دبیر محترم علمی

با سلام و احترام

ضمن تشکر از شما و داورهای محترم جهت بررسی مقاله، به اطلاع می‌رساند مقاله طبق نکات مطرح شده توسط داوران مورد بازنگری قرار گرفت. قسمت های تصحیح شده به صورت هایلایت نشان داده شده اند. لازم به ذکر است به دلیل محدویت فضا و جهت اضافه شدن توضیحات مورد نظر داورهای محترم برخی قسمت‌ها که اهمیت کمتری داشتند و در انتقال مطالب ضروری نبودند، حذف گردیده اند که در متن هایلایت شده‌اند. در ادامه پاسخ به نظرات مطرح شده توسط داوران ارائه می‌گردد.

با تشکر

داور ۱ : با عرض سلام و ادب و تشکّر از نویسندگان مقاله بابت ارسال دستاورد خود به کنفرانس اپتیک و فوتونیک ۱۴۰۰. موضوع مقاله، چنان‌که نویسندگان نیز اشاره کرده‌اند، این روزها مدّ نظر است. مقاله با شرایط فعلی قابلیت چاپ دارد به شرط آن‌که:

• از نظر نگارشی و چینش متن در چکیده انگلیسی و مراجع مورد بازبینی قرار گیرد.

متن چکیده انگلیسی چپ‌چین و تراز (Justify) گردید. همچنین اشکالات نگارشی این متن تصحیح گردید.

در مراجع، جهت استفاده از مراجع جدیدتر، مرجع ۱ و ۵ نسخه قبلی (به دلیل کمبود فضا) حذف گردید ، و مرجع ۴ و ۵ جدید مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ اضافه گردید.

• در متن دقیقاً مشخّص شود که توضیحات انتهایی کجا به شکل ۴ اشاره دارد و کجا به شکل ۵.

در متن و قسمت نتیجه‌گیری شماره شکل ۴ و ۵ مشخص شده است.

داور ۲: با سلام. مقاله دارای موضوع جالبی است اما نیاز به کمی تصحیح دارد.

۱) عبارت PT در چکیده انگلیسی چیست؟

در چکیده انگلیسی عبارت parity-time (PT) اضافه گردید.

۲) منابع جدید در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ اضافه شود.

در مراجع، جهت استفاده از مراجع جدیدتر، مرجع ۱ و ۵ نسخه قبلی (به دلیل کمبود فضا) حذف گردید ، و مرجع ۴ و ۵ جدید مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ اضافه گردید.

۳) فرض های انجام شده در محاسبات و مقادیر انتخاب شده باید توضیح داده شود.

در متن، در قسمت‌های معرفی سیستم، الگوی انتشار نور و نقطه شکست تقارن پاریته-زمان توضیحات مورد نیاز اضافه گردید که به صورت هایلایت مشخص شده‌اند.

۴) برای رابطه ۱ باید مرجع ذکر شود.

مرجع مورد نیاز برای این رابطه مشخص گردید.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

نقطه شکست تقارن پاریته-زمان در آرایه موجبر نردبانی دارای الگوی ضریب شکست فیبوناتچی

مهدی سیوندی پور، مجتبی گلشنی، محمدحسین زندی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

mahdi.sivandi.111@gmail.com ,golshani@uk.ac.ir, mzandi@uk.ac.ir

در این مقاله به بررسی الگوی انتشار نور در یک آرایه موجبر نوری نردبانی با الگوی ضریب شکست فیبوناتچی دارای تقارن پاریته-زمان، پرداخته شده است. سپس، با استفاده از یک معیار مبتنی بر شدت نور، نقطه شکست تقارن پاریته-زمان برای مقادیر مختلف ثابت انتشار محاسبه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که نقطه شکست در یک مقدار خاص از ثابت انتشار دارای بیشینه می‌باشد.

کلید واژه- ارایه موجبر نردبانی، الگوی ضریب شکست فیبوناتچی، تقارن پاریته-زمان، نقطه شکست تقارن پاریته-زمان

Parity-time symmetry breaking point in a ladder waveguide array with Fibonacci refractive index pattern

Mahdi SivandiPour, Mojtaba Golshani, Mohammad Hossein Zandi

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

golshani@uk.ac.ir, mzandi@uk.ac.ir, mahdi.sivandi.111@gmail.com

In this paper, we investigate the propagation pattern of the light in a parity-time (PT) symmetry ladder optical waveguide array with a Fibonacci refractive index profile. Moreover, Using a criterion based on the light intensity, the PT-symmetry breaking point is calculated for different values of the propagation constant. Numerical results show that the PT-symmetry breaking point has a maximum at a certain value of the propagation constant.

