بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

اثر فاز بر انتشار سالیتون روشن در فیبرهای کم مد

سبا پروا[۱] ، محسن حاتمی[۲] ، غلامرضا هنرآسا[۳]

شیراز، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده فیزیک

[۱]Saba_parva@yahoo.com, [۲]hatami@sutech.ac.ir, [۳]honarasa@sutech.ac.ir

چکیده - اخیرا انتشار سالیتون‌ها در فیبرهای چند مد مورد مطالعه قرار گرفته است. در اینجا برای بررسی انتشار سالیتون از یک فیبر کم مد تجاری استفاده کرده‌ایم. در این فیبر سه مد انتشاری وجود دارد که با در نظر گرفتن قطبش، شش مد قابل انتشار است. ابتدا مدهای انتشاری، سطح مقطع موثر و پاشندگی را برای مدهای این فیبر بدست آورده و سپس به شبیه سازی انتشار سالیتون‌ها در مدهای فیبر پرداخته و اثر اختلاف فاز بر آنها را مطالعه کرده‌ایم. اثر غیرخطی باعث ایجاد دگرفازی XPM شده و مدهای انتشاری برهم اثر می‌گذارند. از موارد جالب توجه این است که این اثرات باعث انتقال انرژی بین مدهای مختلف شده و شدیدا به اختلاف فاز بستگی دارند. در نتیجه می‌توان از نتایج این شبیه سازی برای طراحی یک کلید تمام نوری خود سامانده استفاده کرد.

کلید واژه- سالیتون نوری روشن، فیبر کم مد، کلیدزنی تمام نوری، مدولاسیون دگرفازی.

Effect of phase on soliton propagation in few-mode fiber

Saba Parva[1], Mohsen Hatami[2], Gholamreza Honarasa[3]

Department of Physics, shiraz University of Technology, Shiraz Iran

[1] saba_parva@yahoo.com , [2] hatami@sutech.ac.ir , [3]honarasa@sutech.ac.ir

Abstract- Recently soliton propagation in few-mode fiber have been studied. In this paper, we used commercially few-mode fiber for investigating the soliton propagation. Three modes exist in this fiber, by considering polarization, we have six propagation modes. Initially, we calculate the propagation mode, effective cross-section, and dispersion for each mode then soliton propagation in fiber modes respect to phase are simulated. The nonlinear effect causes XPM which affects propagation modes to each other. Interestingly, these effects cause energy transfer between different modes and strongly depends on the phase difference. So, the results of this simulation can be used to design a self-organized all-optical switch.

Keywords: all-optical switching, bright soliton, cross phase modulation, few modes fiber.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

به طور سنتی، از فیبرهای نوری تک‌مد برای مشاهده پدیده‌های غیرخطی [۱] و همچنین طراحی سیستم‌های مخابرات نوری استفاده می‌شود[۲]. با این حال اخیرا فیبرهای چند مد بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند[۳]. چنین فیبرهایی یک بعد اضافی ارائه می‌دهند که بر اساس آن ظرفیت کانال‌های ارتباطی افزایش می‌یابند. اگرچه سالیتون‌های نوری در زمینه‌ی فیبرهای تک مد به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اما اخیراً رفتار غیرخطی در فیبرهای چندمد مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی جدید چنین فیبرهایی وجود جفت‌شدگی غیرخطی بین‌مدی است حتی زمانی که جفت‌شدگی خطی مدی ناچیز است. این جفت‌شدگی غیرخطی ناشی از پدیده غیرخطی، مدولاسیون دگرفازی بین مدی *(XPM)* است. در این مقاله ما یک فیبر کم مد تجاری را در نظر گرفته و به بررسی انتشار پالس‌های سالیتون پایه در شش مد با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی می‌پردازیم. در اینجا محاسباتمان را با معرفی مجموعه‌ای از معادلات شرودینگر جفت‌شده غیرخطی که به صورت عددی با ترکیبی از روش تفاضل متناهی و روش رانگ کوتا حل شده‌اند، شبیه سازی کرده‌ایم. انتشار سالیتون‌های پایه را در مدهای مختلف یک فیبر کم مد بررسی کرده و تاثیر آنها را برهم و همچنین تبادل انرژی بین آنها را مطالعه می‌کنیم.

