

## Investigation of quality factor and resonant waves stability in layered quasiperiodic structurers made of single-negative metamaterials in gigahertz region

Hadi Rahimi 

Associate Professor, Department of Physics, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Article history:</b><br><br>Article Type: Research paper<br><br>Receive: 04 October 2025<br>Revise: 20 December 2025<br>Accept: 13 January 2026<br>Available online: 26 January 2026<br><br><b>Keywords:</b><br>Quality Factor<br><br>Resonant Mode<br><br>Photonic Structures<br><br>Single-Negative Metamaterials | In this work, we design and analyze a one-dimensional quasi-periodic Fibonacci photonic crystal containing a central defect layer, where the surrounding layers are composed of epsilon-negative (ENG) and mu-negative (MNG) metamaterials. The proposed structure had the configuration S7/defect/S7, where S7 represents the 7th order of Fibonacci sequence. The transfer matrix method was employed for numerical analysis. The key findings of the study revealed that the spectrum of the proposed quasiperiodic structure exhibited two distinct bandgaps: an angle-independent zero-effective-phase gap and an angle-dependent Bragg gap. The introduction of a defect layer successfully generated sharp, narrow transmission peaks within these bandgaps, confirming the formation of localized resonant modes. The behavior of these defect modes was critically dependent on the polarization of the incident light. For TE polarization, the modes demonstrated remarkable angular stability, with the quality factor increasing substantially from 106.76 at normal incidence to 112.26 at 30°, and notably more than doubling to 233.17 at 60°. In TM polarization, the defect modes were highly susceptible to the Brewster effect, leading to significant broadening at 30° (Q-factor $\approx$ 66) and complete elimination at 60°. |

**Cite this article:** H Rahimi, Investigation of quality factor and resonant waves stability in layered quasiperiodic structurers made of single-negative metamaterials in gigahertz region. *Applied Electromagnetics*. vol. 13, no. 2, pp. 59- 69, 2026.

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4>



OPEN  ACCESS

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

## 1. Introduction

Photonic crystals are artificial electromagnetic structures in which the refractive index is periodically or aperiodically modulated on the scale of the operating wavelength, leading to the formation of photonic band gaps that prohibit wave propagation in specific frequency ranges. Beyond conventional periodic photonic crystals, quasiperiodic photonic crystals—such as those based on Fibonacci sequences have attracted considerable attention due to their unique ability to combine long-range order with the absence of translational symmetry. This structural property enables the formation of wider and more robust photonic band gaps, including omnidirectional gaps that are weakly dependent on the angle of incidence.

In parallel, the emergence of metamaterials with unconventional electromagnetic responses has opened new pathways for manipulating light–matter interactions. Among these, single-negative (SNG) metamaterials—characterized by either negative permittivity (ENG) or negative permeability (MNG) exhibit unusual dispersion properties and support novel photonic band gaps, such as the zero-effective-phase (zero-n) gap. These gaps are fundamentally different from conventional Bragg gaps and are typically insensitive to incidence angle and structural scaling.

Previous studies have demonstrated that incorporating SNG metamaterials into one-dimensional photonic crystals can generate new band gaps and defect modes with potential applications in filters, resonators, and sensors. However, most reported defect modes suffer from limited angular stability, moderate quality factors, and strong polarization sensitivity, which restrict their practical usability.

In this work, we propose and analyze a one-dimensional quasiperiodic photonic crystal based on a symmetric Fibonacci sequence incorporating a central defect layer and composed of single-negative metamaterials. The main objective is to investigate the formation, angular stability, and polarization dependence of defect resonant modes, with particular emphasis on quality factor enhancement and physical mechanisms governing TE and TM polarizations.

## 2. Results and Discussion

The investigated structure consists of a symmetric configuration of the form  $S7/\text{defect}/S7$  where  $S7$  denotes the seventh-order Fibonacci sequence constructed from alternating MNG and ENG layers. The central defect layer is chosen as a conventional dielectric with positive refractive index. The electromagnetic response of the structure is analyzed using the transfer matrix method, which provides an exact solution for the transmission spectra under oblique incidence for both TE and TM polarizations.

The calculated transmission spectra reveal the existence of two distinct photonic band gaps. The first is a zero-effective-phase gap originating from the single-negative nature of the constituent layers. This gap exhibits remarkable angular stability and remains nearly unchanged as the incidence angle increases. The second gap corresponds to the conventional Bragg gap, whose position and width vary significantly with the angle of incidence.

Introducing the defect layer at the center of the structure leads to the emergence of sharp and well-localized defect modes inside the zero-n band gap. These resonant peaks exhibit strong field confinement within the defect layer, confirming the formation of localized cavity modes. A pronounced dependence on polarization is observed. For TE polarization, the defect modes demonstrate excellent angular stability. The quality factor increases systematically with increasing incidence angle, rising from approximately 106.8 at normal incidence to about 112.3 at  $30^\circ$ , and exceeding 233 at  $60^\circ$ . This enhancement is attributed to increased effective optical path length within the defect layer and higher reflectivity at oblique incidence, which together reduce spectral linewidth and strengthen resonance confinement.

In contrast, TM-polarized defect modes are strongly affected by the Brewster angle phenomenon. At an incidence angle of  $30^\circ$ , the resonance experiences significant spectral broadening, leading to a reduced quality factor of approximately 66. At  $60^\circ$ , the defect mode is completely suppressed due to vanishing reflection at the interfaces, preventing the formation of multiple internal reflections required for resonance. This behavior highlights the fundamentally different physical mechanisms governing TE and TM modes in metamaterial-based quasiperiodic structures.

The spatial distribution of the electric field further confirms strong localization at the defect layer for TE polarization, indicating efficient energy trapping and enhanced light–matter interaction a key requirement for high-performance sensing and filtering applications.

### 3. Conclusion

A one-dimensional quasiperiodic Fibonacci photonic crystal incorporating single-negative metamaterials and a central defect layer has been designed and systematically analyzed. The structure simultaneously supports an angle-independent zero-effective-phase band gap and an angle-dependent Bragg gap. The introduction of a defect layer generates sharp resonant modes within the zero-n gap, whose properties are strongly influenced by polarization. For TE polarization, defect modes exhibit high angular stability and a significant increase in quality factor with increasing incidence angle, reaching values more than twice that of normal incidence. Conversely, TM-polarized modes are highly sensitive to the Brewster effect and may be substantially weakened or completely eliminated at large angles. These findings demonstrate that the combination of quasiperiodic order and single-negative metamaterials provides an effective strategy for engineering high-Q resonant modes with controllable angular and polarization characteristics. The proposed structure shows strong potential for applications in narrowband and omnidirectional filters, photonic resonators, and highly sensitive optical or microwave sensors. Future work may focus on incorporating material losses, tunable metamaterial parameters, and experimental realization of the proposed design.

