

Theoretical study of hole structure and core size on the gap-map of hollow-core photonic crystal fiber

M. Karimi *

* Assistant Professor, Photonic and Quantum Technology Research School, Institute of Nuclear Science and Technology, AEOI, Tehran, Iran

(Received: 20/12/2021; Accepted: 09/04/2022)

Abstract

Light propagating in the hollow-core photonic crystal fiber is based on the photonic band-gap (PBG) structures. Triangular and honeycomb structures are sub-structure of the alternating hexagonal structure. In this paper, several geometric factors such as structure type, air-filling factor, and core size, are investigated and compared on the gap map of triangular and honeycomb photonic crystal fiber. The basic configuration has a cylindrical shape with an air-hole in the silica surroundings. The propagation beam is assumed to have hybrid mode polarization. Simulation of triangular and honeycomb structures in three dimensions has been shown that there is no band-gap structure for longitudinal transverse modes. The assumed input energy exhibits in the C band. The geometrical parameters include lattice period, air-filling factor considers to have the same values in both structures so that the structures are comparable. The results of this paper have been performed using R-soft photonic band-gap software.

Keywords: Triangular structure, honeycomb structure, hollow-core photonic crystal fiber, R-soft software.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



* Corresponding author E-mail: Mykarimi@aeoi.org.ir

بررسی نظری تأثیر شکل ساختار و اندازه مغزی در گاف نواری فیبرهای کریستال فوتونی با

مغزی تهی

مریم کریمی

استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰)

چکیده

در فیبرهای کریستال فوتونی با مغزی تهی، هدایت پرتو بر اساس وجود گاف‌های نواری صورت می‌گیرد. دو ساختار شانه عسلی و مثلثی زیر مجموعه ساختارهای متناوب سه‌گوش است. در این مقاله تأثیر شکل ساختار، کسر پرشدگی هوا و اندازه مغزی بر گاف نواری فیبرهای مغزی تهی با دو ساختار مثلثی و شانه عسلی بررسی و با هم مقایسه شده است. پایه ساختار استوانه‌ای با میله‌های هوا در محیط سیلیکایی در نظر گرفته شده است. مد انتقالی دارای قطبش مد هیبرید است. شبیه‌سازی ساختارهای مثلثی و شانه عسلی در سه بعد نشان می‌دهد که گاف نواری برای مد‌های عرضی وجود ندارد. باند انتقال انرژی در محدوده باند C است و کلیه مشخصات هر دو ساختار شامل ثابت شبکه، کسر پرشدگی و فاصله بین دو حفره در شبیه‌سازی یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج این مقاله با استفاده از نرم‌افزار آرسافت ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: ساختار مثلثی، ساختار شانه عسلی، فیبر کریستال فوتونی مغزی تهی، نرم‌افزار آرسافت

۱- مقدمه

فیبرهای نوری معمولی دارند. دومین نوع، فیبرهای گاف انرژی هستند و انقلابی را در صنعت فیبرهای نوری ایجاد کرده‌اند. هدایت نور در فیبرهای گاف انرژی بر اساس وجود گاف‌های نواری انجام می‌شود [۶]. انتقال پرتو در فیبرهای کریستال فوتونی نوع گاف انرژی، پتانسیل لازم برای غلبه بر برخی محدودیت‌های فیبرهای مغزی پر را ایجاد کرده است. به‌عنوان مثال، تلفات انتقال، تأخیر در انتقال داده و اثرات غیرخطی در این فیبرها کمتر و آستانه تخریب بالاتری نسبت به فیبرهای مغزی پر دارد [۷ و ۸]. فیبرهای مغزی تهی زیر مجموعه فیبرهای گاف انرژی هستند که شامل فیبرهای براگ و فیبرهای کریستال فوتونی ریزساختار هستند. شایان ذکر است که فیبرهای گاف انرژی الزاماً مغزی تهی نیستند بلکه می‌توان ساختارهایی از فیبرهای کریستال فوتونی با مغزی پر ایجاد کرد که بتوان در آن گاف‌های انرژی را ایجاد کرد [۹]. کاربردهای فیبرهای گاف انرژی مغزی تهی شامل موارد زیر است:

محیط شتابگر ذرات (برای پرتودرمانی و تحقیقات در خصوص ذرات بنیادی) [۱۰ و ۱۱]، انتقال پرتو فروسرخ به داخل نسوج بدن برای درمان سرطان یا سوزاندن بافت زائد با استفاده از پرتو لیزر پرتوان CO₂ (در محدوده طول‌موج یک میکرون) [۱۲]، انتقال‌دهنده پرتو X (با کاربرد پزشکی و درمان تومورها) [۱۳] و [۱۴]، و کاربردهای نظامی برای انتقال امواج تراهرتز [۱۵ و ۱۶]، و تکنولوژی فناوری کوانتومی (حافظه‌های کوانتومی)، مطالعات اپتیک غیرخطی (تحقیقات بنیادی) و هدایت مد‌های گشتاور

کریستال‌های فوتونی ساختارهای متناوب دی‌الکتریک هستند که برای محدود کردن انتشار امواج الکترومغناطیس از یک دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱ و ۲]. به‌عبارت‌دیگر کریستال‌های فوتونی پرتو نوری را در مد حجمی کوچک با کیفیت بالا انتقال می‌دهند [۳]. کریستال‌های فوتونی دوبعدی ساختارهای تناوبی هستند که در یک صفحه دی‌الکتریک حفره‌هایی با ساختارهای منظم ایجاد کرده‌اند. در چنین ساختارهایی با ایجاد نقص در شبکه می‌توان پرتو نوری را محدود و کنترل کرد. بلورهای فوتونی برای اولین بار توسط ریلی^۱ در سال ۱۸۸۷، در ساختار یک‌بعدی معرفی شدند. مفهوم گاف انرژی در کریستال‌های فوتونی توسط یابلونویچ^۲ و جان^۳ در سال ۱۹۸۷ در دو، و سه بعد ارائه شد [۲].