Keywords: Ladder waveguides array, Fibonacci refractive index pattern, Parity-time symmetry, PT-symmetry Breaking point.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

تقارن پاریته-زمان یکی از مباحث جالب و پرکاربرد این روزهای علم فیزیک است و در شاخه های مختلفی کاربرد دارد[۱]. سیستم‌های غیرهرمیتی که غالبا ویژه مقادیر موهومی دارند، با داشتن شرط تقارن پاریته-زمان می‌توانند در محدوده‌ای از پارامترها دارای طیف حقیقی باشند[۱و۲]. آرایه موجبر های نوری با توجه به قابل دسترس بودن، انعطاف‌پذیری، توانایی کنترل پارامترها و ... یک سیستم مناسب برای بررسی این تقارن می‌باشد[۳]. ازطرفی شبه‌بلورهای فیبوناتچی[۴و۵] بدلیل خاصیت های جالبی که دارند بسیار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ما در این مقاله به بررسی یک ارایه موجبر نوری نردبانی که در آن ثابت های انتشار بر اساس الگوی شبه بلورهای فیبوناتچی انتخاب شده‌اند، می‌پردازیم. با در نظر گرفتن افت و بهره سیستم ما دارای تقارن پاریته-زمان است[۲]. در این مقاله با بررسی نحوه تحول شدت نور در موجبرها، نقطه شکست تقارن پاریته-زمان از طریق حل عددی معادلات حاکم توسط نرم افزار متمتیکا محاسبه شده‌است. علاوه بر این نحوه تغییر نقطه شکست با ثابت انتشار موجبرها مورد بررسی قرار گرفته است.

معرفی سیستم

یک آرایه موجبر نوری نردبانی ~~که موجبرها دارای ضریب جفت شدگی C با موجبرهای کناری و دارای ضریب جفت شدگی C^* با موجبرهای عمودی می‌باشند،~~ را در نظر می‌گیریم (شکل ۱). در این سیستم دو ردیف موجبر کنار هم قرار گرفته‌اند و تعداد موجبرها در هر ردیف یکی از اعداد فیبوناتچی می‌باشد (زیرا ثابت انتشار موجبرها از الگوی فیبوناتچی انتخاب می‌شوند). در اینجا در هر ردیف ۱۴۴ موجبر انتخاب شده‌است؛ بنابراین تعداد کل موجبرها $N = 288$ می‌باشد. معادله حاکم بر این موجبرها با استفاده از تقریب جفت شدگی مدها به صورت زیر بدست می‌آید[۳]:

$$-i\frac{dE_n}{dZ} = \beta_n E_n + C\left(E_{n+2} + E_{n-2}\right) + C' E_{n+(-1)^{n+1}} \qquad (۱)$$

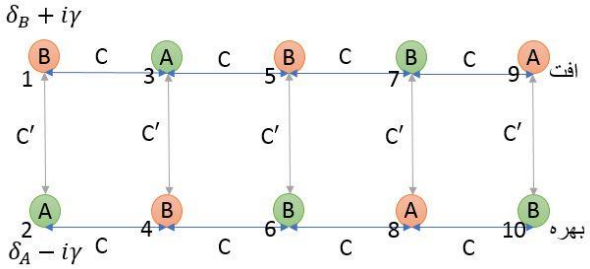
در این معادله β_n ثابت انتشار موجبر n ام، C ضریب جفت شدگی افقی، C' ضریب جفت شدگی عمودی و E_n میدان موجبر n ام است. باتوجه به اینکه هدف بررسی یک سیستم دارای تقارن پاریته-زمان است، ثابت انتشار هر موجبر از دو قسمت حقیقی و موهومی تشکیل می‌شود. قسمت حقیقی ردیف بالا، با توجه به الگوی فیبوناتچی رابطه (۲)، بسته به تعداد موجبرهای $N/2 = 2,3,5,8,13, \ldots$ هر ردیف، از مجموعه $F_{N/2}$ زیر انتخاب می‌شوند و می‌تواند دو مقدار δ_b و δ_a را داشته باشد[۴]:

$$\mathrm{F}_0 = \{\delta_b\},\ \mathrm{F}_1 = \{\delta_a\},\ \mathrm{F}_2 = \mathrm{F}_0\mathrm{F}_1 = \{\delta_b, \delta_a\}$$
$$\mathrm{F}_3 = \mathrm{F}_1\mathrm{F}_2 = \{\delta_a, \delta_b, \delta_a\}$$
$$\mathrm{F}_5 = \mathrm{F}_2\mathrm{F}_3 = \{\delta_b, \delta_a, \delta_a, \delta_b, \delta_a\}, \ldots \qquad (۲)$$