## بررسی ضریب کیفیت و پایداری امواج تشدیدی در ساختارهای لایه‌ای شبه‌تناوبی حاوی فرا مواد تک منفی در ناحیه گیگاهرتز

هادی رحیمی<sup>ID</sup>

دانشیار، گروه فیزیک، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

| چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | مشخصات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| در این پژوهش، یک ساختار لایه‌ای شبه‌تناوبی متشکل از سری فیبوناچی در نظر گرفته شده است که دارای یک لایه نقص مرکزی است و لایه‌های اطراف آن از فرا مواد تک - منفی تشکیل شده‌اند. نتایج با استفاده از روش ماتریس انتقال تحلیل شده‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طیف این ساختار شبه‌تناوبی دارای دو نوار ممنوعه مجزا است: یک نوار ممنوعه با فاز مؤثر صفر که مستقل از زاویه است و دیگری نوار براگ که وابسته به زاویه است. با معرفی لایه نقص، قله‌های تیز درون این نوار ممنوعه ایجاد می‌شود که تشکیل‌دهنده حالت‌های تشدیدی جایگزیده هستند. رفتار این امواج نقص به قطبش نورتابشی وابسته است. برای قطبش عرضی الکتریکی، پایداری زاویه‌ای قابل ملاحظه‌ای مشاهده شد، به طوری که ضریب کیفیت از ۱۰۶.۷۶ در تابش عمودی به ۱۱۲.۲۶ در زاویه ۳۰ درجه افزایش یافت و در زاویه ۶۰ درجه بیش از دوبرابر شد و به ۲۳۳.۱۷ رسید. در مقابل، برای قطبش عرضی مغناطیسی، حالت‌های نقص به شدت تحت تأثیر اثر بروستر قرار گرفتند که منجر به پهن‌شدگی فرکانسی قابل توجه در زاویه ۳۰ درجه (ضریب کیفیت تقریباً ۶۶) و حذف کامل این حالت‌ها در زاویه ۶۰ درجه شد. ترکیب دو ویژگی یعنی نظم شبه‌تناوبی و حضور نقص، امکان کنترل دقیق بر روی طیف انتقال، افزایش شدت میدان در محل نقص، و به کارگیری در حسگرهای نوری، فیلترها و تقویت‌کننده‌های فوتونی را فراهم می‌آورد. | <b>تاریخچه مقاله:</b><br><b>نوع مقاله:</b> علمی - پژوهشی<br><b>دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۷/۱۲<br><b>بازنگری:</b> ۱۴۰۴/۰۹/۲۹<br><b>پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۱۰/۲۳<br><b>ارائه آنلاین:</b> ۱۴۰۵/۱۱/۰۶<br><b>کلیدواژه‌ها:</b><br>ضریب کیفیت<br>مدهای تشدید<br>شبه بلور فوتونی<br>فرا مواد تک - منفی |

**استناد:** هادی رحیمی، بررسی ضریب کیفیت و پایداری امواج تشدیدی در ساختارهای لایه ای شبه تناوبی حاوی فرامواد تک‌منفی در ناحیه گیگاهرتز. //الکترومغناطیس کاربردی. ۱۳(۲): صص ۵۹-۶۹ (۱۴۰۴).

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).



## ۱- مقدمه

بلورهای نوری، ساختارهای دی‌الکتریک مهندسی‌شده‌ای هستند که در آن‌ها ضریب شکست به‌صورت دوره‌ای تغییر می‌کند، طوری که دوره تناوب ساختار با طول‌موج نورتابشی قابل‌مقایسه است [۱]. علاوه بر ساختارهای کاملاً تناوبی، الگوهای شبه‌تناوبی نیز وجود دارند که آرایش لایه‌ها در آن‌ها بین نظم کامل و بی‌نظمی قرار دارد؛ بنابراین، شبه بلورهای فوتونی<sup>۱</sup> ساختارهای دی‌الکتریک هستند که نظم آن‌ها بر خلاف بلورهای تناوبی معمولی، غیرتناوبی اما منظم است. این ساختارها از یک الگوی ریاضی مشخص ولی فاقد انتقال‌پذیری پیروی می‌کنند [۲].

[درحالی‌که یک بلور فوتونی معمولی مانند یک آینه براگ الگویی کاملاً تکراری مانند ABABABAB دارد، یک شبه بلور ممکن است از توالی‌هایی مانند فیبوناچی (ABAABABAABAAB...) پیروی کند که هرگز تکرار نمی‌شود، اما کاملاً از پیش تعریف شده و منظم است. شبه بلورهای فوتونی با ترکیب نظم و بی‌تناوبی، مزایای متعددی نسبت به بلورهای تناوبی کلاسیک ارائه می‌دهند که بارزترین آن‌ها ایجاد نوارهای ممنوعه تمام جهتی است که امکان مسدودسازی نور را مستقل از زاویه تابش و قطبش آن فراهم می‌کند [۳]. این ساختارها همچنین قادر به ایجاد حالت‌های تشدید با فاکتور کیفیت بالا در اثر ایجاد حالت نقص هستند و انرژی نوری را در ناحیه بسیار کوچک جایگزیده می‌کنند که باعث کاربرد آن‌ها در حسگرهای فوق حساس و لیزرهای کم‌توان می‌شود [۴]. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری فوق‌العاده در طراحی ساختار از طریق دنباله‌های مختلفی مانند فیبوناچی، امکان خوبی برای کنترل انتشار نور در کاربردهایی مانند فیلترهای چندکاناله، حسگرهای نوری و سلول‌های خورشیدی کارآمدتر فراهم می‌کند [۵-۷].

