



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، سیستان، ایران.  
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۲-۱۸۵۶-۱۰-A

## تولید پالس‌های کوتاه با تغییر در ساختار هندسی تارهای فوتونیک کریستال میان تهی

رضا سعیدی‌زاده، علیرضا خورسندی، سعید قوامی صبوری

گروه فیزیک دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده - در این مقاله، اثرات ساختاری تارهای فوتونیک کریستال میان تهی (HC-PCF) بر روی فرآیند فشرده‌سازی پالس بررسی شده است. بطوریکه به منظور فشرده‌سازی از روش مرتبه‌های بالای سالیتون استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که کاهش اثر پاشندگی از طریق تغییر در ساختار تار نوری موجب افزایش ضریب فشرده‌سازی در خروجی می‌شود. این تغییر ساختار که به صورت باریک کردن تار نوری صورت گرفته است می‌تواند به حالت‌های هندسی مختلفی صورت پذیرد که در این مقاله از چهار ساختار خطی، نمایی، گاوسی و هذلولوی استفاده شده است.

کلیدواژه-مرتبه‌های بالای سالیتون، تار فوتونیک کریستال میان تهی، باریک کردن تار نوری

## Short pulse generation by changing of the geometrical structure of the hollow-core photonic crystal fiber

Reza Saeezadeh, Alireza Khorsandi, Saeed Ghavami Sabouri

Department of physics, University of Isfahan, Isfahan

**Abstract-** In this article, the structural effects of hollow-core photonic crystal fibers (HC-PCF) on the pulse compression process are investigated, so that the high-order soliton method is used for compression. The results show that the dispersion decreasing effect by changing the structure of the optical fiber increases the compression factor at the output. This re-structuring, which is done by tapering of the optical fiber, can be formed in various geometric states. In this article, four structures have been used: linear, exponential, Gaussian, and hyperbolic.

**Keywords:** High-order soliton, Hollow-core photonic crystal fiber, tapering of optical fiber.

است جایگزین مناسبی برای تارهای سیلیکایی محسوب می‌شدند. با استفاده از این نوع تارها علاوه بر تولید پالس‌های فمتوثانیه با انرژی بالا، می‌توان از روش خود-فشرده‌سازی در محدوده مادون قرمز نزدیک نیز بهره برد [۳]. در این مقاله به بررسی فرآیند فشرده‌سازی در این نوع تارها با تغییر در ساختار هندسی آنها پرداخته می‌شود.

## (۲) مبانی نظری

با استفاده از معادله غیر خطی شرودینگر می‌توان رفتار پالس در محیط تارهای نوری را مورد بررسی قرار داد. با در نظر گرفتن متغیرهای بدون بعد  $\xi = \frac{z}{L_D}$  و  $\tau = \frac{T}{T_0}$  معادله شرودینگر از رابطه [۱]:

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = -\alpha U + iN^2 |U|^2 U - i \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0} \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3}, \quad (1)$$

بدست می‌آید؛ که  $U$  میدان بهنجار شده،  $\alpha$  اتلاف در تار،  $T_0$  پهنای پالس ورودی و  $\beta_2$  و  $\beta_3$  به ترتیب مرتبه دوم (GVD) و سوم (TOD) پاشندگی و  $N$  مرتبه سالیتون است که از رابطه  $N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0}{|\beta_2|}$  بدست می‌آید. ضریب غیرخطی  $\gamma$ ، که

در رابطه مرتبه سالیتون استفاده شده است، نشان‌دهنده اثرات غیر خطی در محیط است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}. \quad (2)$$

در این رابطه  $\lambda$  طول موج پالس ورودی،  $A_{eff}$  مساحت مؤثر،  $A_{eff} = 0.69\pi r_{core}^2$ ، و  $n_2$  ضریب شکست غیر خطی است که برای گاز زنون  $n_2 = 8.2 \times 10^{-23} P \left( \frac{m^2}{W \cdot atm} \right)$  در نظر گرفته می‌شود.