فیبرهای کریستال فوتونی بر اساس اصول هدایت نور به دو دسته فیبرهای ریزساختار^۴ یا فیبرهای حفره‌دار^۵، و فیبرهای گاف انرژی^۶ تقسیم می‌شوند. در فیبرهای حفره‌دار با مغزی پر هدایت نور مشابه فیبرهای نوری معمولی است [۴]، که همان انعکاس کلی داخلی نور در فیبر است [۵]. بنابراین، کاربردهای مشابه با

* رایانامه نویسنده مسئول: Mykarimi@aeoi.org.ir

¹ Rayleigh

² Yablouovich

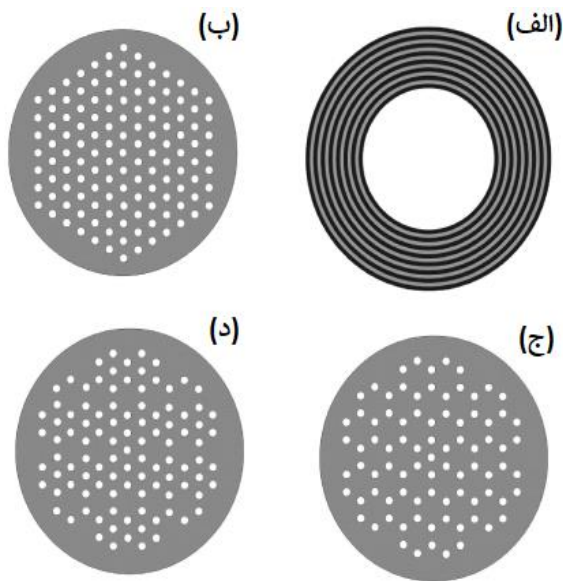
³ John

⁴ Index-guiding Microstructured Fibers

⁵ Holey Fibers: HF

⁶ Photonic Bandgap Fibers: PBF





شکل (۱). فیبرهای گاف انرژی مغزی مختلف با مغزی تهی، الف- فیبر براگ، ب- فیبر مثلثی، ج- فیبر شانه عسلی، [۳۲] د- کاگومی [۳۳].

۲- فیبر کریستال فوتونی با ساختار مثلثی

فیبرهای گاف انرژی مغزی تهی با ساختار مثلثی (سه‌ضلعی) اولین و پرکاربردترین ساختار فیبرهای گاف انرژی است. مراحل تولید و ساخت فیبرهای کریستال فوتونی با شبکه سه‌گوش در مقایسه به مراحل تولید چنین فیبرهایی با ساختار متفاوت ساده‌تر است، بنابراین این ساختار از دیدگاه صنعتی دارای اهمیت به‌سزایی است [۱۱]. امروزه فیبرهای کریستال فوتونی با ساختار سه‌گوش به‌صورت تجاری در بازار دنیا ارائه می‌شود. شکل (۲)، تصویر سه‌بعدی، یک فیبر مغزی تهی با ساختار سه‌گوش و شش ردیف حفره هوا در اطراف مغزی با ناحیه اول بریلوئن به همراه سلول واحد ارائه شده است. مغزی فیبر با برداشتن هفت عدد حفره هوایی ایجاد شده است.

در این اینجا، برای هر دو ساختار دوره تناوب شبکه $a = 4\mu\text{m}$ (که همان فاصله بین دو حفره Λ است)، اندازه مغزی، $10/5$ میکرون و پرتو انتشاری در محدوده باند C در نظر گرفته شده و ضریب شکست سیلیکا^۷ $1/45$ برای این محدوده طول موجی در نظر گرفته شده است. برای محاسبات تعداد ساختار باند ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است. در این مقاله برای تعیین گاف‌های نواری با انحراف^۸ در بردار انتشار موج با عنوان ثابت انتشار طولی در شرایط مرزی متناوب به دست آمده است [۲۰].

در شبیه‌سازی سه‌بعدی بر خلاف محاسبات در دو بعد پاسخ گاف انرژی برای مدهای TE و TM صفر است. با فرض دوبعدی

زاویه‌ای (تفکیک‌کننده مدها در مخبرات امن) [۱۷] و همچنین ساخت لیزرهای گازی [۱۸].

فیبرهای کریستال فوتونی با ساختار شش‌گوش^۱ به سه دسته شامل شبکه سه‌ضلعی (مثلثی)، شبکه شانه عسلی (لانه‌زنبوری)، و شبکه کاگومی^۲ طبقه‌بندی می‌شوند [۱۹ و ۲۰]. ساختار کاگومی در فیزیک حالت جامد برای مواد مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع ساختار گاف نواری کوچکی نسبت به شبکه سه‌ضلعی دارند. در شکل (۱) این چهار نوع ساختار فیبر کریستال فوتونی گاف انرژی را نشان می‌دهد.

روش‌های محاسباتی در بلورهای فوتونی در حوزه زمان و فرکانس قابل انجام است. روش تفاضل متناهی^۳ و المان محدود^۴ در حوزه زمان دو روشی است که اطلاعات انتشار در گستره طول موج را ارائه می‌کند و زمان محاسباتی بیشتری را طلب می‌کند. روش بسط موج تخت^۵، روش توابع ونیر^۶، چندقطبی‌های متعدد، و تفاضل متناهی و المان محدود در حوزه فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱ و ۲۲].

پیش از طراحی هر افزاره مبتنی بر فیبرهای گاف انرژی باید مشخصات ساختار باند انرژی در فیبر مورد نظر تعیین شود. در این راستا، تحقیقات زیادی برای تعیین ساختارهای نوار انرژی توسط محققین این حوزه با روش‌های عددی یا استفاده از نرم‌افزارها ارائه شده است [۲۳-۳۰]. استفاده از مفاهیم گاف نواری در فیبرهای نوری برای اولین بار توسط راسل در فیبرهای کریستال فوتونی استفاده شد [۴۰]. هر یک از مقالات ساختار محدودی را مورد بررسی قرار داده‌اند. بررسی شبکه سه‌گوش از ساختار شش‌ضلعی این فیبرها به تفصیل در کارهای قبلی نویسنده ارائه شده است [۲۱ و ۲۲]. در مرجع [۲۱] تغییرات گاف انرژی در فیبر کریستال فوتونی با ساختار مثلثی شکل در دو بعد برای مدهای انتشاری TE و TM با استفاده از روش بسط موج تخت محاسبه شد. در این ساختار، گاف نواری برای مد TM وجود ندارد که با نتایج مرجع [۳۱] یکسان است. همچنین نشان دادیم که اندازه گاف انرژی در این نوع شبکه وابسته به کسر پرشدگی هوا است و با افزایش کسر پرشدگی گاف نواری نیز بزرگ‌تر می‌شود. فیبرهای مغزی تهی با ساختار مثلثی اکنون به‌صورت تجاری در بازار عرضه می‌شوند.