ساختارهای چندلایه‌ای را می‌توان از ترکیب هوشمندانه سه نوع ماده با رفتارهای الکترومغناطیسی متمایز طراحی کرد: مواد معمولی راست‌گرد که در آن‌ها ضرایب گذردهی الکتریکی  $\epsilon$  و تراوایی مغناطیسی  $\mu$  مثبت هستند و نور را به شیوه متعارف هدایت می‌کنند؛ فرا مواد چپ‌گرد که در آن‌ها هر دو عامل  $\epsilon$  و  $\mu$  هم‌زمان منفی بوده و موجب پدیده‌های غیرعادی مانند شکست معکوس می‌شوند؛ و فرا مواد تک منفی<sup>۲</sup> که در آن‌ها تنها یکی از این عامل‌ها منفی است [۸]. مواد تک منفی به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: گروه نخست موادی هستند که در آن‌ها گذردهی الکتریکی منفی و تراوایی مغناطیسی مثبت است که به

آن‌ها مواد اپسیلون - منفی<sup>۳</sup> (ENG) گفته می‌شود. این مواد معمولاً در فلزات در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس پلاسمایی یا در محیط‌های پلاسمایی دیده می‌شوند و ویژگی مهم آن‌ها ایجاد رزونانس پلاسمونی و تضعیف شدید موج الکتریکی است. گروه دوم موادی هستند که گذردهی الکتریکی مثبت و تراوایی مغناطیسی منفی دارند که به آن‌ها مواد مو - منفی<sup>۴</sup> (MNG) گفته می‌شود. این مواد بیشتر به‌صورت ساختارهای مهندسی‌شده مانند حلقه‌های شکاف‌دار<sup>۵</sup> ساخته می‌شوند و می‌توانند رزونانس مغناطیسی و نوار ممنوعه‌های غیرمعمول ایجاد کنند [۹]. هر دو نوع ماده در طراحی حسگرها، فیلترها، جاذب‌ها و سامانه‌های کنترل انتشار موج کاربرد گسترده دارند. این مواد در طراحی فیلترهای نوری و مایکروویوی برای جداسازی طول‌موج‌های خاص، ساخت حسگرهای بسیار حساس به تغییر ضریب شکست محیط، و تولید جاذب‌های الکترومغناطیسی جهت کاهش بازتاب یا حذف نویز به کار می‌روند [۱۱ و ۱۰]. همچنین با استفاده از آن‌ها می‌توان تمرکز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در نواحی مشخصی افزایش داد که در بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی، آنتن‌های فشرده و تقویت‌کننده‌های فوتونی مؤثر است [۱۲].

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از فرا مواد تک منفی و ساختارهای وابسته به آن‌ها در بلورهای فوتونی یک‌بعدی به طور گسترده مطالعه شده است. برای نمونه، یه و وو [۱۳] به تحلیل نوارهای ممنوعه فوتونی در ساختارهای حاوی مواد تک منفی پرداختند و نشان دادند که این مواد می‌توانند نوارهای ممنوعه جدیدی با رفتار متفاوت از دی‌الکتریک‌های معمولی ایجاد کنند. در ادامه، چانگ و همکاران [۱۴] استفاده از مواد تک منفی به‌عنوان لایه نقص در هتروساختارهای فوتونی را بررسی کرده و قابلیت تنظیم‌پذیری حالات نقص را گزارش کردند. همچنین، تانگ و همکاران [۱۵] [به بررسی شکاف‌ها و حالات نقص غیرخطی در ساختارهای تک منفی ناهمسان‌گرد پرداخته و نشان دادند که این مواد پتانسیل ایجاد رفتارهای غیرخطی ویژه‌ای دارند. پژوهش کلاسیک سینگ و همکاران نیز برخی نوارهای ممنوعه جدید و حالات نقص ناشی از حضور فرا مواد را آشکار کرد [۱۶]. در همین راستا، شیانگ و همکاران [۱۷] ویژگی‌های شکاف‌های همه جهتی و حالات نقص در ساختارهای دارای فرا مواد نامعین با پراکندگی هایپربولیک را تحلیل کردند. در کارهای جدیدتر، ژانگ و همکاران به بررسی ساختارهایی با متامواد هایپربولیک مبتنی بر نیمه فلزهای دیراک و مواد کایرال پرداخته و به تنظیم‌پذیری حالات نقص وابسته به

<sup>۳</sup> Epsilon Negative (ENG)<sup>۴</sup> Mu-Negative (MNG)<sup>۵</sup> Split ring resonator<sup>۶</sup> Heterostructure<sup>۱</sup> Photonic Quasicrystals<sup>۲</sup> Single Negative Metamaterials

مشخصه  $S_{N+1} = \{S_{N-1}, S_N\}$ ,  $N \geq 1$  به دست آورد [۲۰].  $N$  شماره رشته فیبوناچی است. انتخاب اینکه لایه اول در ساختار فیبوناچی کدام یک از لایه‌های A یا B باشد کاملاً اختیاری است. لایه اول را می‌توان A یا B انتخاب و لایه‌های بعدی را از رابطه مشخصه مرتب کرد. چند رشته این ساختار برابر است با:

$S_0: B,$

$S_1: A,$

$S_2: BA,$

$S_3: ABA,$

$S_4: BAABA,$

$S_5: ABABAABA,$

$S_6: BAABAABABAABA,$

$S_7: ABABAABABAABABAABAABAABAABA.$

همه رشته‌های با شماره فرد با لایه A شروع و با لایه A به پایان می‌رسند. همچنین تعداد لایه‌ها در ساختار فیبوناچی از رابطه بازگشتی  $FN = FN-1 + FN-2$  به دست می‌آید که در آن  $F_0 = F_1 = 1$  است.

جنس لایه‌های A و B به ترتیب مو - منفی و اپسیلون - منفی و ضخامت آنها  $d_A$  و  $d_B$  هستند. ضرایب گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی وابسته به فرکانس این لایه‌ها به ترتیب عبارت‌اند از [۲۱]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_A &= 3, \quad \mu_A = 1 - \frac{100}{\omega^2}, \\ \varepsilon_B &= 1 - \frac{100}{\omega^2}, \quad \mu_B = 3 \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $\omega$  فرکانس موج تابشی بوده و در ناحیه ریزموج قرار دارد. این ساختار چندلایه‌ای در هوا قرار دارد و جنس لایه نقص از موادی با ضریب شکست مثبت انتخاب شد. مدل ارائه‌شده در رابطه (۱) بر اساس مدل‌های پراکندگی مؤثر و ساده‌شده رایج در ناحیه ریزموج انتخاب شده است که در مطالعات نظری متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۱]. این مدل اگرچه ساده‌شده هست، اما قادر است ویژگی‌های فیزیکی کلیدی فرا مواد تک منفی، از جمله علامت منفی گذردهی یا تراوایی را به‌درستی تولید کنند.