محاسبات ریاضی

در اینجا از یک فیبر کم مد *(FMF)* با ضریب شکست پله‌ای از شرکت *YOFC* استفاده می‌کنیم. فیبر انتخاب شده دارای سه مد LP_{01} ، LP_{11a} و LP_{11b} بوده که با در نظر گرفتن دو قطبش متعامد x و y تعداد مدها به شش مد مستقل افزایش می‌یابد. ضمنا مدهای LP_{11a} و LP_{11b} تبهگن هستند. که آنها را به ترتیب از ۱ تا ۳ شماره‌گذاری می‌کنیم. از آنجا که هر مد می‌تواند دارای دو مولفه‌ی قطبیده شده متعامد باشد (که با زیرنویس x و y مشخص می‌شوند) فیبر ما در واقع از ۶ مد مجزا پشتیبانی می‌کند. معادله حاکم بر انتشار پالس در مدهای مختلف با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی و پاشندگی، معادله غیرخطی شرودینگر جفت شده به شکل زیر برای هر شش مد است[۳-۴].

$$\frac{\partial u_p}{\partial \xi} + d_{1p}\frac{\partial u_p}{\partial \tau} + i\frac{d_{2p}}{2}\frac{\partial^2 u_p}{\partial \tau^2} = iN_1^2 \quad (۱)$$
$$\times \sum_l \sum_m \sum_n f_{lmnp}\left[\frac{2}{3}\left(u_l^H u_m\right)u_n + \frac{1}{3}\left(u_n^T u_m\right)u_l^*\right] e^{i\Delta\beta_{lmnp}L_D\xi}$$

در اینجا $p,l,m,n = 1,2,3$ می‌باشند. اندیس‌های T و H نشانگر ترانهاد و همیوغ مختلط ماتریس $u_p = \frac{A_p}{\sqrt{P_1}}$ می‌باشند، A_p بردار جونز بوده و برابر با $A_p = [A_{px}, A_{py}]^T$ است. A_{px} و A_{py} دامنه کند تغییر پالس انتشاری در مد pام فیبر به ترتیب با قطبش x و y است. P_1 قله توان پالس سالیتون ورودی در مد LP_{01} است. طول پاشندگی این مد به صورت $L_D = T_0^2/|\beta_{21}|$ تعریف می‌شود و برای بهنجارش فاصله انتشار یعنی $\xi = z/L_D$ استفاده می‌شود. به طور مشابه $\tau = t/T_0$ زمان بهنجار بوده که در آن T_0 پهنای زمانی پالس ورودی است. در حل معادله (۱) ثابت انتشار β_p هر مد در سری تیلور به صورت زیر بسط داده شده است:

$$\beta_p(\omega) = \beta_{0p} + \beta_{1p}(\omega - \omega_0) + \beta_{2p}(\omega - \omega_0)/2 + \cdots \quad (۲)$$

در اینجا $\beta_{kp} = \left(\frac{d^k\beta_p}{d\omega^k}\right)\Big|_{\omega = \omega_0}$ است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

پارامتر d_{1p} و d_{2p} به صورت زیر تعریف می‌شوند [۳]:

$$d_{1p} = (\beta_{1p} - \beta_{11})L_D/T_0, \qquad (۳)$$

$$d_{2p} = \beta_{2p}/|\beta_{21}|.$$

به دلیل ماهیت تبهگنی مدهای LP_{11a} و LP_{11b} ، $d_{k2} = d_{k3}$ است. از آنجا که $d_{11} = 0$ و $d_{21} = -1$ است (پاشندگی غیرعادی)، ما فقط باید دو پارامتر بدون بعد را برای درنظر گرفتن اثرات پاشندگی مشخص کنیم که d_{12} و d_{22} نامیده می‌شوند. در اینجا از پاشندگی مرتبه۳ به بالا صرف نظر شده است. عدم جورشدگی فاز در سمت راست معادله(۱) توسط $\Delta\beta_{lmnp} = \beta_{0m} + \beta_{0n} - \beta_{0l} - \beta 0p$ بدست می‌آید. در معادله (۱)، N_1 مرتبه سالیتون پایه است و به صورت $N_1^2 = \gamma P_1 T_0^2/|\beta_{21}|$ تعریف می‌شود. γ پارامتر غیرخطی است. جفت شدگی غیرخطی بین‌مدی توسط همپوشانی پروفایل فضایی مدها رخ می‌دهد که در رابطه (۱) گنجانده شده است و فاکتور بدون بعد f_{lmnp} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_{lmnp} = A_1^{eff} \iint F_l^* F_m F_n F_P^* dxdy, \qquad (۴)$$

