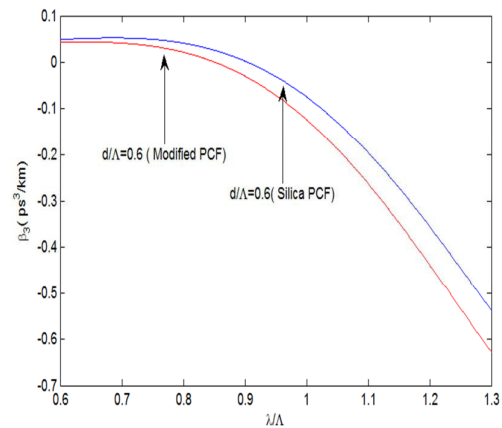
که در آن $n_2 (\frac{m^2}{W})$ ضریب شکست غیر خطی [۱۸] و c سرعت نور است. با استفاده از پارامتر مسافت نرمالیزه که به صورت

$$\xi = \frac{z}{L_D} \quad (8)$$

تعریف می‌گردد و پارامتر دامنه نرمالیزه $U(z, \tau) = \frac{A(z, \tau)}{\sqrt{P_0}}$ ، معادله (۱) می‌تواند به شکل نرمالیزه شده زیر تغییر پیدا کند [۲۰].

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \underbrace{\frac{i \operatorname{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0} \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3}}_{\text{Linear-Effects}} + \underbrace{i(|U|^2 U + \frac{i}{\omega_0 T_0} \frac{\partial(|U|^2 U)}{\partial \tau} - \frac{T_R U}{T_0} \frac{\partial |U|^2}{\partial \tau})}_{\text{Nonlinear-effects}}$$

جدول (۱)، به طور مختصر وضعیت طراحیهای پاشندگی در هر ۲ نوع فیبر را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، به طور کامل مشخص است که فیبر کریستال نوری سیلیکا دارای پاشندگی مرتبه ۲ کمینه منفی و تخت‌تری نسبت به فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید است لذا دارای مقدار پاشندگی مرتبه ۳ کوچکتری نسبت به فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید می‌باشد، هر چند فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید نیز نسبت به دیگر طراحی‌ها دارای شرایط تقریباً مناسبی جهت انتشار موج می‌باشد اما به طور ویژه، در این تحقیق و بر اساس نتایج مشخص است که برای انتشار پالسهای نوری فمتو ثانیه، فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا با ساختار مثلثی از حفره‌های هوا شرایط ایده‌آلی را بر اساس یک طراحی و مهندسی مناسب دارا هستند.



شکل (۷): نمودار پاشندگی مرتبه ۳ برای فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید بر حسب طول موج نرمالیزه. هر دو به

$$\frac{d}{\Lambda} = 0.6 \text{ ازای}$$

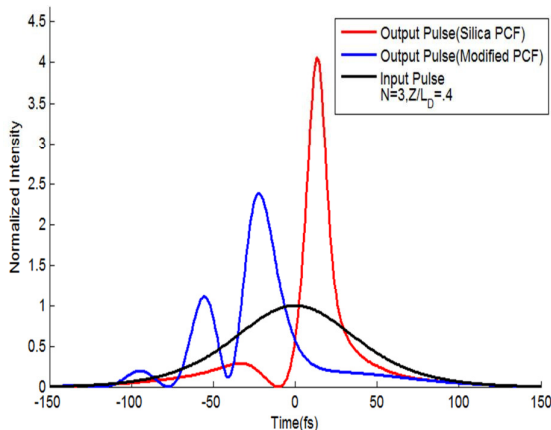
Fig. (7): Third-order dispersion diagram for silica and novel structure photonic crystal fiber as a function of normalized wavelength, both for $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$

جدول (۱): مقایسه مقادیر پاشندگی در فیبر فوتونیک کریستال با ساختار جدید و سیلیکا

Table (1): Comparison between dispersion values in silica and novel structure photonic crystal fiber