برای محاسبه طیف عبور یک ساختار لایه‌ای مانند بلور فوتونی یک‌بعدی، می‌توان از روش ماتریس انتقال استفاده کرد. در این روش، فرض می‌کنیم موجی از هوا با زاویه مشخص به ساختار وارد شود. لایه‌ها در صفحه xy قرار دارند و جهت z عمود

قطبش اشاره کرده‌اند [۱۸]. همچنین، کومار و همکاران با مطالعه ویژگی‌های شکاف صفر میانگین و قابلیت تنظیم حالات نقص در بلورهای فوتونی متا ماده‌ای نشان دادند که این ساختارها برای طراحی فیلترهای پیشرفته و حسگرهای نوری بسیار کارآمد هستند [۱۹]. مجموعه این مطالعات بیانگر آن است که ترکیب بلورهای فوتونی با مواد تک منفی و هایپرپولیک، راهبردی مؤثر برای مهندسی نوارهای ممنوعه، کنترل حالات نقص و توسعه کاربردهایی چون فیلترها، حسگرها و ساختارهای فوتونی قابل‌تنظیم را فراهم می‌آورد. در مطالعات اشاره شده اگرچه نوارهای ممنوعه و حالت‌های نقص تنظیم‌پذیر گزارش شده، اما این دستاوردها با محدودیت‌های اساسی برای کاربردهای عملی همراه است. حالت‌های نقص عموماً از پایداری زاویه‌ای و قطبشی ضعیف، ضریب کیفیت محدود و حساسیت بالا به نوسانات عامل‌های مواد رنج می‌برند. ازسوی دیگر، پیچیدگی ساخت و تلفات ذاتی مواد امکان بهره‌برداری عملی از این ساختارها را در ادوات نوری با چالش جدی مواجه کرده است.

در این مقاله، یک بلور فوتونی یک‌بعدی در نظر گرفته شد که در مرکز آن یک لایه نقص قرار دارد و دو سوی این لایه نقص از توالی شبه‌تناوبی فیبوناچی تشکیل شده است. استفاده از توالی فیبوناچی به جای تناوب کامل موجب ایجاد باندگپ‌های فوتونی با پهنای بزرگ‌تر می‌شود. لایه نقص در مرکز این ساختار باعث شکل‌گیری حالت‌های محلی درون باند گپ برای عبور انتخابی طول‌موج‌های خاص می‌شود. ترکیب این دو ویژگی یعنی نظم شبه‌تناوبی و حضور نقص، امکان کنترل دقیق بر روی طیف انتقال، افزایش شدت میدان در محل نقص، و به‌کارگیری در حسگرهای نوری، فیلترهای باریک باند و تقویت‌کننده‌های فوتونی را فراهم می‌آورد. در مقایسه با این کارهای اشاره شده [۱۳-۱۹]، [نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ترکیب نظم شبه‌تناوبی فیبوناچی با یک لایه نقص مرکزی است. این ترکیب موجب می‌شود که جایگزینی نور و ضریب کیفیت بالا حاصل شود و ازسوی دیگر، شبه‌تناوبی بودن ساختار، پهنای نوار ممنوعه و پایداری مدهای نقص را بهبود بخشد.

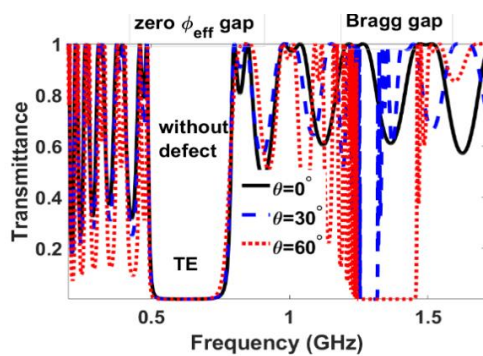
## ۲- روش تحقیق

در این کار، یک ساختار لایه‌ای یک‌بعدی متشکل از دولایه A و B و همچنین لایه نقص در نظر گرفته شد. دو سوی این لایه نقص از توالی شبه‌تناوبی فیبوناچی تشکیل شده است. پیکربندی کل بلور فوتونی به صورت  $S_N/\text{defect}/S_N$  است.  $S_N$  ساختار فیبوناچی است. ساختارهای فیبوناچی، از نوع ساختارهای شبه‌تناوبی هستند که در آنها چینش لایه‌ها از یک قاعده مشخصه ساده تبعیت می‌کند. یک ساختار فیبوناچی نوعی را می‌توان از کنار هم گذاشتن دولایه متفاوت A و B طبق رابطه

### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، به بررسی تجربی خواص عبور نوری یک بلور فوتونی یک‌بعدی حاوی نقص با آرایش شبه‌تناوبی پرداخته شد. ساختار مورد مطالعه از یک لایه‌ی نقص مرکزی تشکیل شده که در دو سوی آن، لایه‌ها با آرایش فیبوناچی از توالی هفتم  $S_7$  قرار گرفته‌اند و پیکربندی کلی به صورت  $S_7/\text{defect}/S_7$  است. لایه‌های سازنده‌ی ساختار فیبوناچی یعنی  $A$  و  $B$ ، به ترتیب از جنس فرا مواد تک منفی نوع مو - منفی و اپسیلون - منفی با ضخامت‌های  $6\text{mm}$  و  $10\text{mm}$  در نظر گرفته شده‌اند. ضخامت لایه نقص  $40\text{mm}$  و ضریب شکست آن یک فرض شده است.

در شکل (۱) طیف عبور ساختار برای قطبش TE و در زوایای تابش  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  در حالی که لایه نقص وجود ندارد رسم شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در طیف عبور ساختار مورد مطالعه، امکان مشاهده نوار ممنوعه فاز مؤثر صفر وجود دارد که پهنای آن مستقل از زاویه تابش است. همچنین همان‌طور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌شود، نوار براگ<sup>۱۰</sup> نیز در طیف مشاهده می‌شود. پهنای این نوار ممنوعه وابسته به زاویه تابش است. با افزایش زاویه تابش از  $0^\circ$  به  $30^\circ$  و  $60^\circ$  درجه، موقعیت فرکانسی این نوار در محور افقی جابه‌جا شده و پهنای آن تغییر می‌کند. برای قطبش TM نیز این نتایج قابل مشاهده است.