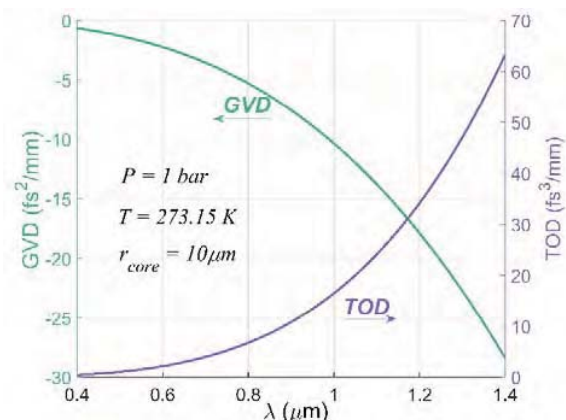
به منظور محاسبه پاشندگی در تارهای فوتونیک کریستال می‌توان از رابطه [۱]:

## (۱) مقدمه

تولید پالس‌های فوق کوتاه یکی از شاخه‌های مورد علاقه دانشمندان به حساب می‌آید، که علت آن، کاربردهای متنوعی از قبیل پردازش مواد با دقت بالا، کنترل واکنش‌های شیمیایی و طیف‌سنجی با وضوح زمانی بالا است که این نوع پالس‌ها در اختیار دانشمندان قرار می‌دهند. به منظور تولید پالس‌های فوق کوتاه در محدوده فمتوثانیه، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. یکی از روش‌های به کار گرفته شده، استفاده از خاصیت غیرخطی تارهای نوری است که با توجه به سطح مقطع کوچک تارها، پارامتر بسیار مناسبی جهت فشرده‌سازی پالس به حساب می‌آید. تکنیک‌های فشرده‌سازی پالس بر پایه اثرات غیر خطی، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: (۱) استفاده از قطعات اپتیکی همچون منشور و آینه‌های چیرپینگ به منظور فشرده‌سازی خارجی، (۲) استفاده از اثر خود-فشرده‌سازی در تار نوری، بدون به کارگیری هر گونه قطعه اپتیکی. تکنیک خود-فشرده‌سازی اصطلاحاً «مرتبه-های بالای سالیتون» نامگذاری می‌شود [۱]. در این روش، مقدار مرتبه دوم پاشندگی الزاماً منفی است.

با این تفاسیر، اولین نوع تارهای نوری مورد استفاده در روش خود-فشرده‌سازی، تارهای نوری با هسته سیلیکا بود که برای تولید پالس‌های فمتوثانیه در نظر گرفته شد [۲]. با توجه به اینکه برای استفاده از این روش، شرط منفی بودن مرتبه دوم پاشندگی الزامی است، به هنگام استفاده از تارهای سیلیکایی، فقط در نواحی با طول موج‌های بالای  $1300$  نانومتر می‌توان فرآیند فشرده‌سازی را انجام داد، که این امر موجب به کارگیری لیزرهای نیمه‌رسانا به همراه تقویت‌کننده می‌شود. علاوه بر این، به منظور تولید پالس‌هایی با انرژی بالا، سیلیکا نیز دارای محدودیت‌های ساختاری است. به همین دلیل تارهای نوری فوتونیک کریستال با هسته میان‌تهی که مملوء از گازهای بی‌اثر

می‌توان یک پالس فشرده ۲۰ فمتو ثانیه بدست آورد که ضریب فشرده‌سازی آن در حدود ۲۵۰ می‌شود.



شکل ۱: تغییرات مرتبه دوم (GVD) و مرتبه سوم پاشندگی (TOD) نسبت به طول موج برای یک تار فوتونیک کریستال میان تهی با شعاع هسته ۵ میکرون و مملوء از گاز زنون.

