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

نقطه شکست تقارن پاریته-زمان در دو موجبر نوری خمیده غیرخطی

پریسا جهانشاهی، مجتبی گلشنی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

Parisjahanshahi۳@gmail.com , Golshani@uk.ac.ir

چکیده- در این مقاله به بررسی نقطه‌ی شکست تقارن پاریته-زمان در دو موجبر نوری خمیده باحضور اثر غیر خطی کر پرداخته شده است. بدین‌منظور انتشار نور در سیستم در حالت‌های مختلف وجود و عدم وجود افت/ بهره، و همچنین حضور و عدم حضور اثر غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی بدست آمده نشان می‌دهد که اثر غیرخطی کر باعث پدیده‌ی خودکانونی در موجبرها گردیده و ازاین‌رو با کاهش ضریب جفت‌شدگی موثر بین موجبرها باعث کاهش نقطه شکست تقارن پاریته-زمان می‌شود.

کلید واژه - تقارن پاریته- زمان، اثرغیرخطی کر، موجبرهای نوری خمیده، نقطه ی شکست تقارن پاریته-زمان

PT-Symmetry Breaking Point in Two Curved Nonlinear Optical Waveguides

Parisa Jahanshahi, Mojtaba Golshani

Faculty of physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Parisjahanshahi۳@gmail.com , Golshani@uk.ac.ir

Abstract-In this paper, the parity-time symmetry (PT-symmetry) breaking point of two curved optical waveguides in the presence of nonlinear Kerr effect is investigated. For this purpose, light propagation for different cases of presence and absence of loss/gain, as well as the presence and absence of nonlinear effect has been investigated. The numerical results show that the nonlinear effect causes the self-focusing effect, and therefore by reducing the effective coupling coefficient between the waveguides, reduces the PT-symmetry breaking point.

Keyword- Parity-time symmetry, nonlinear Kerr effect, Curved optical waveguides, PT-symmetry breaking point

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

مقدمه

هرمیتی بودن هامیلتونی یک شرط ریاضی کافی برای وجود ویژه‌مقادیر حقیقی در سیستم بسته و بقای انرژی در آن می‌باشد. یکی از مهمترین نقاط عطف در فیزیک، معرفی سیستم‌های غیرهرمیتی اند که اولین‌بار توسط بندر و بوتچر در سال ۱۹۹۸ بیان گردید. سیستم‌های دارای هامیلتونی غیرهرمیتی در شرایط خاص می‌توانند دارای ویژه مقادیر حقیقی باشند و پایستگی احتمال یافتن ذره در مکان را تایید کنند، و آن شرط وجود "تقارن پاریته-زمان"می باشد [۱،۲].

چندسال بعد از معرفی هامیلتونی‌های دارای تقارن پاریته-زمان، این مفهوم وارد سیستم‌های نوری گردید و این سیستم‌ها امروزه یک بستر بسیار مناسب برای مشاهدات تجربی مربوط به تقارن پاریته-زمان می‌باشند[۱]. در سیستم های نوری برای ایجاد تقارن پاریته-زمان باید ضریب شکست به‌گونه‌ای طراحی شود که قسمت حقیقی آن تابعی زوج نسبت به مختصات، و قسمت موهومی آن تابعی فرد نسبت به مختصات باشد [۳].

در این مقاله قصد داریم تقارن پاریته-زمان را در دو موجبر نوری خمیده غیرخطی بررسی کنیم. آرایه موجبرهای نوری به علت تشابه رفتاری نوعی نمایش خاص از سیستم-های گسسته اند که می توان از طریق نظریه جفت شدگی مدها توزیع انرژی در آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. اولین ارتباط بین سیستم‌های گسسته و اپتیک غیرخطی در سال ۱۹۸۲، هنگامی که تئوری جفت کننده غیرخطی همدوس بررسی شد، مطرح گردید.

مفهوم تقارن پاریته-زمان در موجبرهای نوری، در سال-های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است، اما در این مقاله هدف این است که این مفهوم را در حضور اثرات غیر خطی بررسی نمائیم.

محاسبه مستقیم ویژه مقادیر و بررسی حقیقی یا موهومی بودن آن‌ها (برای تعیین نقطه شکست تقارن پاریته-زمان) علی‌الاخصوص برای سیستم‌های غیرخطی از لحاظ عددی پیچیده است، ازاین‌رو، در این مقاله از معیار معرفی شده در مرجع [۴] برای محاسبه نقطه ی شکست تقارن پاریته-زمان استفاده می‌شود.