شکل (۱). طیف عبوری ساختار لایه‌ای برای قطبش TE در زوایای تابش  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  درجه وقتی که لایه نقص وجود ندارد.

شکل‌های ۲ و ۳ به‌وضوح نشان می‌دهند که وارد کردن یک لایه‌ی نقص با ضخامت مشخص در مرکز این شبه بلور فوتونی، منجر به ظهور حالت‌های نقص به‌صورت قله‌های تیز و باریک در نوار ممنوعه‌ی طیفی می‌شود. بررسی این پدیده برای هر دو قطبش TE و TM حاکی از آن است که اگرچه در هر دو حالت، مدهای نقص شکل می‌گیرند، اما مشخصات دقیق این مدها از جمله موقعیت فرکانسی، تعداد و ضریب کیفیت آن‌ها تحت تأثیر

بر سطح لایه‌هاست. هنگام عبور موج از لایه‌ها، میدان‌های تابشی، بازتابی و عبوری توسط یک ماتریس انتقال به هم مرتبط می‌شوند. با استفاده از روابط پیوستگی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در مرز بین دو لایه، ماتریس انتقال برای قطبش عرضی الکتریکی TE<sup>۷</sup> به‌صورت زیر به دست می‌آید [۲۲ و ۲۳]:

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos(k_z^j \Delta z) & i/q_j \sin(k_z^j \Delta z) \\ iq_j \sin(k_z^j \Delta z) & \cos(k_z^j \Delta z) \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $k_z^j = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_j \mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j}$  بردار موج در راستای محور  $z$ ،  $c$  سرعت نور،  $q_j = \sqrt{\epsilon_j} / \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j}$  و  $j$  نشان‌دهنده هر لایه هست. با استفاده از روابط بالا، ماتریس انتقال برابر می‌شود با

$$t(\omega, \theta) = \frac{2 \cos \theta}{(m_{11} + m_{22}) \cos \theta + i(m_{12} \cos^2 \theta - m_{21})} \quad (3)$$

$m_{ij}$  عناصر ماتریس انتقال کل  $X_N(\omega) = \Pi_{j=1}^N M_j(d_j, \omega)$  هستند روش محاسبه برای موج با قطبش عرضی مغناطیسی TM<sup>۸</sup> مشابه موج TE است.

یکی از مفاهیمی که در تفسیر نمودارها در بخش نتایج استفاده خواهد شد، مفهوم گاف فاز مؤثر صفر<sup>۹</sup> است. گاف فاز مؤثر صفر به ناحیه‌ای خاص در ساختارهای تناوبی یا شبه‌تناوبی فوتونی گفته می‌شود که در آن، باوجود ممنوع بودن انتشار موج (تشکیل گاف باند)، تغییر فاز در واحد سلول یا در کل ساختار تقریباً صفر است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که عدد موج مؤثر ساختار به صفر میل کند؛ به بیان دیگر، ضریب شکست مؤثر به مقدار بسیار کوچکی نزدیک می‌شود. در چنین شرایطی، میدان الکترومغناطیسی در سراسر ساختار تقریباً هم‌فاز باقی می‌ماند. گاف فاز مؤثر صفر معمولاً در ساختارهای لایه‌ای حاوی فرا مواد تک منفی مانند محیط‌های اپسیلون - منفی یا مو - منفی مشاهده می‌شود. اهمیت این گاف از آنجا ناشی می‌شود که هم‌فاز بودن میدان در کل ساختار منجر به افزایش قابل توجه ضریب کیفیت و تقویت برهم‌کنش نور - ماده می‌گردد. به همین دلیل، گاف فاز مؤثر صفر نقش کلیدی در طراحی تشدیدگرهای فوتونی با کارایی بالا ایفا می‌کند.

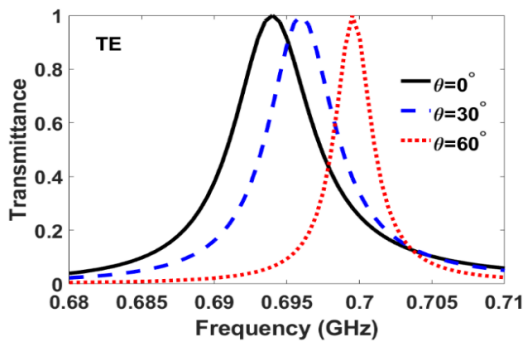
<sup>۷</sup> Transverse Electric

<sup>۸</sup> Transverse Magnetic

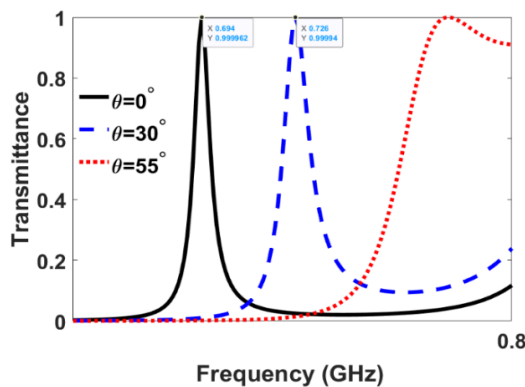
<sup>۹</sup> Zero effective phase gap

<sup>۱۰</sup> Bragg

مرز بین دولایه و  $\theta_i$  زاویه عبور است. هنگامی که بازتابش TM در نزدیکی  $\theta_B$  به صفر میل می‌کند، لذا بازتاب‌های چندگانه لازم برای تشکیل یک نوار ممنوعه نیز وجود نخواهد داشت. در نتیجه، مد نقص ضعیف و پهن شده می‌شود. در مقابل، TE در همان زوایا بازتابش بالایی دارد، باند را پایدار نگه داشته و مد نقصی با پهنای فرکانسی باریک و چایگزیده ایجاد می‌شود.



شکل (۴). مد نقص جایگزیده TE در سه زاویه مختلف.