در اینجا $F_p(x,y)$ توزیع فضایی مد pام است و فرض بر این است و $\iint |F_m|^2(x,y)dxdy = 1$ است. سطح مقطع موثر A_1^{eff} مد LP_{01} زمانی ظاهر می‌شود که $f_{1111} = 1$ باشد. باتوجه به اینکه l و m و n و p می‌توانند از ۱ تا ۳ متغییر باشند باید ۸۱ پارامتر را مشخص کرد تا بتوان به طور کامل جفت‌شدگی غیرخطی بین‌مدی را حساب کرد. با این حال تعداد زیادی از آنها به دلیل متعامد بودن مدها و تاثیر FWM صفر می‌شوند و بسیاری از آنها به خاطر تبهگن بودن مدهای LP_{11a} و LP_{11b} از نظر زمانی همزمان اتفاق می‌افتند. ۱۹ مولفه غیرصفر برای ما باقی می‌ماند. برای مثال $f_{2222} = f_{3333} = 0.5783$ بدست می‌آید. در اینجا $T_0 = 1ps$ و $L_D = 34.8813$ است. ورودی هر مد به صورت $u(0,\tau) = u_0 sech(\tau)$ است .در اینجا u_0 برای مدهایی که هیچ سالیتونی به آنها وارد نمی‌شود صفر درنظر گرفته می‌شود.

شبیه سازی

در اینجا از یک فیبر کم مد *(FMF)* با ضریب شکست پله‌ای از شرکت *YOFC* استفاده کرده‌ایم که پارامترهای آن در جدول شماره ۱ آمده است. همانطور که در جدول آمده این فیبر دارای سه مد است که با در نظر گرفتن قطبش X و Y دارای شش مد مستقل می‌باشد. با شبیه سازی معادله ۱ انتشار سالیتون پایه روشن را در مدهای مختلف فیبر و برهمکنش آنها را بررسی می‌کنیم.

جدول۱- پارامترهای فیبر کم مد (سه مد) تجاری *YOFC*

نوع فیبر	FM Sl-2
Part No.	FM2010-B
مشخصات فیبر نوری در ۱۵۵۰ نانومتر	محدوده
قطر هسته μm	14.0 ± 0.5
ضریب شکست هسته	1.4485
قطر غلاف μm	125.0 ± 0.7
غلاف غیر دایره‌ای	< 0.7
قطر لایه‌نشانی μm	245.0 ± 10.0

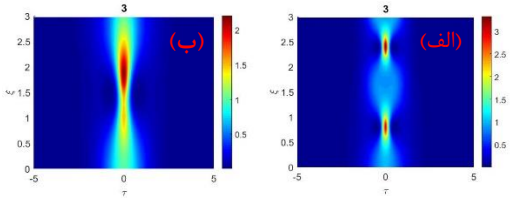
در جدول شماره ۲ ورودی توان و فاز هر کدام از مدهای فیبر برای شبیه سازی مشخص شده است. سالیتون را در مدهای LP_{01x}، LP_{11ax} ، LP_{11bx} وارد کرده و سپس به ترتیب فازهای $\pi/4$ ، $\pi/2$ و π را بر روی مد $LP_{11a\,x}$ اعمال کردیم و در نهایت به مقایسه برهمکنش مدها در این حالات پرداختیم. شکل ۱ دو نمونه از انتشار سالیتون را در حوزه زمان برای مد $LP_{11a\,x}$ در دو حالت بدون فاز و با فاز π نشان می‌دهد.