$\lambda = 0.9 \mu m$	پاشندگی مرتبه ۲	پاشندگی مرتبه ۳
Silica PCF	$-29 \text{ ps}^2/\text{km}$	≈ 0
Modified PCF	$-7 \text{ ps}^2/\text{km}$	$-0.03 \text{ ps}^3/\text{km}$

زمانی، نسبت به پالس نوری خروجی از فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا نشان می‌دهد. ایجاد تاخیر زمانی یکی از مهمترین مشکلات موجود به دلیل تأثیر مخرب پاشندگی‌های مراتب بالاتر بر روی پالسهای نوری فمتوثانیه است. بنابراین کاملاً مشخص است که فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا در مقایسه با فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده دارای شرایط بهتری جهت کاربرد در انتشار سالیوتونها است. شکل ۹، تحول طیفی در خروجی هر دو نمونه فیبر را به نمایش می‌گذارد. کاملاً مشخص است که طیف ابر پیوسته خروجی از فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده دارای پهنای باند (طول موجی) به مراتب کمتری در مقایسه با نمونه فیبر فوتونیک کریستال سیلیکای طراحی شده می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در تأثیر پاشندگی مرتبه ۳ بر روی طیف بررسی کرد به طوری که موجب کاهش پهنای باند طیف خروجی می‌گردد. افزایش پهنای باند در طیفهای ابر پیوستار یکی از اساسی‌ترین عوامل تأثیر گذار در ارتقاء کاربردهای فیبر مخابرات نوریت است که این امر به طور کاملاً مشخص در شکل (۹) در خروجی طیف فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا قابل دستیابی است.



شکل (۸): تحول پالسهای نوری انتشار یافته در فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا (منحنی قرمز) و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده (نمودار آبی). پالس نوری ورودی با پهنای 100fs مشخص است (نمودار مشکی).
Fig. (8): Optical pulses evolution in silica photonic crystal fiber (red curve) and novel structure photonic crystal fiber (blue curve). 100fs input optical pulse is shown (black curve)

که در آن P_0 پیک توان پالس ورودی، T_R شیب بهره رامان (برای سیلیکا برابر $3fs$ می‌باشد [۱۸]) و L_D طول پاشندگی است و با رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2} \quad (9)$$

پالسهای ورودی فرض می‌شوند که دارای فرم کلی زیر باشند،

$$U(0,t) = N \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (10)$$

که در آن N معرف مرتبه سالیوتون در معادله نرمالیزه انتشار پالس [۲۰] می‌باشد و بر اساس رابطه زیر تعریف می‌گردد،

$$N = \sqrt{\frac{L_D}{L_{NL}}} \quad (11)$$

که در آن L_{NL} طول غیرخطی است و بر اساس رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (12)$$

بر اساس روابط ذکر شده در بالا، در این تحقیق، روش اسپلیت استپ فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده می‌شود. برای این منظور، هر دو نوع فیبر فوتونیک کریستال طراحی

شده در این مقاله، با ابعاد $\Lambda = 1\mu m$ و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و با متغیرهای

پاشندگی مراتب بالاتر ذکر شده در جدول (۱) و اثرات غیر خطی فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده

می‌شود. برای این منظور، هر دو نوع فیبر فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله، با ابعاد $\Lambda = 1\mu m$ و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و با متغیرهای

پاشندگی مراتب بالاتر ذکر شده در جدول (۱) و اثرات غیر خطی فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده

می‌شود. برای این منظور، هر دو نوع فیبر فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله، با ابعاد $\Lambda = 1\mu m$ و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و با متغیرهای

پاشندگی مراتب بالاتر ذکر شده در جدول (۱) و اثرات غیر خطی فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده

می‌شود. برای این منظور، هر دو نوع فیبر فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله، با ابعاد $\Lambda = 1\mu m$ و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و با متغیرهای

پاشندگی مراتب بالاتر ذکر شده در جدول (۱) و اثرات غیر خطی فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده