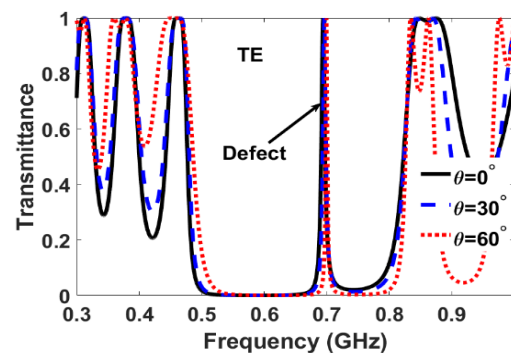
شکل (۵). مد نقص جایگزیده TM در سه زاویه مختلف.

جدول (۱). ضریب کیفیت مدهای نقص TE و TM در زوایای مختلف بر اساس شکل‌های ۴ و ۵.

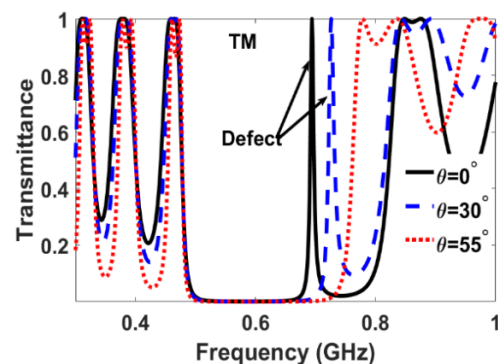
| ضریب کیفیت | پهنای در نصف مقدار بیشینه (گیگاهرتز) | فرکانس مد نقص (گیگاهرتز) | قطبش  | زاویه (درجه) |
|------------|--------------------------------------|--------------------------|-------|--------------|
| ۱۰۶.۷۶     | ۰.۰۰۶۵                               | ۰.۶۹۴                    | TE/TM | ۰            |
| ۱۱۲.۲۵     | ۰.۰۰۶۲                               | ۰.۶۹۶                    | TE    | ۳۰           |
| ۶۶         | ۰.۰۱۱                                | ۰.۷۲۶                    | TM    | ۳۰           |
| ۲۳۳.۱۶     | ۰.۰۰۳                                | ۰.۶۹۹۵                   | TE    | ۶۰           |
| -          | -                                    | -                        | TM    | ۶۰           |

همان‌طور که می‌دانیم ضریب کیفیت<sup>۱۱</sup> معیاری از میزان تشدید و توانایی یک سامانه در ذخیره و نگهداشت انرژی نسبت به تلفات آن است و برابر است با نسبت طول موج مرکزی به

نوع قطبش موج فرودی قرار می‌گیرد که این امر ناشی از تفاوت در شرایط مرزی و برهم‌کنش میدان‌های الکترومغناطیسی با ساختار است. حالت‌های نقصی که در محدوده‌ی نوار یا شکاف فاز مؤثر صفر و در قطبش TE پدیدار می‌شوند، پایداری فرکانسی بهتری در برابر تغییرات زاویه‌ی تابش دارند حفظ می‌کنند. در بررسی طیف عبور برای قطبش TM (شکل ۳)، تضعیف یا حذف ظاهری حالت نقص در زوایای خاص مشاهده می‌شود که به طور مستقیم به اثر زاویه‌ی بروسر مرتبط می‌شود. مشاهده می‌شود که مد نقص در زاویه ۶۰ درجه حذف شده است. مطابق روابط فرنل ضریب بازتابش برای TM از رابطه زیر به دست می‌آید



شکل (۲). طیف عبوری برای قطبش TE در زوایای تابش ۰، ۳۰ و ۶۰ درجه. ضریب شکست و ضخامت لایه نقص به ترتیب  $nd=1$  و  $d=40\text{mm}$  فرض شده است. نوار در نظر گرفته شده از نوع فاز مؤثر صفر است.



شکل (۳). طیف عبوری برای قطبش TM در زوایای تابش ۰، ۳۰ و ۶۰ درجه. ضریب شکست و ضخامت لایه نقص به ترتیب  $nd=1$  و  $d=40\text{mm}$  فرض شده است. نوار در نظر گرفته شده از نوع فاز مؤثر صفر است.

$$r_{TM} = (n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t) / (n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t) \quad (۴)$$

با ترکیب این رابطه و رابطه اسنل، رابطه زاویه بروسر  $\theta_B = \arctan(n_t/n_i)$  به دست می‌آید. کافی است که صورت رابطه ضریب بازتابش صفر قرار داده شود. در رابطه بالا  $\theta_i$  زاویه تابش به

<sup>۱۱</sup> Quality Factor

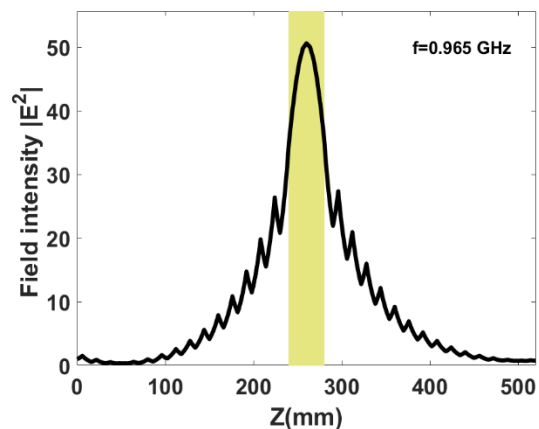
الگوی توزیع، مشخصه‌ی یک حالت نقص جایگزیده است و تأیید می‌کند که در فرکانس‌های خاص، انرژی نور به طور مؤثر در حفره‌ی مرکزی به‌دام‌افتاده و یک میدان قوی تشکیل می‌دهد.