¹ Hexagonal lattice

² Kagomé

³ Finite Difference Time Domain: FDTD

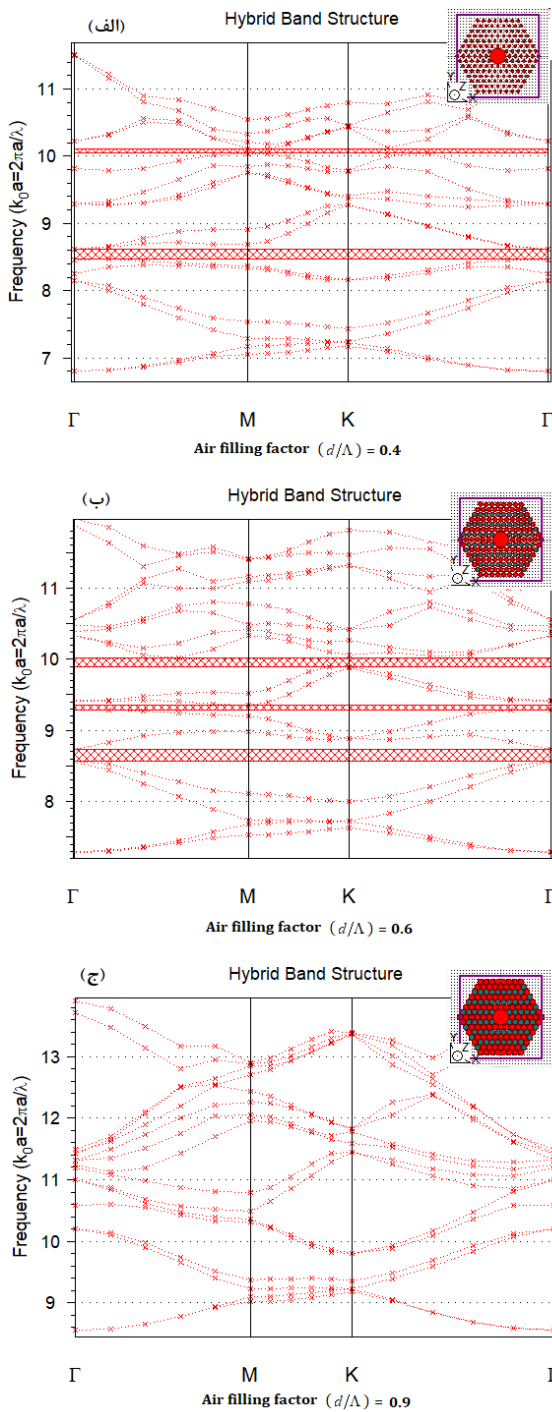
⁴ The finite-Element Time-Domain (FETD or TDFEM)

⁵ Plan Wave Method: PWM

⁶ Wannier function method

⁷ Fused Silica

⁸ Offset

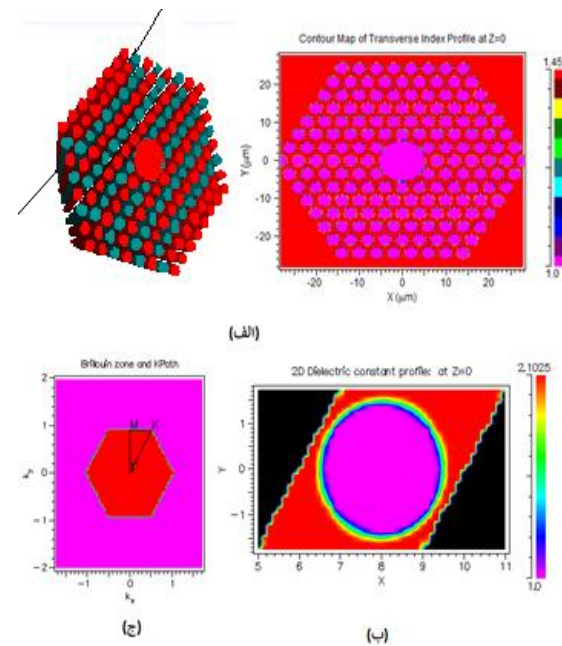


شکل (۳). تغییرات گاف انرژی در یک شبکه با ساختار مثلثی بر حسب افزایش کسر پرشدگی هوا در یک مقدار ثابت Λ ، الف- $d/\Lambda = 0.4$ ، ب- $d/\Lambda = 0.6$ ، ج- $d/\Lambda = 0.9$

در شکل (۳-ج) مشاهده می‌شود که در کسر پرشدگی هوا $d/\Lambda = 0.9$ هیچ گاف نواری وجود ندارد و محیط کاملاً عایق پرتو نوری است. توجه شود که نتایج با تغییر پارامترهای دیگر مانند ثابت شبکه یا تعداد ردیف حفره‌های هوایی کاملاً متفاوت است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ساختار مثلثی بین کسر

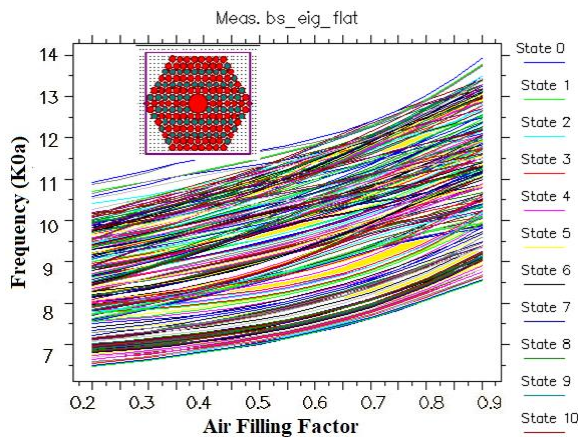
بودن ساختار برای شبکه مثلثی برای ساختار مثلثی دوبعدی گاف انرژی برای مد TE وجود دارد [۲۱، ۳۴ و ۳۹]، درحالی‌که شبیه‌سازی نشان می‌دهد برای این ساختار در سه بعد گاف انرژی برای مد‌های عرضی ایجاد نمی‌شود. توجه شود که در شبیه‌سازی همواره راستای انتشار بر راستای حفره‌ها عمود است. به عبارت دیگر، در سه بعد راستای انتشار در راستای محور فیبر است ولی در دو بعد راستای انتشار عمود بر محور فیبر متصور می‌شود.



شکل (۲). الف- فیبر مغزی تهی با ساختار مثلثی با شش ردیف حفره هوایی در اطراف مغزی در دو، و سه بعد ب- سلول واحد، ج- ناحیه اول بریلوئن.