می‌شود. برای این منظور، هر دو نوع فیبر فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله، با ابعاد $\Lambda = 1\mu m$ و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و با متغیرهای

پاشندگی مراتب بالاتر ذکر شده در جدول (۱) و اثرات غیر خطی فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده

می‌شود. برای این منظور، هر دو نوع فیبر فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله، با ابعاد $\Lambda = 1\mu m$ و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و با متغیرهای

پاشندگی مراتب بالاتر ذکر شده در جدول (۱) و اثرات غیر خطی فوریر (SSFM) - متقارن جهت شبیه‌سازی معادله (۱۱) استفاده

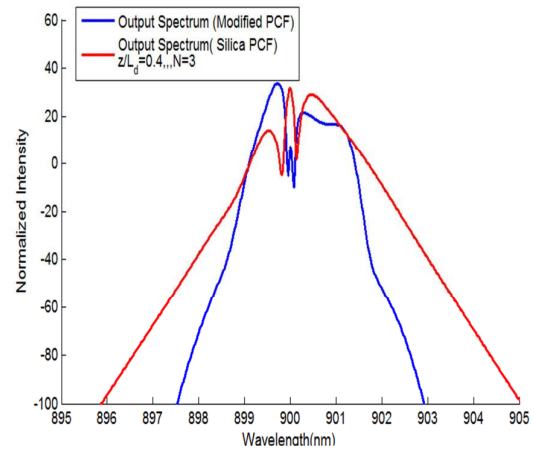
Table (2): Comparison between propagation characteristics of silica and modified photonic crystal fibers

جدول (۲): مقایسه خواص انتشاری فیبرهای فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله با دیگر مقالات

مرجع	MPCF	SPCF	[21]	[8]	[11]
$\beta_2 (ps^2/km)$	-7	-27	-6.3	-32	-100
$\beta_3 (ps^3/km)$	-0.03	0	-0.001	0	0
$\lambda [nm]$	900	900	820	850	1310
$\Lambda, d, \frac{d}{\Lambda}$	$\Lambda=1\mu m$	$\Lambda=1\mu m$	$\frac{d}{\Lambda}=0.6$	$\Lambda=0.9\mu m$	$d=1.45\mu m$
$A_{eff} [\mu m^2]$	5.5	1.55	12	0.8	1.9
ارزیابی جهت کاربردهای غیر خطی	نامناسب	مناسب	مناسب	ایده ال	ایده ال
دقت مورد نیاز در پروسه ساخت	پایین	بالا	پایین	بالا	بالا

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، ساختار جدیدی از فیبرهای فوتونیک کریستال متعارف پیشنهاد گردید که در آن به جای استفاده از حفره‌های پر شده از هوا در منطقه پوسته، از حفره‌های پر شده از سیلیکای تغلیظ شده با ماده فلورین (F₂) استفاده شده است. نشان داده شد، در ساختار جدید فیبر فوتونیک کریستال، با کاهش چشمگیر پارامتر اساسی و تأثیر گذار V و در نتیجه افزایش مقیاس ابعاد فیبر جهت طراحی و نایل شدن به عملکرد تک مد، به طور بالقوه‌ای مشکلات موجود در فرآیند ساخت، نسبت به نمونه فیبرهای فوتونیک کریستال متعارف کاهش می‌یابد. در ادامه به منظور بررسی کارایی هر دو نوع ساختار فیبر در انتشار سالیته‌های نوری فمتوثانیه، در ابتدا پارامترهای مهم و تأثیر گذار پاشندگی‌های مراتب بالاتر مورد تجزیه تحلیل و مقایسه قرار گرفت که نهایتاً مشخص گردید، فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا به دلیل کسب پاشندگی مرتبه ۲ مینیمم تخت و منفی‌تر و در نتیجه کسب پاشندگی مرتبه ۳ به مراتب کوچک‌تر نسبت به نمونه پیشنهاد شده در این مقاله در محدوده طول موجهای دلخواه دارای شرایط ایده آل‌تری به جهت استفاده در کاربردهای غیرخطی قرار دارند. همچنین نشان داده شد، به ازای طراحی هر دو نوع فیبر با ابعاد مساوی $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و $\Lambda = 1\mu m$ و استفاده از یک پالس ورودی یکسان ۱۰۰ فمتوثانیه در طول موج ۹۰۰ نانومتر و تحریک مرتبه سالیتهون (N=3)، یک پالس