در پایان، نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد: نخست، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً بر بلورهای فوتونی تناوبی یا هتروساختارهای ساده حاوی فرا مواد تک منفی تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش از یک ساختار شبه‌تناوبی فیبوناچی متقارن با لایه نقص مرکزی ( $S_7/\text{defect}/S_7$ ) استفاده شده است. این ترکیب به طور هم‌زمان منجر به تشکیل شکاف فاز مؤثر صفر مستقل از زاویه و بهبود پایداری مدهای نقص می‌شود؛ ویژگی‌ای که در اغلب کارهای قبلی یا گزارش نشده و یا به‌صورت محدود مشاهده شده است. دوم، درحالی‌که بسیاری از پژوهش‌های پیشین به گزارش صرف وجود حالت‌های نقص بسنده کرده‌اند، در این مقاله پایداری زاویه‌ای و قطبشی مدهای نقص به‌صورت کمی بررسی شده است. نشان‌داده‌شده است که در قطبش TE، ضریب کیفیت مدهای نقص نه‌تنها حفظ می‌شود؛ بلکه با افزایش زاویه تابش به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، درحالی‌که در قطبش TM، نقش اثر بروسر به‌عنوان مکانیزم فیزیکی غالب برای تضعیف یا حذف مدهای نقص تحلیل شده است. این تبیین فیزیکی، در بسیاری از مطالعات پیشین به‌صورت صریح ارائه نشده است. سوم، نوآوری این کار در ترکیب نظم شبه‌تناوبی با فرا مواد تک منفی در چارچوب یک تحلیل عددی دقیق مبتنی بر روش ماتریس انتقال است که امکان استخراج دقیق ضریب کیفیت و بررسی پایداری مدهای تشدید را فراهم کرده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و تحلیل بلور فوتونی یک‌بعدی شبه‌تناوبی از نوع فیبوناچی و استفاده از فرا مواد تک منفی به‌عنوان لایه‌های پایه انجام شد. نتایج به‌وضوح نشان داد که این ساختار قادر به ایجاد هم‌زمان نوار ممنوعه مستقل از زاویه (شکاف فاز صفر) و وابسته به زاویه (شکاف براگ) است. قراردادن لایه نقص در مرکز آن، حالت‌های تشدید را پدید می‌آورد. در قطبش TE، مدهای نقص پایدارتر بوده و ضریب کیفیت با افزایش زاویه تابش به طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به‌ویژه در زاویه ۶۰ درجه که مقدار ضریب کیفیت بیش از دوبرابر تابش قائم می‌شود. در مقابل، در قطبش TM حساسیت به زاویه بیشتر بوده و مد نقص در حوالی زاویه ۶۰ درجه به طور کامل حذف می‌شود که ناشی از پدیده زاویه بروسر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار شبه‌تناوبی پیشنهادی با مدهای نقص با ضریب کیفیت بالا و پایداری زاویه‌ای مناسب، به‌ویژه در قطبش TE، پتانسیل بالایی برای کاربردهای عملی نظیر طراحی فیلترهای باریک باند و تمام جهتی، تشدیدگرهای فوتونی و حسگرهای حساس به ضریب

پهنای موج در نصف مقدار بیشینه<sup>۱۲</sup>. هر چه ضریب کیفیت بالاتر باشد، پهنای فرکانسی حالت تشدید کمیتر و پاسخ طیفی تیزتر است؛ بنابراین، ضریب کیفیت بالا نقش کلیدی در بهبود عملکرد حسگرهای نوری و فیلترها دارد، چون امکان آشکارسازی تغییرات کوچک را فراهم می‌کند [۲۴]. بررسی شکل‌های ۴ و ۵ و جدول ۱ نشان می‌دهد که در قطبش TE مدهای نقص پایدارتر بوده و ضریب کیفیت با افزایش زاویه تابش به طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به‌ویژه در زاویه ۶۰ درجه که مقدار ضریب کیفیت بیش از دوبرابر حالت ۰ درجه می‌شود (جدول ۱ را مشاهده کنید). در مقابل، در قطبش TM حساسیت به زاویه تابش بیشتر بوده و مد نقص در حوالی زاویه ۶۰ درجه به طور کامل حذف می‌شود که ناشی از زاویه بروسر است.



شکل (۶): توزیع شدت میدان الکتریکی قطبش TE در تابش قائم

افزایش ضریب کیفیت مدهای نقص برای قطبش TE با افزایش زاویه تابش ناشی از دو علت است. از یک‌سو، با افزایش زاویه، طول مسیر مؤثر نور در لایه نقص افزایش می‌یابد که باعث افزایش فاز در هر رفت‌وبرگشت داخل لایه نقص شده و در نتیجه با افزایش تشدید، مد نقص پهنای فرکانسی‌اش کمتر می‌شود و در نهایت ضریب کیفیت زیاد می‌شود. از سوی دیگر، در قطبش TE ضریب بازتاب در مرزهای ساختار با افزایش زاویه افزایش می‌یابد و برخلاف قطبش TM، پدیده زاویه بروسر وجود ندارد. هم‌افزایی این دو اثر منجر به کاهش پهنای طیفی مد نقص و افزایش ضریب کیفیت برای قطبش TE در زوایای بزرگ‌تر می‌شود.

در شکل (۶)، ساختار عرضی شدت میدان الکتریکی قطبش TE در فرکانس مد نقص ۰.۶۹۴ گیگاهرتز و در تابش قائم رسم شده است. این توزیع شدت با حل معادلات ماکسول و با در گرفتن شرایط مرزی و پیوستگی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به دست می‌آید. تحلیل این شکل به‌وضوح نشان می‌دهد که شدت میدان الکتریکی در محل لایه نقص به حداکثر مقدار خود می‌رسد و به‌صورت نمایی در درون ساختار تضعیف می‌شود. این

<sup>12</sup> Full width at half maximum (FWHM)

[11] J. khalilpour, H. R. Dalili Oskouyi, S. A. Taghavi, "Design, Simulation and Fabrication of Ultra-Wide-Band Electromagnetic Waves Absorber with Optimal Dimensions Based on Metamaterial", *Applied Electromagnetics*, vol. 9, No.1, 2020. DOR:20.1001.1.26455153.1400.9.1.20.7 (In Persian)

[12] N. K. Prasada, T. A. Babua, S. Phanidharb, C. S. Singampallic, B. R. Naikd, M. S. Sarmaa, S. Ramesha, "Potential applications of metamaterials in antenna design, cloaking devices, sensors and solar cells: A comprehensive review," *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*, vol.13 pp. 23–31, 2021. doi.org/10.1039/C0CS00184H

[13] D. W. Yeh, C. J. Wu, "Analysis of photonic band structure in a one-dimensional photonic crystal containing single-negative materials," *Optics Express*, vol. 17 pp. 16666–16680, 2009. doi.org/10.1364/OE.17.016666

[14] T. W. Chang, C. J. Cheng, C. J. Wu, "Use of single-negative material as a tunable defect in a dielectric photonic crystal heterostructure," *Applied Optics*, vol. 55 pp. 825–829, 2016. doi.org/10.1364/AO.55.000825

[15] T. Tang, W. Liu, X. Gao, X. He, J. Yang, "Band gaps and nonlinear defect modes in one-dimensional photonic crystals with anisotropic single-negative metamaterials," *Optics & Laser Technology*, vol. 43, pp. 1016–1019, 2011. doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.01.002