در شکل (۳)، تغییرات نوارهای انرژی، در یک شبکه با ساختار مثلثی با شش ردیف حفره هوا اطراف مغزی، برای سه مقدار مختلف $0.4, 0.6, 0.9$ و کسر پرشدگی هوا و یک مقدار ثابت Λ شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که از شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، در کسر پرشدگی هوای 0.4 دو گاف نواری در ساختار ترازهای انرژی مشاهده می‌شود. برای تعیین پهنای باند نواری از روی شکل، با استفاده از $\Delta\lambda = c \cdot \Delta f / f^2$ و جایگزاری مقادیر حاصل از روی شکل‌ها می‌توان پهنای باند نوارها را به دست آورد. در شکل (۳-الف)، پهنای نوار اصلی تقریباً 50 نانومتر و نوار فرعی دوم در حدود 20 نانومتر است. در شکل (۳-ب)، با افزایش کسر پرشدگی $d/\Lambda = 0.6$ سه گاف نواری در نمودار گاف انرژی ظاهر می‌شود. مکان گاف نواری اصلی تغییر چندانی کرده ولی پهنای آن در حدود چند نانومتر افزایش یافته است.

صرف نظر کرد. این امر دلیل مقبولیت و استفاده از فیبرهای مغزی تهی با ساختار مثلثی در صنعت است. زیرا با استفاده از این ساختار می‌توان پهنای باند باریکی از پرتو را انتخاب و در شبکه انتقال داد. در مرجع [۱۱]، نشان داده شده است که با افزایش کسر پرشدگی هوا مکان گاف نواری به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شود که با نتایج شکل (۴)، هم‌خوانی دارد. در مرجع [۳۹]، تغییرات پهنای گاف نواری برای بره کریستال فوتونی با ساختار سه‌گوش شبیه‌سازی شده است در این مرجع نشان داده شده که با تغییر کسر پرشدگی هوا پهنای گاف نواری ابتدا افزایش و با افزایش $d/\Lambda = 0.47$ پهنای گاف نواری روند نزولی دارد. نتیجه شبیه‌سازی برای فیبر کریستال فوتونی با ساختار شبکه سه‌گوش در سه‌بعدی نیز همین روند تغییرات را نشان می‌دهد. فقط در اینجا روند شروع کاهش پهنای گاف نواری همان‌طور که در شکل (۴)، مشاهده می‌شود در کسر پرشدگی هوای بزرگ‌تر رخ می‌دهد.



شکل (۴). تغییرات گاف انرژی با کسر پرشدگی هوا در فیبر مغزی تهی با ساختار مثلثی در یک مقدار عددی ثابت Λ .

۲-۱- تأثیر اندازه مغزی و تعداد ردیف‌ها حفره‌های هوایی در گاف نواری فیبر بلور فوتونی مغزی تهی با ساختار سه‌گوش

در این بخش اثر دو عامل اندازه مغزی و تعداد ردیف‌ها حفره‌های هوایی در تغییرات گاف نواری برای فیبرهای بلور فوتونی مغزی تهی با ساختار سه‌گوش و کسر پرشدگی هوا برابر 0.16 بر حسب افزایش اندازه مغزی بررسی و در شکل (۵)، ارائه شده است.

در این مقاله، مقدار $R_{Core} = \sqrt{7} \times Period$; 10.58 برای اندازه مغزی در نظر گرفته شده است. که در آن $Period$ همان ثابت شبکه برابر 4 میکرون است. همان‌طور که از شکل (۵)، مشاهده می‌شود بدون توجه به تعداد لایه‌ها اطراف مغزی، ترازهای انرژی و گاف‌های نواری برای مغزی با مقدار عددی

پرشدگی هوا و پهنای و تعداد گاف‌های نواری رابطه مستقیم و خطی وجود ندارد. بیشینه مقدار عددی پهنای باند در مرجع [۲۰]، برای یک ساختار مثلثی، 150 نانومتر گزارش شده است که دلیل اختلاف با نتایج این مقاله عدم تطابق مقدار عددی مشخصات این دو ساختار است. در مرجع فوق‌الذکر، بازه شبیه‌سازی برای کسر پرشدگی هوا در محدوده $0.1/0.1$ تغییر می‌کرد که به دلیل کوچک بودن بازه رفتار خطی بین کسر پرشدگی هوا و پهنای گاف انرژی گزارش شده بود که به دلیل کوچک بودن بازه بررسی نمی‌تواند ملاکی برای سنجش قرار گیرد.

در مرجع [۳۵]، شبیه‌سازی برای ساختار مثلثی در فیبر کریستال فوتونی، با مشخصات فیبری یکسان شبیه‌سازی شده است. مقادیر کسر پرشدگی هوا 0.2 ، 0.5 و 0.8 فرض شده است. نتایج نشان می‌داد که برای کسر پرشدگی هوای $d/\Lambda = 0.2$ ، هیچ نوع گاف نواری وجود ندارد و برای $d/\Lambda = 0.5$ ، سه گاف نواری و برای کسر پرشدگی هوای $d/\Lambda = 0.8$ فقط یک گاف نواری با پهنای باند باریک ظاهر می‌شود. به عبارت دیگر هر چند رفتار گاف‌های نواری نسبت به کسر پرشدگی غیرخطی است اما نوارهای انرژی به تدریج ظاهر و با افزایش کسر پرشدگی پهن‌تر شده و سپس ناپدید می‌شوند. در مرجع [۳۶]، یک فیبر ساخته شده با ساختار مثلثی و اندازه مغزی 26 میکرون و اندازه حفره $4/4$ میکرون مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. مغزی این ساختار با حذف 19 حفره هوایی ایجاد شده است، پهنای باند تجربی این ساختار 160 نانومتر گزارش شده است. در مرجع [۳۷]، شبیه‌سازی بر فیبر گاف انرژی با نرم‌افزار کامسول انجام شده است. فیبر مورد بررسی دارای ساختار مثلثی، با شش ردیف حفره هوایی، ثابت شبکه 6 میکرون، کسر پرشدگی هوای 0.198 و شعاع مغزی 20 میکرون مد نظر قرار گرفته است.

نتیجه شبیه‌سازی در مرجع [۳۷]، پهنای باند نواری 50 نانومتر را به دست آورده است. بنابراین در مقایسه نتایج کار سایر محققین، می‌توان نتیجه گرفت پهنای باند عبوری در این نوع فیبرها به اندازه و شکل ساختار بستگی دارد و رابطه تغییرات کسر پرشدگی هوا و پهنای باند عبوری رابطه غیر خطی است.