برای وجود تقارن پاریته-زمان لازم است که قسمت حقیقی ثابت انتشار نسبت به مرکز تقارن هندسی آرایه متقارن باشد[۲]. بنابراین قسمت حقیقی ثابت انتشار ردیف پایین از آخر به اول مشابه ثابت انتشار ردیف بالا می‌باشد. علاوه-براین، قسمت موهومی می‌تواند بسته به بهره و افت به صورت $-\gamma$ یا $+\gamma$ باشد. برای وجود تقارن پاریته-زمان لازم است که قسمت موهومی ثابت انتشار نسبت به مرکز تقارن هندسی آرایه پادمتقارن باشد[۲]. در شکل ۱ شماتیکی از سیستم گفته شده برای $N = 10$ موجبر (الگوی فیبوناچی F_5) آورده شده است. هنگامی که γ صفر باشد، سیستم هرمیتی بوده و ویژه مقادیر آن حقیقی می‌باشند. با افزودن افت و بهره به سیستم $(\gamma \neq 0)$، در مقادیر افت و بهره بزرگتر از یک مقدار بحرانی ویژه مقادیر سیستم موهومی می‌شود. نقطه γ_c ای که سیستم از فاز تقارن (ویژه مقادیر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

حقیقی) به فاز شکست تقارن (ویژه مقادیر موهومی) گذار کند به نقطه شکست معروف است.



شکل ۱: شماتیک سیستم برای تعداد ۱۰ موجبر که موجبرهای دارای بهره با رنگ سبز و دارای افت با رنگ قرمز مشخص شده اند. موجبرهای نشان داده‌شده با A و B به‌ترتیب دارای ثابت انتشار δ_a و δ_b می‌باشند.

الگوی انتشار نور

برای بدست اوردن الگوی انتشار نور فرض می‌شود نوری با دامنه واحد در موجبر شماره ۱۴۴ وارد سیستم شود. با توجه به‌اینکه اختلاف ثابت‌های انتشار اهمیت دارد یکی از آن‌ها صفر $\delta_a = 0$ در نظر گرفته‌شده‌است. از طرفی فاصله افقی و عمودی موجبرهای مجاور یکسان فرض شده است، بنابراین ضرایب جفت شدگی هر دو مقداری ثابت و یکسان می‌باشند که با بهنجارش طول انتشار می‌توان $C = C' = 1$ فرض کرد.

شکل ۲ و ۳ الگوی انتشار نور را برای دو حالت فاز تقارن پاریته-زمان ($\gamma = 0$) و فاز شکست تقارن پاریته-زمان ($\gamma = 0.14$) در $\delta_b = 2$ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ و ۲ مشاهده می‌شود وقتی سیستم در فاز تقارن پاریته-زمان قرار دارد شدت در طول انتشار ثابت می‌ماند و در موجبرها پخش می‌شود اما هنگامی که سیستم در فاز شکست تقارن پاریته-زمان قرار دارد بدلیل موهومی شدن ویژه مقادیر شدت بصورت نمایی افزایش پیدا می‌کند.

نقطه شکست تقارن پاریته-زمان

~~در قسمت قبل الگوی انتشار نور را برای دو حالت تقارن پاریته-زمان و شکست تقارن پاریته-زمان بدست آوردیم.~~

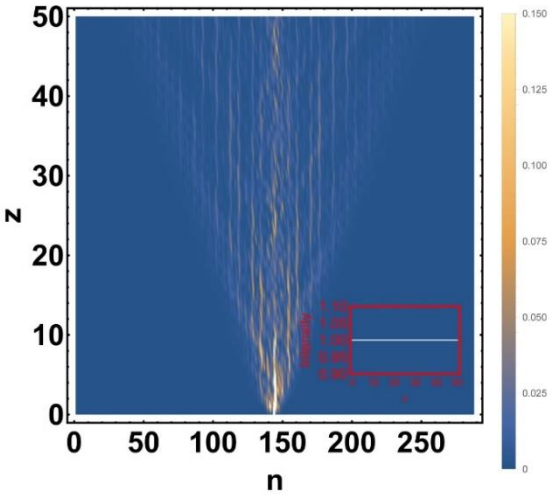
دراین مقاله، برای محاسبه دقیق نقطه شکست، یعنی تعیین اینکه به ازای چه میزان افت و بهره سیستم در فاز شکست یا عدم شکست تقارن پاریته-زمان قرار دارد، از معیار مبتنی بر شدت معادله (۳) که در مرجع ۶ معرفی شده‌است، استفاده می‌شود[۶] :

$$I_r = \exp\left(-\alpha \left|\frac{I_{avg,2}-I_{avg,1}}{I_{avg,2}+I_{avg,1}}\right|^{\beta}\right) \qquad (۳)$$