[16] S. K. Singh, J. P. Pandey, K. B. Thapa, S. P. Ojha, "Some new band gaps and defect modes of 1D photonic crystals composed of metamaterials," *Solid State Communications*, vol. 143 pp. 217–222, 2007. doi.org/10.1016/j.ssc.2007.05.016

[17] Y. Xiang, X. Dai, S. Wen, D. Fan, "Properties of omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystal containing indefinite metamaterials with a hyperbolic dispersion," *Journal of Applied Physics*, vol. 102 pp. 345–354, 2007. doi.org/10.1063/1.2809446

[18] L. Zhang, R. Shi, P. Hong, W. Liu, X. Huang, Q. Wang, "Tunable polarization-dependent defect modes and lateral shifts of one-dimensional photonic crystals containing Dirac semimetal-based hyperbolic metamaterials and chiral materials," *Optics Communications*, 574, 131077, 2025. doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131077

[19] N. Kumar, V. Singhania, S. Kaliramna, B. Suthar, "Investigation and comparative analysis of zero-n gap characteristics and defect mode tunability in a metamaterial-based binary photonic crystal," *Journal of Optics*, vol. 54 pp. 1052–1065, 2025. doi.org/10.1007/s12596-024-01793-2

[20] A. Jagannathan, "The Fibonacci quasicrystal: Case study of hidden dimensions and multifractality," *Reviews of Modern Physics*, vol. 93 pp. 045001, 2021. doi.org/10.1103/RevModPhys.93.045001

[21] H. Jiang, H. Chen, H. Q. Li, Y. W. Zhang, J. Zi, and S. Y. Zhu, "Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials," *Phys. Rev. E*, vol. 69, pp. 066607, 2004). https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066607

[22] L. L. Missoni, G. P. Ortiz, M. L. M. Ricci, V. J. Toranzos, W. L. Mochán, "Rough 1D photonic crystals: a transfer matrix approach," *Optical Materials*, vol. 109 pp. 110012, 2020. doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110012

شکست دارد. تمرکز میدان در ناحیه‌ی لایه‌ی نقص امکان آشکارسازی تغییرات بسیار کوچک در عامل‌های فیزیکی مانند ضریب شکست را فراهم می‌کند که این ویژگی برای کاربردهای حسگری اهمیت ویژه‌ای دارد. ازسوی دیگر، حذف مدهای تشدید در قطبش TM در نزدیکی زاویه بروستر، قابلیت طراحی ادوات وابسته به قطبش را نیز فراهم می‌سازد. به عنوان چشم انداز پژوهش‌های آینده، می‌توان به بررسی اثر تلفات واقعی فرا مواد، استفاده از مدل‌های پراکندگی پیچیده‌تر، بهینه‌سازی و توسعه‌ی طرح‌های قابل تنظیم یا تجربی‌سازی ساختار اشاره کرد که در عین حال چالش‌هایی نظیر ساخت دقیق لایه‌ها، کنترل تلفات و پایداری عملکرد در شرایط واقعی را نیز به همراه دارند.

## ۵- مراجع

[1] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, S. Fan, "Photonic crystals," *Solid State Communications*, vol. 102 pp.165–173, 1997. doi.org/10.1016/S0038-1098(96)00716-8

[2] Z. V. Vardeny, A. Nahata, A. Agrawal, "Optics of photonic quasicrystals," *Nature Photonics*, vol.7(3) pp.177–187, 2013. doi.org/10.1038/nphoton.2012.343

[3] C. A. Araújo, M. S. Vasconcelos, P. W. Mauriz, E. L. Albuquerque, "Omnidirectional band gaps in quasiperiodic photonic crystals in the THz region," *Optical Materials*, vol 35(1) pp. 18–24, 2012. doi.org/10.1016/j.optmat.2012.06.011

[4] L. Cui, A. Hayat, L. Lv, Z. Xu, T. Zhai, "A theoretical model of quasicrystal resonators: A guided optimization approach," *Crystals*, vol. 11(7) pp. 749, 2021. doi.org/10.3390/cryst11070749

[5] K. M. Abohassan, "Tunable multi-channel optical filters based on Octonacci one-dimensional photonic quasicrystals," *Journal of Nanophotonics*, vol.16(2) pp.026006, 2022. doi.org/10.1117/1.JNP.16.026006

[6] T. M. Mercier, T. Rahman, C. Krishnan, E. Khorani, P. J. Shaw, M. E. Pollard, S. A. Boden, P. G. Lagoudakis, M. D. Charlton, "High symmetry nano-photonic quasi-crystals providing novel light management in silicon solar cells," *Nano Energy*, vol. 84 pp.105874, 2021. doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105874

[7] S. Solookil, M. Seifouri, "Analysis and Simulation of an Optical Coupler Based on a Single Mode Fiber and a Crystal Photonic Fiber", *Applied Electromagnetics*, vol. 12, No.1, 2024. DOR:20.1001.1.26455153.1403.12.1.1.9 (In Persian)

[8] Y. Liu, X. Zhang, "Metamaterials: a new frontier of science and technology," *Chemical Society Reviews*, vol. 40 pp. 2494–2507, 2011. doi.org/10.1039/C0CS00184H

[9] N. Engheta, A. Alù, M. G. Silveirinha, A. Salandrino, J. Li, "DNG, SNG, ENZ and MNZ metamaterials and their potential applications," *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, pp. 258–261, 2006. 10.1109/MELCON.2006.1653087

[10] T. Chen, S. Li, H. Sun, "Metamaterials application in sensing," *Sensors*, vol. 12, pp.2742–2765, 2012. https://doi.org/10.3390/s120302742

[23] M. B. Abrahimi, A. Abdoli Arani, "Effect of strong uniform axial magnetic field on the TE and TM modes fields and injected electron dynamic in the plasma waveguide with Piet Hein cross section", Applied Electromagnetics, vol. 10, No.2, 2023. DOR:20.1001.1.26455153.1401.10.2.11.7 (In Persian)

[24] N. Siahvashi, S. Qaani Gholamhosseini, "Comparison of Combined Beam Quality Metrics in the Coherent Beam Combination of Lasers", Applied Electromagnetics, vol. 12, No.1, 2024, DOR:20.1001.1.26455153.1403.12.1.4.2 (In Persian)