شکل (۹): تحول طیف ابر پیوستار در خروجی فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا_ منحنی قرمز) و فیبر فوتونیک کریستال با ساختار اصلاح شده (نمودار آبی).

Fig. (9): Evolution of Supercontinuum Spectra in output of silica photonic crystal fiber (red curve) and modified photonic crystal fiber structure (blue curve)

۵- مقایسه خواص انتشاری و ساخت فیبرهای فوتونیک کریستال طراحی شده در مقاله با دیگر کارها

در این قسمت، نتایج حاصل از طراحی فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا و اصلاح شده با دیگر مقالات در جدول (۲) به نمایش در آمده است. مقایسه پارامترها به طور مشخص نشان می‌دهند که فیبر فوتونیک کریستال طراحی شده در این مقاله با ساختار جدید از لحاظ استفاده در فرآیند ساخت بسیار ساده‌تر و پرکاربردتر می‌باشد در حالی که فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا طراحی شده و همچنین دیگر کارها، به دلیل بالا بودن مقیاس ابعاد طراحی، به دقت بیشتری جهت ساخت احتیاج دارند. به همین جهت فرآیند ساخت آنها سخت‌تر خواهد بود. در حالت مقابل با توجه به پارامترهای جدول زیر کاملاً واضح است که فیبر فوتونیک کریستال سیلیکای طراحی شده، نسبت به فیبر طراحی شده با ساختار جدید در مقاله، دارای شرایط مناسبتری جهت کاربرد در انتشار سالیته‌های نوری و تولید پالسهای لیزری می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در مقادیر پاشندگی مراتب بالاتر آنها جستجو کرد. به طوری که فیبرهای فوتونیک کریستال سیلیکا پاشندگی مراتب ۲ به مراتب منفی‌تر و پاشندگی مراتب ۳ به مراتب ناچیزتری را در تمام محدوده طول موجها نسبت به نمونه جدید ارائه شده در این مقاله از خود به نمایش می‌گذارند.

4. Index Guiding PCFs
5. Dispersion
6. Cladding
7. Flourin
8. Doping
9. Trial and Error Method
10. Refractive Index
11. Modified PCF
12. Zero Dispersion Wavelength
13. Soliton
14. TOD
15. GNLSE
16. Femtosecond
17. Secant Hyporbolic

فشرده شده لیزری به مراتب باریکتر (تیزتر) و کم نوسانتر به همراه طیف ابرپیوستار با پهنای باند وسیعتر در طول نرمالیزه $Z/L_d = 0.4$ از فیبر فوتونیک کریستال سیلیکا متعارف، نسبت به فیبر کریستال نوری با ساختار جدید تشکیل می‌گردد که این موضوع بیانگر مناسبتر بودن فیبرهای فوتونیک کریستال معمولی از جنس سیلیکا در کاربردهای نور غیر خطی نسبت به ساختار جدید می‌باشد.