جدول ۲- ورودی توان و فاز هر مد فیبر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

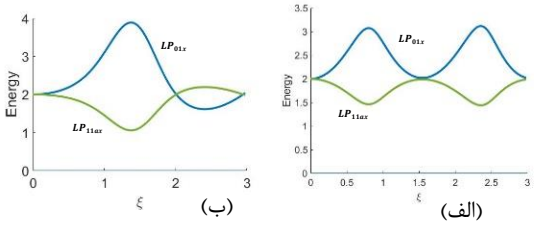
مد	ورودی بدون فاز	ورودی با فاز $\pi/4$	ورودی با فاز $\pi/2$	ورودی با فاز π
LP_{01x}	$\operatorname{sech}\tau$	$\operatorname{sech}\tau$	$\operatorname{sech}\tau$	$\operatorname{sech}\tau$
LP_{01y}	0	0	0	0
$LP_{11a\,x}$	$\operatorname{sech}\tau$	$e^{\frac{i\pi}{4}}\operatorname{sech}\tau$	$e^{\frac{i\pi}{2}}\operatorname{sech}\tau$	$e^{i\pi}\operatorname{sech}\tau$
$LP_{11a\,y}$	0	0	0	0
$LP_{11b\,x}$	$\operatorname{sech}\tau$	$\operatorname{sech}\tau$	$\operatorname{sech}\tau$	$\operatorname{sech}\tau$
$LP_{11b\,y}$	0	0	0	0

شکل۱(الف) برای فاز صفر است. همانطور که دیده می‌شود ابتدا پهنای پالس در حوزه زمان کم شده و قله‌ی آن افزایش پیدا می‌کند و در $\xi = 0.9$ به حداکثر خود می‌رسد. ولی به تدریج انرژی خود را از دست داده و دامنه آن کاهش می‌یابد و همینطور در طی انتشار مجددا به حالت اولیه خود برگشته و سپس این فرآیند تکرار می‌گردد. اما برای شکل ۱(ب) قله پالس به تدریج کاهش یافته و در $\xi = 1.4$ به مینیمم مقدار خود رسیده و سپس افزایش یافته و در $\xi = 1.8$ به ماکسیمم مقدار خود می‌رسد.



شکل۱- انتشار سالیتون در مد $LP_{11a\,x}$ را به ترتیب در حالت (الف) بدون فاز، (ب) با فاز π نشان می‌دهد.

در شکل ۲ به عنوان نمونه انرژی سالیتون‌های منتشر شده در مد $LP_{11a\,x}$ بدون اختلاف فاز و با اختلاف فاز π رسم شده است.



شکل۲- نمودار انرژی مدها و برهمکنش آنها با یکدیگر با اعمال فاز به مد $LP_{11a\,x}$. الف) حالت بدون فاز. ب) با اعمال فاز π.

همانطور که در شکل دیده می‌شود حداکثر تبادل انرژی بین دو مد در $\xi = 0.9$ صورت گرفته است ولی برای فاز π در $\xi = 1.4$ حداکثر تبادل انرژی اتفاق افتاده است. این مساله نشان دهنده‌ی این است که در یک فاصله‌ی معین با دو اختلاف فاز دو شکل متفاوت تبادل انرژی را خواهیم داشت که به معنی کلیدزنی بر اساس اختلاف فاز بدون اثر الکتریکی است و عملا یک کلیدزنی تمام نوری محسوب می‌شود. تبادل انرژی برخلاف جفت‌گرها از طریق اثر غیرخطی دگرفازی صورت می‌گیرد و این اثر باعث می‌شود که از یک فیبر بتوان به تنهایی برخلاف حالت خطی در مدها تبادل انرژِی انجام داد.

نتیجه گیری

اخیرا اثرات غیرخطی در فیبرهای کم مد مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا ما نشان داده‌ایم که اثر غیرخطی می‌تواند باعث انتقال انرژی از یک مد به یک مد دیگر شود و این انتقال انرژی به فاز بستگی دارد. اثر این فاز باعث تغییر در تبدیل انرژی شده که می‌تواند به عنوان مبنایی برای کلید زنی تمام نوری مورد استفاده قرار گیرد.

مرجع‌ها

[1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, p. 45, 5th ed, Academic Press, 2013.

[2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, p. 26, *4th ed*, Wiley & Sons 2013.

[3] G. P. Agrawal and SH. Buch, "Soliton stability and trapping in multimode fibers", Optics Letters, Vol. 40, No. 2, pp. 225-228, 2015.

[4] A. Antikainen, L. Rishøj, B. Tai, S. Ramachandran, G. P. Agrawal, "Fate of a Soliton in a High Order Spatial Mode of a Multimode Fiber", Physical Review Letters, Vol. 122, No. 2, pp. 1-5, 2019.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]