در شکل (۴)، تغییرات گاف انرژی با کسر پرشدگی هوا در فیبر مغزی تهی با ساختار مثلثی و شش‌لایه حفره هوا اطراف مغزی ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در فیبرهای مثلثی با افزایش کسر پرشدگی هوا تعداد نوارها و محل گذار گاف نواری تغییر می‌کند. نوارهای فرعی در کسر پرشدگی هوای 0.16 تا 0.18 ظاهر و با افزایش کسر پرشدگی ناپدید می‌شوند. گاف‌های نواری فرعی دارای پهنای باریکی است و در عمل می‌توان از آنها

مغزی گاف نوار اصلی باریک‌تر شده و گاف‌های نواری فرعی به‌آرامی ناپدید می‌شوند [۳۵]. وجود گاف‌های نواری پراکنده موجب می‌شود انرژی در باندهای مختلف تلف شود که مطلوب نیست بنابراین افزایش تعداد لایه‌ها می‌تواند انرژی را در یک محدوده باریک متمرکز کند.

برای هر تعداد حفره هوا در اطراف مغزی با افزایش شعاع فیبر بیش از R_{Core} اندازه و محل گاف‌های نواری تغییر می‌کند و مکان گاف نواری به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شود. همچنین با بزرگ‌تر شدن شعاع مغزی، گاف نواری اصلی فیبر به تدریج ناپدید می‌شود. در مقایسه سه قسمت از شکل (۵) مشاهده می‌شود که افزایش تعداد لایه‌های حفره‌های هوا در اطراف مغزی باعث می‌شود گاف‌های نواری سریع‌تر بسته شوند و شیب تغییرات نمودار در ناحیه R_{Core} بزرگ‌تر به تعداد لایه‌های حفره هوا اطراف مغزی وابسته است. در شکل (۵-الف)، مشاهده می‌شود برای ناحیه شعاع بزرگ‌تر از R_{Core} نیز تعدادی گاف نوار فرعی وجود دارد که با افزایش تعداد لایه‌ها بموجب می‌شود این گاف‌های نواری فرعی از بین برود.

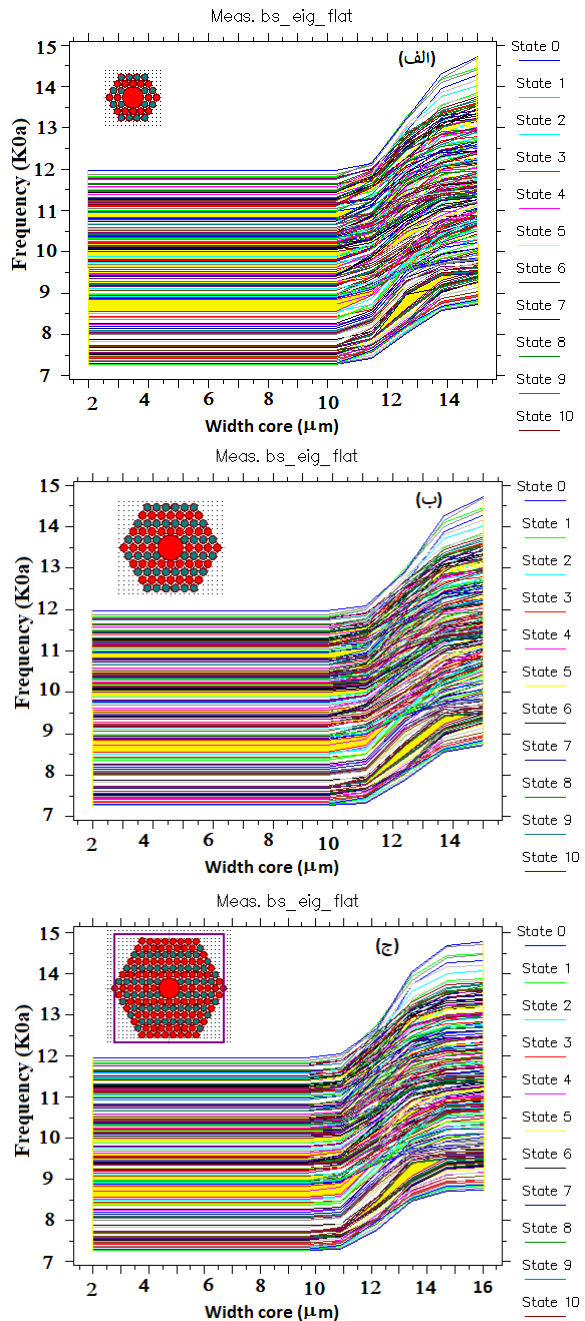
در هر سه حالت گاف نواری در شعاع بزرگ‌تر از ۱۵ میکرون وجود ندارد. در مورد تعداد لایه‌های چهار و شش‌تایی حفره هوا در اطراف مغزی، اندازه گاف نواری در شعاع مغزی ۱۳/۵ میکرون بیشترین مقدار را دارا است [۳۵].

باید توجه کرد که در شبیه‌سازی ساختار در دو بعد مسیر انتشار در صفحه دوبعدی قرار دارد درحالی‌که در شبیه‌سازی سه‌بعدی این مسیر عمود بر سطح مقطع است. در واقعیت مسیر انتشار در فیبر عمود بر سطح مقطع فیبر و در ناحیه نقص شبکه کریستال فوتونی رخ می‌دهد. این امر دلیل آن است که چرا در شبیه‌سازی دوبعدی مدهای عرضی قابل انتشار ولی با شبیه‌سازی در سه بعد عدم انتشار مدهای عرضی را نشان داده می‌شود. بنابراین در عمل انتظار می‌رود که فیبرهای کریستال فوتونی با هر نوع ساختاری اجازه عبور مدهای قطبیده عرضی را به پرتو فرودی ندهند و فقط مدهای هیبرید قادر به انتشار در این نوع فیبرها را باشند. شایان ذکر است مدهای هیبرید ترکیبی از مدهای عرضی با قطبش‌های عمود بر هم است.