تئوری مسئله

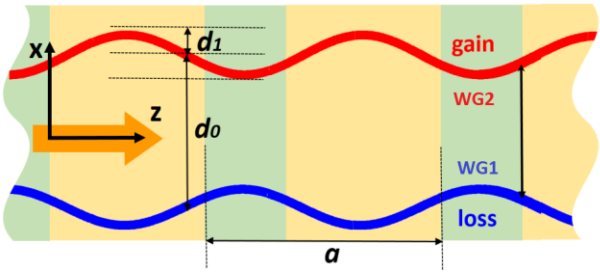
سیستمی متشکل از دو موجبر نوری با فاصله ی متناوب را در نظر میگیریم که در آن‌ها اثر غیر خطی کر حضور داشته باشد (شکل۱). یکی از موجبرها دارای بهره و دیگری افت می‌باشد. با در نظر گرفتن نظریه جفت‌شدگی مدها، معادله‌ی حاکم بر تحول دامنه میدان الکتریکی برای دو موجبر به صورت زیر می باشند[۵]:

$$-\mathrm{i}\ \frac{\mathrm{dE1(z)}}{\mathrm{dz}} = \mathrm{C(z)\ E2(z)} + \beta\mathrm{1(z)\ E1(z)} + \gamma\ \mathrm{E1(z)\ |E1(z)|^{2}} \quad (1)$$

$$-\mathrm{i}\ \frac{\mathrm{dE2(z)}}{\mathrm{dz}} = \mathrm{C(z)\ E1(z)} + \beta\mathrm{2(z)\ E2(z)} + \gamma\ \mathrm{E2(z)\ |E2(z)|^{2}} \quad (2)$$

که $\mathbf{c(z)}$ ضریب جفت‌شدگی بین دو موجبر، $\boldsymbol{\beta_n(z)}$ ثابت انتشار موجبرها و $\boldsymbol{\gamma}$ ضریب غیرخطی کر است.

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



شکل ۱: دو موجبر نوری خمیده دارای تقارن پاریته-زمان

به دلیل خمیده بودن موجبرها، رابطه ثابت انتشار به صورت زیر می‌باشد[۴]:

$$\beta_n(z) = (-1)^n \frac{n_s d_0 d_1}{(2\lambda)} \Lambda^2 \cos(\Lambda z) + i g(-1)^n \qquad (۳)$$

که در این رابطه n_s ضریب شکست زمینه، λ ، $\Lambda = \frac{2\pi}{a}$ طول‌موج، d_0 فاصله متوسط بین موجبرها، d_1 دامنه انحنای موجبرها، و a دوره تناوب انحنای موجبرهای می-باشد. علاوه براین، با توجه به تغییر تناوبی فاصله بین موجبرها، ضریب جفت‌شدگی بین موجبرها از رابطه

$$c(z) = c_0 + c_1 \cos(\Lambda z) \qquad (٤)$$

بدست می‌آید، که در آن c_0 و c_1 به ترتیب ضریب جفت-شدگی مربوط به فاصله d_0 و $d_0 - d_1$ بین موجبرها می-باشد.

با حل معادلات (۱) و (۲) برای شرط ورود نور به موجبر شماره یک، یعنی $E_n(z=0) = \delta_{n,1}$، می‌توان شدت نور در هر یک از موجبرها را بدست آورد. برای محاسبه نقطه شکست تقارن در این سیستم می‌توان از معیار I_r معرفی شده در مرجع[۵]استفاده کرد،

$$I_r = \exp\{-10(\left|\frac{I_{AV2}-I_{AV1}}{I_{AV2}+I_{AV1}}\right|)^{10}\} \qquad (٥)$$

که در آن I_{AV1} و I_{AV2} به ترتیب میانگین شدت کل در نیمه اول و دوم طول انتشار است.

a(mm)	λ (nm)	d_1(nm)	d_0(μm	n_S
۲,۰٦٤	۸۰۰	٤۰۰	۱۳,٦	۲

جدول ۱- پارامترهای عددی مورد استفاده در مقاله

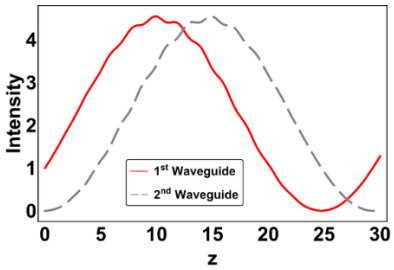
بحث و نتایج عددی

برای بررسی نحوه تغییر نقطه شکست تقارن پاریته-زمان در حضور اثرات غیرخطی، ابتدا سیستم خطی ($\gamma = 0$) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب نحوه تحول انرژی را برای دو مقدار افت/ بهره $g = 0.2$ و $g = 0.25$ نشان می‌دهند (در کل این مقاله واحد g و γ به صورت mm^{-1} می‌باشد که از نوشتن آن در متن خودداری شده است). در شکل ۲ تقارن پاریته-زمان در سیستم شکسته نشده است و الگوی شدت به صورت نوسانی می‌باشد. اما در شکل ۳، شدت در هر دو موجبر به صورت نمایی رشد می‌کند. در این حالت، تقارن پاریته-زمان شکسته شده است. بنابراین، نقطه شکست تقارن پاریته-زمان در حالت خطی عددی بین ۰,۲ تا ۰,۲۵ می-باشد.