پی‌نوشت:

1. Photonic Crystal Fibers(PCFs)
2. Photonic Crystals(PCs)
3. Photonic Band Gaps(PBG)

References

- [1] R.V.J. Raja, K. Porsezian, S.K. Varshney, S. Sivabalan, "Modeling photonic crystal fiber for efficient soliton pulse propagation at 850nm", Optic communications, Vol. 283, No. 24, pp. 4847-5286, 2010.
- [2] F. Poli, S. Salleri, "Photonic crystal fibers applications and properties", Springer publications, 2008.
- [3] K. Saitoh, M. Kushiba, "Numerical modeling of photonic crystal fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 11, pp. 3580-3586, Nov. 2005.
- [4] K. Saitoh, M. Kushiba, "Emprical relations for simple design of photonic crystal fibers", Journal of Optic express, No. 1, Vol. 13, pp. 267-274, 2005.
- [5] C. Hao, Z. Min, S. Fang, "Desing of photonic crystal fibers with anomalous dispersion" , Springer-Journal of Optoelectron Letter, Vol. 2, No. 1, pp. 1-4, Jan. 2006.
- [6] W. Chen, J. Li, P.Lu, "Progress of photonic crystal fibers and their applications", Springer-frontiers of optoelectronics in china, Vol. 2 ,No. 1, pp. 50-57, March 2009.
- [7] J.W. Feleming, D. Wood, "Refractive index dispersion and related properties in fluorine doped silica", Optic info base journal, Vol. 22, No. 16, 1983.
- [8] A. Ghanbari, A. Sadr, "Modeling photonic crystal fibers for efficient solitonic effect compression of femto second optical pulses at 850nm", Journal of AJSE-springer, Accepted for publishing, 2014.
- [9] A. Ghanbari, A. Sadr, "Maximization of bandwidth and Intensity of femtosecond Optical pulses by use of frequency chirping in photonic crystal fibers", Journal JOEE,University of Tabriz (ISC) ,Accepted for publishing, 2014.
- [10] H. Demir, S. Ozsoy, "Comprative study of large solid core photonic crystal fibers: dispersion and effective mode area", pp. 1-5, 2011.
- [11] A. Ghanbari, A. Sadr, "Supercontinuum generation at 1310nm in a highly nonlinear photonic crystal fiber with a minimum anomalous group velocity dispersion", Journal of MJEE, Vol. 7, No. 4, pp. 1-6, 2013.
- [12] Z.K. Varallayay, "Nonlinear wave propagation and ultrashort pulse compression in step index and microstructured fibers", PHD Thesis, Budapest University of Technoligy and Economics Atomic Physics Department, 2007.
- [13] M. Mohebbi, "Silicon photonic nanowire soliton-effect compressor at 1.5um", IEEE photonics technology letters, Vol. 20, No. 11, pp. 921-924, 2008.
- [14] Z. Zhuman, Z. Brown, "Effect of frequency chiping on supercontinuum generation in photonic crystal fibers", Optic express, Vol. 12, No. 4, pp. 13203-13206, 2004.
- [15] Y. Chen, H. subbaraman, T. Chen, "One stage pulse compression at 1554nm through highly anomalous dispersive photonic crystal fibers", Opticexpress, Vol. 10, No. 22, pp. 21809-21817, 2011.
- [16] Z. Xia, X.Y. Zhao, H.Y. Qing, R.X. Min, "1.55um supercontinuum based on dispersion flattened photonic crystal fiber", Opto-electronic .Lett, Vol. 3, No. 5, pp. 0346-0348, 2007.
- [17] A.V. Husakou, J. Herrmann, "Supercontinuum generation in photonic cyestal fibers from highly non-linear glasses", Appl.Phys.B 77, pp. 227-234, 2003.
- [18] G.P. Agrwal, "Nonlinear fiber optics", 4th Edition, Academic press, 2007.
- [19] M.S. Ferreira, Nonlinear effects in optical fibers", Wiley, 2011.
- [20] C.C. Feng, C. Sien, "Femtesecond second order solitons in optical fiber transmission", Elsevier- internation journal for light and electron optics, Vol. 116, No. 7, pp. 331-336, Aug. 2005.
- [21] M. Ebnali-Heidari, F. Dehghan, H. Saghaei, F. Koohi-Kamali, M.K. Moravvej-Farshi, "Dispersion engineering of photonic crystal fibers by means of fluidic infiltration", Journal of Modern Optics, Vol. 59, No.16, pp. 1384-1390, Sep. 2012.