۳- فیبر کریستال فوتونی با ساختار شانه عسلی

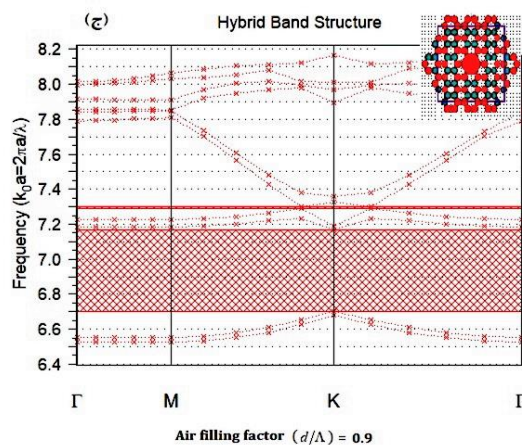
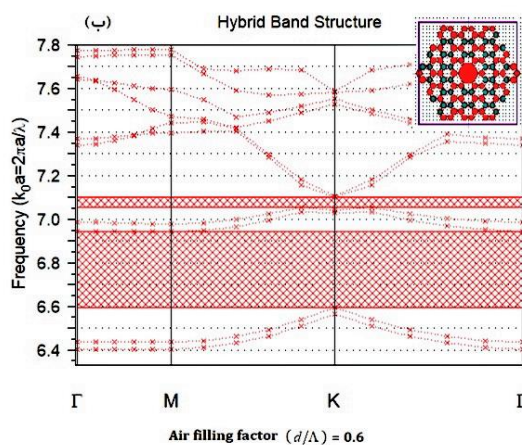
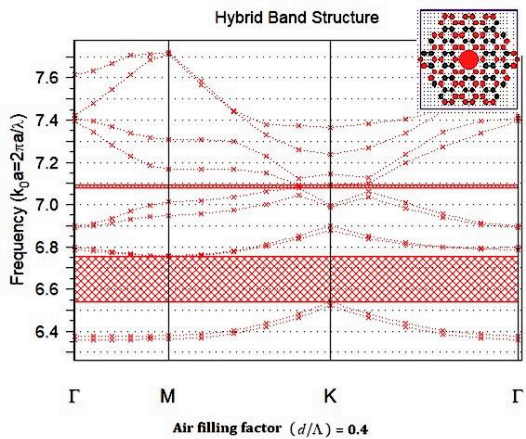
شبکه شانه عسلی نزدیک‌ترین ساختار به شبکه سه‌گوش است که با پر کردن یک حفره در ساختار شبکه مثلثی ایجاد می‌شود [۴۱]. به دلیل شباهت‌های زیاد در ساختار و محاسبات مربوطه در این مقاله سعی شده است که مقایسه کاملی در نتایج گاف نواری این دو ساختار در سه بعد انجام شود. در شکل (۶)، یک فیبر مغزی

R_{Core} تغییراتی ندارند. همچنین برای اندازه شعاع کوچک‌تر از R_{Core} تعداد حفره‌ها تأثیر چندانی در محل گاف‌های نواری ندارد و فقط برای دو ردیف حفره هوا اطراف مغزی گاف نواری اصلی پهن تر است.



شکل (۵). تغییرات گاف نواری برای فیبرهای بلور فوتونی مغزی تهی با ساختار مثلثی با شش لایه حفره هوا اطراف مغزی و کسر پرشدگی هوای برابر ۰/۱۶ بر حسب افزایش اندازه مغزی، الف-دولایه، ب-چهارلایه، ج-شش ردیف حفره هوا اطراف مغزی.

در مقایسه گاف‌های نواری برای تعداد لایه‌های مختلف هوایی در شکل (۵)، مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لایه‌ها اطراف

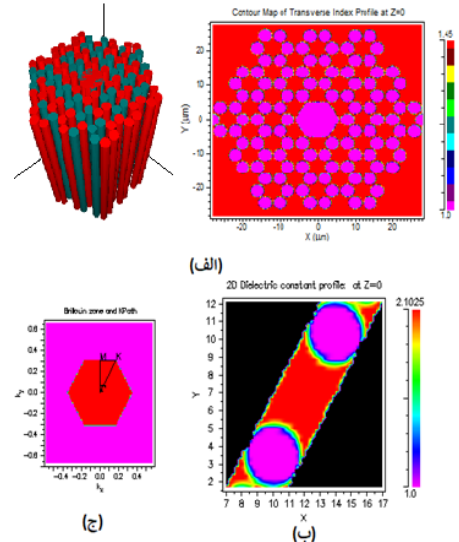


شکل (۷). تغییرات گاف انرژی در یک شبکه با ساختار شانه

عسلی بر حسب افزایش کسر پرشدگی هوا در یک مقدار ثابت Λ ، الف- $d/\Lambda = 0.4$ ، ب- $d/\Lambda = 0.6$ ، ج- $d/\Lambda = 0.9$.

در مرجع [۳۹]، گاف نواری این شبکه برای مقدار 0.2 انجام شده است که برای این مقدار کسر پرشدگی هیچ گاف نواری وجود نداشت. با افزایش کسر پرشدگی گاف نواری اصلی به تدریج پهن تر شده و فرکانس مرکزی آن نیز به سمت فرکانس های بالاتر سوق می یابد. در شکل های (۷-ب و ج) مشاهده می شود که،

تهی با ساختار شانه عسلی (لانه زنبوری) و شش ردیف حفره هوایی در اطراف مغزی و ناحیه اول بریلوئن به همراه سلول واحد نمایش داده شده است.



شکل (۶). الف- فیبر مغزی تهی با ساختار لانه زنبوری با شش ردیف حفره هوایی در اطراف مغزی در دو و سه بعد ب- سلول واحد، ج- ناحیه اول بریلوئن.

مشخصات دوره تناوب شبکه، اندازه مغزی، نوع ماده و طول موج انتقالی همگی مشابه و یکسان با ساختار مثلثی در نظر گرفته شده است. در مقایسه شکل های (۲ و ۶) مشاهده می شود که در ساختار سه گوش، سلول واحد فقط دارای یک حفره هوا است، ولی در ساختار لانه زنبوری، سلول واحد شامل دو حفره هوایی است. سلول واحد عبارت است از کوچک ترین بخش از شبکه که با تکرار آن می توان شبکه را ایجاد کرد. توجه شود که انتخاب صحیح سلول واحد در تعیین مناطق بریلوئن که به ثابت شبکه وابسته است تأثیر می گذارد و این خود در محاسبات گاف های انرژی اثرگذار است.

شکل (۷)، تغییرات گاف انرژی در یک شبکه شانه عسلی با افزایش کسر پرشدگی هوا در یک مقدار ثابت Λ و سه مقدار عددی مختلف کسر پرشدگی هوا با شش ردیف حفره هوا اطراف مغزی را نشان می دهد.

همان طور که از شکل (۷) مشاهده می شود برای تمام مقادیر کسر پرشدگی انتخابی در این مقاله دو گاف نواری مشاهده می شود. در شکل (۷-الف)، برای $d/\Lambda = 0.4$ گاف نواری اصلی دارای پهنای 81 نانومتر و گاف نواری فرعی که در بالای گاف اصلی قرار دارد دارای پهنای در حدود 5 نانومتر است که به دلیل باریک بودن می توان از آن صرف نظر کرد.