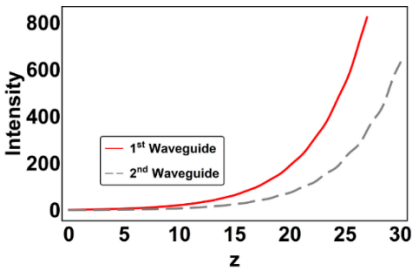
در ادامه الگوی انتشار برای حالت غیرخطی $\gamma = 0.5$ در مقدار افت و بهره $g = 0.2$ در شکل ۴ رسم گردید. رشد نمایی شدت نشان می‌دهد، که در این شرایط تقارن پاریته-زمان شکسته شده است. بنابراین، در حالت غیرخطی، نقطه شکست تقارن پاریته-زمان کمتر از ۰,۲ می‌باشد. بنابراین، حضور اثر غیرخطی کر باعث کاهش نقطه شکست تقارن پاریته-زمان شده است. دلیل این امر می‌تواند اثر خودکانونی باشد که به طور موثر باعث کاهش میزان جفت‌شدگی بین موجبرها می‌گردد. علاوه‌براین، مقایسه شکل ۴ با شکل ۳ نشان می‌دهد که در حالت

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

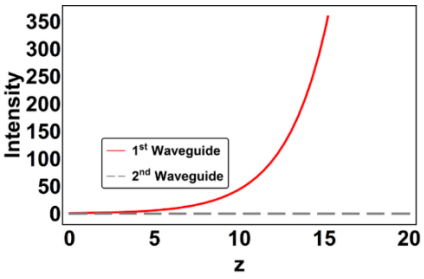
غیرخطی، به دلیل پدیده خودکانونی، شدت نور در یکی از موجبرها بسیار بیشتر از موجبرها دیگر می‌باشد.



شکل ۲: الگوی انتشار انرژی بدون حضور جمله ی غیرخطی در حالت عدم شکست تقارن پاریته-زمان ($\mathbf{g = 0.2}$)

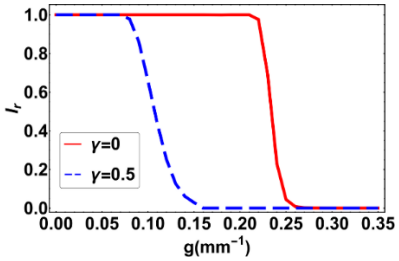


شکل ۳ : الگوی انتشار انرژی بدون حضور جمله ی غیرخطی در حالت شکست تقارن پاریته-زمان ($\mathbf{g = 0.25}$)



شکل۴: الگوی انتشار انرژی در حضور جمله ی غیرخطی در حالت شکست تقارن پاریته – زمان

به منظور تعیین نقطه دقیق شکست تقارن پاریته-زمان، در شکل ۵، معیار $\mathbf{I_r}$ برحسب میزان افت/بهره برای دو حالت خطی و غیرخطی رسم شده است. با توجه به این شکل و با درنظر گرفتن معیار $\mathbf{I_r = 0.5}$ ، نقطه شکست تقارن پاریته-زمان برای دو حالت خطی و غیرخطی به ترتیب $\mathbf{g_c = 0.2341}$ و $\mathbf{g_c = 0.1071}$ می‌باشد. این نتیجه تایید می‌کند که با اثر غیرخطی باعث کاهش نقطه شکست تقارن پاریته-زمان شده است.



شکل۵: معیار $\mathbf{I_r}$ برحسب میزان افت/بهره در حضور و عدم حضور جمله غیرخطی کر

نتایج

در این مقاله به بررسی نحوه تحول انرژی دردو موجبر نوری خمیده دارای تقارن پاریته-زمان در حضور اثر غیرخطی پرداخته شد. نتایج عددی بدست آمده نشان می‌دهد که اولا، با افزایش ضریب غیرخطی، نقطه شکست تقارن پاریته – زمان در مقادیر کمتر افت و بهره رخ می-دهد. علاوه‌براین، در فاز شکست تقارن پاریته-زمان، در رژیم غیرخطی، شدت فقط در یکی از موجبرها که دارای بهره می باشد بصورت نمایی زیاد می‌شود، درحالی‌که، در رژیم خطی، افزایش انرژی در هر دو موجبر بصورت نمایی می‌باشد.

مرجع

[۱] M.A. Miri and A. Alu, "Exceptional points in optics and photonics", Science ۳٦۳, ٦٤۲۲ (۲۰۱۹).

[۲] REl-Ganainy, K.G. Makris, M. Khajavikhan, , "Non-Hermitian physics and PT symmetry", Nature Physics ۱٤(۱), ۱۱-۹ (۲۰۱۸).

[۳] Ş. K. Özdemir, S. Rotter, F. Nori, and L. Yang, “Parity–time symmetry and exceptional points in photonics”, nature material”, Nature Materials,۱۸(۸), ۷۸۳–۷۹۸ (۲۰۱۹).

[۴] فاطمه رهرو," تاثیر میزان انحنا بر نقطه شکست تقارن پاریته -زمان در دو موجبر نوری خمیده " , پایان نامه کارشناسی ارشد , دانشکده فیزیک , دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۹۹).

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

[۵] مجتبی گلشنی، "جایگزیدگی عرضی در آرایه ای از موجبرهای نوری" , پایان نامه دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۹۳) .

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