یکی از روش‌های افزایش برهمکنش بین اثرات خطی و غیر خطی به منظور افزایش ضریب فشرده‌سازی، تغییر در ساختار هندسی تار نوری است. با توجه به وابسته بودن هر دو اثر به شعاع هسته، با تغییر در آن می‌توان پالسی با پهنای کمتر در اختیار داشت. نتایج حاصله مبین این موضوع است که به منظور داشتن یک اتلاف مناسب جهت انتقال پالس در تار نوری، شعاع تار نوری می‌تواند تا ۳.۵ میکرون کاهش یابد. با استفاده از چهار پروفایل هندسی: خطی، نمایی، گاوسی، و هذلولوی می‌توان اثر تغییرات شعاع را بر روی GVD و TOD در شکل (۲) مشاهده کرد. پارامترهای  $L$  و  $z$  که در شکل (۲) نشان داده شده است به ترتیب طول تار نوری و مسافت طی شده توسط پالس در طول تار هستند. جدول (۱) میزان فشرده‌سازی برای ساختارهای هندسی مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول، نشان داده شده است، بهترین پروفایل هندسی به کارگرفته شده، پروفایل خطی است که می‌تواند پهنایی در حدود ۱۵ فمتوثانیه با ضریب فشرده‌سازی ۳۳۳ را در اختیار ما قرار دهد.

$$\beta(\lambda) = n(\lambda) \frac{2\pi}{\lambda} \left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{2.405\lambda}{2\pi r_{core} n(\lambda)} \right)^2 \right), \quad (3)$$

بهره برد. در این رابطه،  $n(\lambda)$  معادله سلمایر [۴] گاز درون تار فوتونیک کریستال است که به طول موج پالس ورودی وابسته است. با استفاده از رابطه  $\beta_m = \frac{d^m \beta}{d\lambda^m}$ ، مرتبه دوم و سوم پاشندگی را می‌توان بدست آورد. با توجه به وابستگی پاشندگی و اثر غیر خطی به شعاع هسته،  $r_{core}$  می‌توان به این نتیجه رسید که تغییر در ساختار هندسی تار فوتونیک کریستال موجب تغییر در مقدار این دو پارامتر می‌شود که این امر متعاقباً تغییر در مقدار مرتبه سالیتون،  $N$ ، را به همراه دارد. از طرفی با توجه به اینکه،  $N$  نشان‌دهنده‌ی میزان برهمکنش اثرات خطی و غیرخطی نسبت به یکدیگر است، افزایش آن موجب افزایش برهمکنش این اثرات می‌شود که در این شرایط می‌توان پالسی با پهنای کمتر و در نتیجه ضریب فشرده‌سازی بزرگتری را در اختیار داشت.

### ۳) شبیه‌سازی و نتایج

نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای یک تار فوتونیک کریستال میان تهی است که در درون هسته‌ی آن گاز زنون تزریق شده است. با توجه به اینکه شعاع هسته‌ی مربوط به تار مورد استفاده شده ۵ میکرون است می‌توان در محدوده مادون قرمز نزدیک مقداری منفی برای مرتبه دوم پاشندگی (GVD) بدست آورد. شکل (۱) تغییرات GVD و TOD را نسبت به طول موج نشان می‌دهد.

با در اختیار داشتن این شرایط می‌توان با استفاده از روش مرتبه‌های بالای سالیتون یک پالس فشرده در محدوده فمتوثانیه در اختیار داشت. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که به هنگام ورود یک پالس ۵ پیکوثانیه با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و توان بیشینه ۳۵.۳ کیلووات،

جدول ۱: نتایج محاسبه شده برای فشردگی پالس با تغییر در ساختار هندسی تار فوتونیک کریستال میان تهی