می‌شود که نمی‌توان از این فیبر به‌عنوان افزاره انتخاب‌گر فرکانس خاصی استفاده کرد.

در مرجع [۳۸]، دو ساختار مثلثی و شانه عسلی در محیط تشکیل شده از Ge در محیط فوتونیک کریستال با سطح مقطع مربعی در دو بعد برای دو مد TE و TM بررسی شده است. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد در محیط ژرمانیوم نیز گاف‌های نواری در شبکه دوبعدی با ساختار شانه عسلی پهن‌تر و تعداد گاف‌های نواری نیز بیشتر است. در این مقاله ساختار پایه از آنجاکه محیط فیبر است (در سه بعد استوانه و در مقطع دوبعدی دایروی بررسی شده است) با مقایسه نتایج این مقاله با مرجع [۳۸]، مشاهده می‌شود ساختار شانه عسلی بدون توجه به دوبعدی یا سه‌بعدی در نظر گرفتن ساختار، دارای گاف نواری پهن‌تر است. نتایج شبیه‌سازی با روش بسط موج تخت در مرجع [۲۱]، که در دو بعد برای فیبر کریستال فوتونی با ساختار مثلثی انجام شده نشان می‌دهد که اندازه گاف نواری با افزایش کسر پرشدگی هوا زیاد می‌شود ولی تعداد گاف‌های نواری تغییر نمی‌کند.

۳-۱- تأثیر اندازه مغزی و تعداد ردیف‌ها حفره‌های هوایی در گاف نواری فیبر بلور فوتونی مغزی تهی با ساختار لانه‌زنبوری

در شکل (۹)، تغییرات گاف نواری برای فیبرهای بلور فوتونی مغزی تهی با ساختار لانه‌زنبوری با شش‌لایه حفره هوا اطراف مغزی و کسر پرشدگی هوا $0/6$ بر حسب افزایش اندازه مغزی برای تعداد لایه‌های مختلف هوا در اطراف مغزی ارائه شده است. در شکل (۹-الف)، مشاهده می‌شود برای این نوع فیبر با دولایه حفره هوا اطراف مغزی، اندازه مغزی هیچ تأثیری در تعداد و اندازه گاف‌های نواری در این ساختار ایجاد نمی‌کند.

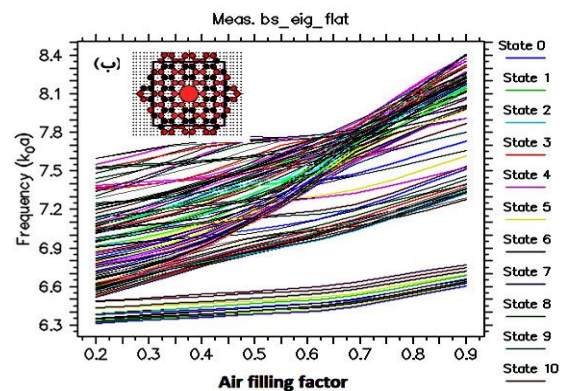
در مقایسه این ساختار با دو ردیف حفره در ساختار مثلثی در شکل (۵-الف) و (۹-الف) ملاحظه می‌شود که هر چند در ساختار مثلثی تعداد نوارهای فرعی برای لایه‌های کم حفره هوایی وجود دارد ولی چنین باند گذار پهنی ایجاد نمی‌شود. در این حالت گاف نواری فرعی نسبتاً بزرگ است و عملاً چنین فیبری برای انتقال پرتو کاربردی ندارد. بنابراین ساختار لانه‌زنبوری با دولایه حفره هوا اطراف مغزی یک ساختار کاربردی نیست و باید کنار گذاشته شود. در شکل (۹-ب)، تغییرات گاف نواری بر حسب شعاع مغزی برای ساختار لانه‌زنبوری فیبر با چهارلایه حفره هوا در اطراف مغزی ارائه شده است. برای اندازه مغزی کوچک‌تر از R_{Core} ، تغییری در اندازه، تعداد، و مکان گاف‌های نواری مشاهده نمی‌شود.

روند این تغییرات مشابه فیبر مغزی تهی با ساختار سه‌گوش است. برای شعاع مغزی بزرگ‌تر از R_{Core} مشاهده می‌شود که

گاف نواری فرعی با افزایش کسر پرشدگی تا حدودی پهن‌تر شده و سپس پهنای آن کم می‌شود.

برای کسر پرشدگی $0/9$ ، پهنای باند گاف نواری به 165 نانومتر افزایش می‌یابد. افزایش زیاد پهنای باند نواری انتخاب ناحیه طول موج گذار باریک را ناممکن می‌سازد و استفاده از این نوع ساختار فیبرهای مغزی تهی باید در انتخاب کسر پرشدگی هوا دقت لازم به عمل آید. مطابق آنچه که در ساختار با شبکه سه‌گوش نیز مشاهده شد تغییرات پهنای باند نواری یک تابع خطی نیست و می‌توان منحنی درجه دوم با تقعر منفی را برای تغییرات پهنای گاف نواری بر حسب کسر پرشدگی هوا متصور شد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد چنین منحنی درجه دومی را برای تغییرات پهنای گاف نواری فرعی در ساختار با شبکه شانه عسلی نیز می‌توان متصور شد. نتایج این تحقیق با مرجع [۳۹] هم‌خوانی دارد.

در شکل (۸)، تغییرات گاف انرژی با کسر پرشدگی هوا در فیبر مغزی تهی با ساختار لانه‌زنبوری و شش‌لایه حفره هوا اطراف مغزی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در فیبرهای لانه‌زنبوری ایجاد گاف نواری از $d/\Lambda > 0.2$ شروع می‌شود. برای کسر پرشدگی $0.2 < d/\Lambda < 0.4$ ، در شکل مشاهده می‌شود که گاف‌های نواری فرعی متعددی وجود دارد. با افزایش کسر پرشدگی، نوارهای فرعی ناپدید شده و یک گاف نواری اصلی و چندین گاف نواری فرعی ایجاد شده است. که پهنای گاف نواری اصلی با افزایش کسر پرشدگی به سرعت افزایش می‌یابد.