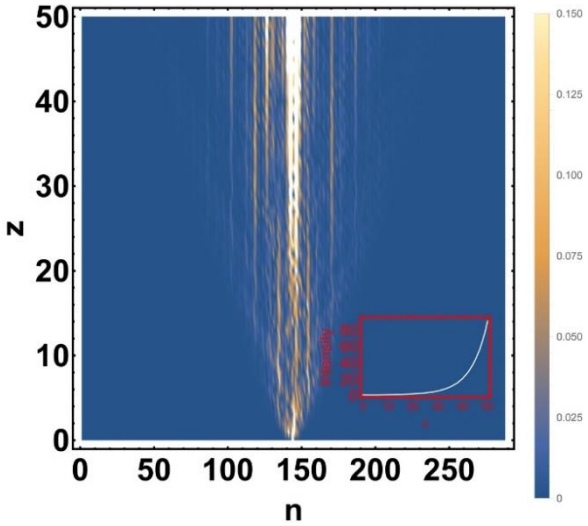
در این معادله $I_{avg,1}$ ، $I_{avg,2}$ به ترتیب میانگین شدت در نیمه اول طول انتشار $(0 \le z \le \frac{z_{max}}{2})$ و میانگین شدت در نیمه دوم طول انتشار $(\frac{z_{max}}{2} \le z \le z_{max})$ می‌باشند. همچنین $\alpha = \beta = 10$ دو ثابت بزرگتر از یک می‌باشند. در این معیار وقتی‌که سیستم در فاز تقارن پاریته-زمان است $I_r = 1$ می‌باشد و وقتی‌که در فاز شکست تقارن پاریته-زمان است $I_r = 0$ می‌باشد[۶]. یک مزیت مهم معیار I_r این است که نقطه شکست را بدون محاسبه مستقیم ویژه مقادیر بدست می‌دهد. البته این معیار محدودیتی دارد و آن اینکه به طول انتشار z_{max} وابسته است. در واقع این معیار در حالت حدی $z_{max} \to \infty$ به طور دقیق مشخص می‌کند که آیا ویژه مقادیر سیستم موهومی‌اند یا خیر. اما در طول متناهی z_{max} ، نقطه شکست را به صورت نقطه‌ای بدست می‌دهد که در آن قسمت موهومی ویژه مقادیر بسیار کوچکتر از z_{max}^{-1} می‌شوند. از لحاظ تجربی، با توجه به محدودیت طول موجبرها، I_r یک معیار مناسب جهت بدست آمدن نقطه شروع رشد نمایی شدت (فاز شکست تقارن پاریته-زمان) می‌باشد. در این مقاله این معیار برای $z_{max} = 50$ محاسبه شده است. شکل ۴ نحوه تغییر معیار I_r بر حسب γ (میزان افت

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

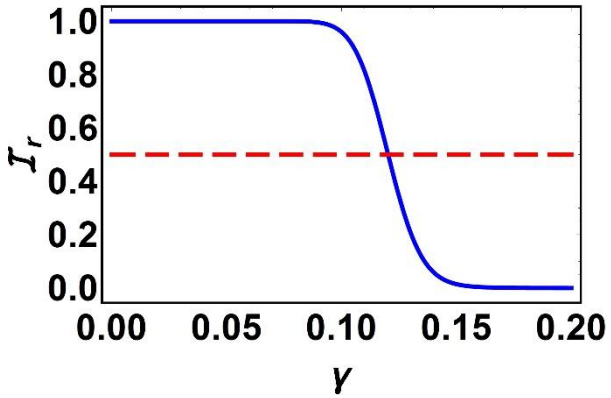
و بهره) را برای $\delta_b = 2$ نشان می‌دهد؛ مشاهده می‌شود که در این حالت نقطه شکست $\gamma_c = 0.12$ می‌باشد.



شکل ۲: الگوی انتشار نور برای $\gamma = 0$ یعنی وقتی که سیستم در فاز تقارن پاریته-زمان است. نمودار داخل شکل نحوه تغییر شدت بر حسب z است که نشان می‌دهد شدت کل در طول انتشار ثابت می‌ماند.