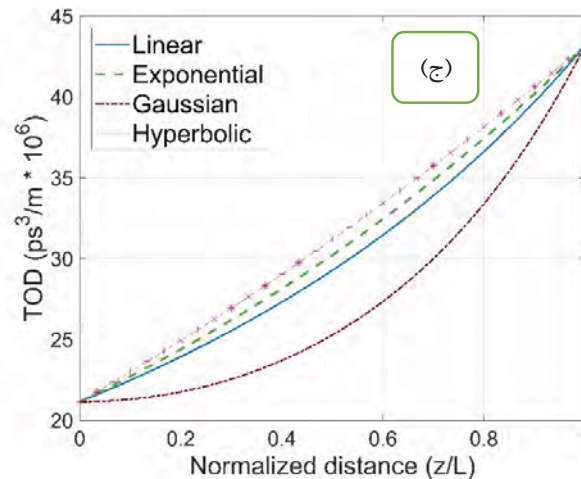
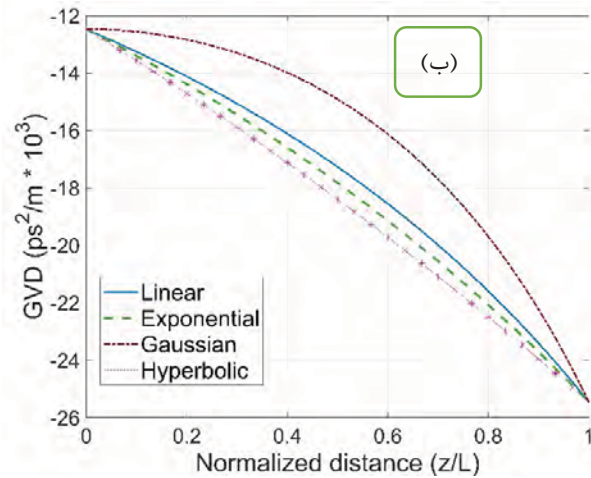
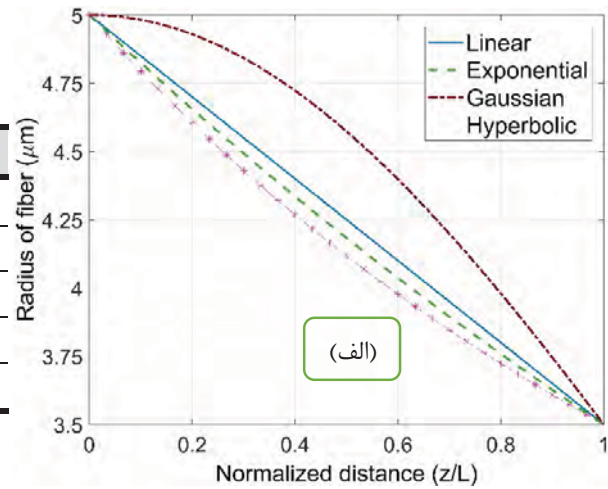
ضریب فشردگی سازی	پهنای پالس ( $f_s$ )	ساختار هندسی
۲۵۰	۲۰	بدون تغییر
۳۳۳	۱۵	خطی
۲۶۳	۱۹	نمایی
۱۱۱	۴۵	گاوسی
۲۰۸	۲۴	هذلولوی

#### (۴) نتیجه گیری

یکی از روش‌های فشردگی پالس، استفاده از مرتبه‌های بالای سالیتون است. در این روش بدون استفاده از هر گونه قطعه اپتیکی، تنها با استفاده از یک تار نوری فوتونیک کریستال و بر پایه اثرات غیر خطی محیط تار، می‌توان پالس‌هایی در محدوده ۲۰ فمتوثانیه بدست آورد. به منظور بهینه کردن پهنای و ضریب فشردگی، می‌توان ساختار هندسی تار نوری را تغییر داد که با به کارگیری پروفایل خطی پالسی با پهنای ۱۵ فمتو ثانیه و با ضریب فشردگی آن ۳۳۳ بدست می‌آید.

#### (۵) مراجعها

- [1] Govind P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Springer Press, 2013.
- [2] Li, Qian, J. Nathan Kutz, and P. K. A. Wai. "Cascaded higher-order soliton for non-adiabatic pulse compression." JOSA B 27, no. 11 (2010): 2180-2189
- [3] Travers, John C., Teodora F. Grigorova, Christian Brahms, and Federico Belli. "High-energy pulse self-compression and ultraviolet generation through soliton dynamics in hollow capillary fibres." Nature Photonics 13, no. 8 (2019): 547-554.
- [4] Marcatili, Enrique AJ, and R. A. Schmelzter. "Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers." Bell System Technical Journal 43, no. 4 (1964): 1783-1809.



شکل ۲: تغییرات الف) شعاع ب) مرتبه دوم پاشندگی (GVD) و ج) مرتبه سوم پاشندگی (TOD) نسبت به طول بهنجار شده تار فوتونیک کریستال میان تهی در دمای ۲۷۳.۱۵ کلوین و فشار ۱ اتمسفر.