شکل ۳: الگوی انتشار نور برای $\gamma = 0.14$ یعنی وقتی که تقارن پاریته-زمان شکسته شده است. نمودار داخل شکل نحوه تغییر شدت بر حسب z است که نشان می‌دهد شدت کل در سیستم به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴: نمودار تغییرات معیار I_r بر حسب γ های مختلف که نقطه شکست را به ما می‌دهد.در این جا نقطه شکست $\gamma_c = 0.12$ است.

بررسی تغییرات نقطه شکست با تغییر ثابت انتشار

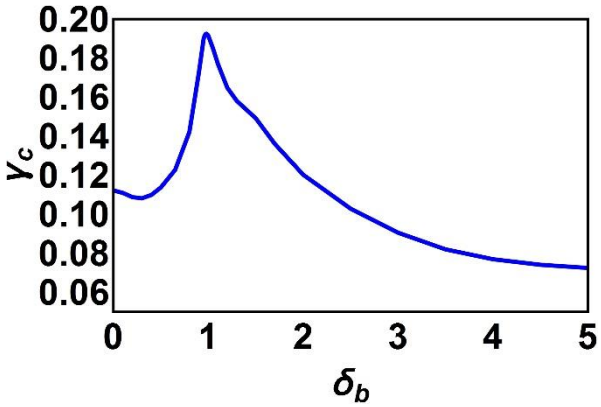
در این قسمت به بررسی نحوه تغییر نقطه شکست تقارن پاریته-زمان بر حسب ثابت انتشار δ_b موجبرها می‌پردازیم، ~~بدون از دست دادن کلیات مسئله می‌توان ثابت انتشار δ_a را صفر در نظر گرفت. بنابراین به بررسی نحوه تغییر نقطه شکست بر حسب ثابت انتشار δ_b پرداخته شده‌است.~~ شکل ۵ نمودار تغییرات نقطه شکست را بر حسب ثابت انتشار δ_b نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ثابت انتشار δ_b ابتدا نقطه شکست افزایش می‌یابد تا در نقطه $\delta_b = 0.98$ ماکزیمم می‌شود سپس کاهش پیدا می‌یابد. بنابراین، می‌توان با تنظیم قسمت حقیقی ثابت انتشار، درمحدوده وسیع‌تری از مقادیر افت و بهره ویژه مقادیر حقیقی داشت.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی آرایه موجبر نوری نردبانی با الگوی ضریب شکست فیبوناتچی دارای تقارن پاریته-زمان پرداختیم. با حل عددی معادلات حاکم بر سیستم نقطه شکست تقارن پاریته-زمان در این سیستم را به ازای طول انتشار $z_{max} = 50$ بدست آوردیم (شکل ۴) و نحوه تغییر نقطه شکست با ثابت انتشار موجبرها را بررسی کردیم

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

(شکل۵). نتایج عددی نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف ثابت انتشار موجبرها نقطه شکست تقارن پاریته-زمان ابتدا افزایش یافته و بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵: نمودار تغییرات نقطه شکست بر حسب مقدار حقیقی ثابت انتشار موجبرها

مرجع‌ها

[۱]A. Zyablovsky, A. P. Vinogradov, A. A. Pukhov, A. V. Dorofeenko, and A. A. Lisyansky, "PT symmetry in optics," Physics Uspekhi, 570, 1063 (2014).

[۱] M.A. Miri and A. Alu, "Exceptional points in optics and photonics", Science 363, 6422 (2019)

[۲] S.K. Özdemir, Rotter S, F. Nori, L. Yang, "Parity–time symmetry and exceptional points in photonics", Nature materials 18(8), 783-98 (2019).

[۳] A. Szameit and S. Nolte, "Discrete optics in femtosecond-laser-written photonic structures", Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 43(16), 163001 (2010).

[۴] A. Jagannathan "The Fibonacci quasicrystal: Case study of hidden dimensions and multifractality". Reviews of Modern Physics, 93(4), 045001 (2021).

[۵] M. Tavakoli, Y. S. Jalili, "One-dimensional Fibonacci fractal photonic crystals and their optical characteristics", J. Theor Appl Phys 8, 113 (2014).

[۵] A. P. Acharya et al., "Localization, PT symmetry breaking, and topological transitions in non-Hermitian quasicrystals". Physical Review B, 105, 014202 (2022).

[۶] "تاثیر میزان انحنا بر نقطه شکست تقارن پاریته-زمان در دو موجبر نوری خمیده"، فاطمه رهرو، مجتبی گلشنی، مجید تراز، بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران ، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران (بهمن ماه ۱۳۹۸).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]