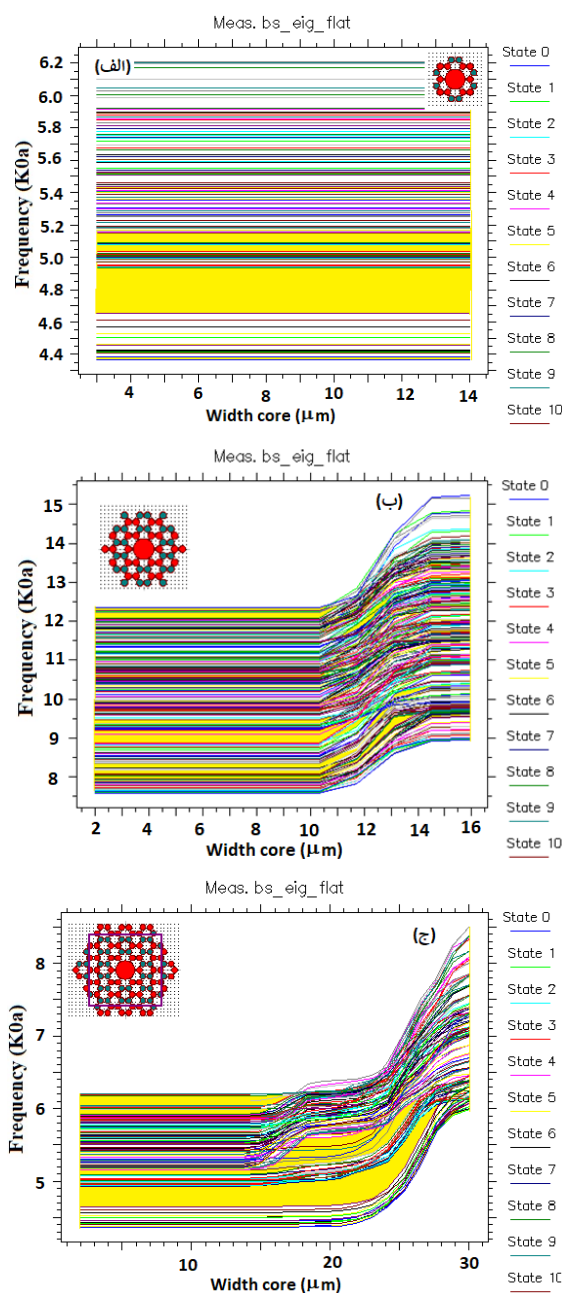
شکل (۸)، تغییرات گاف انرژی با کسر پرشدگی هوا در فیبر مغزی تهی با ساختار لانه‌زنبوری در یک مقدار عددی ثابت Λ .

در مقایسه گاف نواری در فیبرهای با ساختار مثلثی و شانه عسلی مشاهده می‌شود که گاف نواری در فیبرهای با ساختار شانه عسلی بسیار پهن‌تر است با افزایش کسر پرشدگی هوا یا به عبارتی با بزرگ‌تر شدن حفره‌ها در یک Λ ثابت این پهن‌شدگی افزایش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر در فیبرهای مغزی تهی با ساختار شانه عسلی با افزایش کسر پرشدگی هوا گاف نواری چنان پهن

در مقایسه فیبر مغزی تهی با ساختار سه مثلثی مشاهده می‌شود که در بازه شعاعی مشخص فیبر با ساختار سه‌گوش فقط یک گاف نواری دارد که می‌توان به‌عنوان فیبر تک مد استفاده کرد. به همین دلیل است که فیبر مغزی تهی با ساختار سه‌گوش به‌عنوان موجب به‌صورت تجاری عرضه می‌شود. همچنین با افزایش اندازه مغزی در هر دو ساختار پهنای گاف نواری در ابتدا افزایش و سپس روند نزولی دارد. این مورد در فیبر با ساختار شبکه شانه عسلی و دولایه حفره هوا در اطراف مغزی صدق نمی‌کند. این روند تغییرات غیر خطی مشابه روند تغییرات پهنای گاف نواری با افزایش کسر پرشدگی هواست. برای این روند تغییرات می‌توان یک منحنی درجه دوم با تقعر منفی را برازش کرد. مطابق نتایج شکل‌های (۴ و ۵) در ساختار شبکه سه‌گوش و شکل‌های (۸ و ۹) در ساختار شبکه شانه عسلی مکان گاف نواری هم با افزایش کسر پرشدگی هوا و افزایش اندازه مغزی به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شود. این مورد در ساختار شانه عسلی و دولایه حفره هوا در اطراف مغزی مطابقت ندارد و اندازه و مکان گاف نواری طبق شکل (۸-الف) مقداری ثابت است. عدم تطابق از تغییرات در ساختار شانه عسلی با دولایه حفره هوا نشان می‌دهد که برای ایجاد ساختار شانه عسلی حداقل باید سه‌لایه حفره در اطراف مغزی (نقص شبکه) وجود داشته باشد تا بتوان این شبکه را در مجموعه ساختار خاصی گنجانند.

در شکل (۹-ج)، تغییرات گاف نواری بر حسب شعاع مغزی برای این ساختار فیبر با شش‌لایه حفره هوا در اطراف مغزی ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌ها تعداد گاف‌های نواری و همچنین پهنای آن افزایش می‌یابد. درحالی‌که با همین تعداد ردیف حفره هوایی در اطراف مغزی با ساختار مثلثی موجب حذف نوارهای فرعی می‌شود. این نشان می‌دهد افزایش تعداد لایه‌ها برای ساختار لانه‌زنبوری شرایط انتقال پرتو در بازه باریک را از بین می‌برد. برای مغزی کوچکتر از R_{Core} چندین گاف نواری وجود دارد. این بدان مفهوم است که قسمت عمده پرتو از موجب با ساختار مذکور از فیبر عبور می‌کند و عملاً انتخاب باند گذار در این ساختار صورت نمی‌گیرد. برای اندازه مغزی بزرگتر از R_{Core} دو باند گذار پهن در نمودار ترازهای انرژی مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه مغزی این دو باند گذار به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابد. همچنین پهنای این دو باند گذار وابسته به اندازه مغزی است. برای مغزی بزرگتر از ۲۸ میکرون باندهای گذار کاملاً حذف شده و فیبر به‌صورت عایق در این ناحیه طول موجی عمل می‌کند.

برخی از گاف‌های نواری فرعی حذف می‌شوند. در این ناحیه شعاع مغزی نیز مشابه فیبر با ساختار مثلثی، مکان و پهنای گاف نواری با بزرگ‌تر شدن شعاع مغزی تغییر می‌کند. برای شعاع مغزی بزرگتر از ۱۴ میکرون گاف نواری اصلی وجود ندارد و فقط تعدادی نوار فرعی وجود دارد که عملاً نمی‌توان برای انتقال پرتو مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین فیبر مغزی تهی با ساختار لانه‌زنبوری و شعاع مغزی بزرگتر از ۱۴ میکرون قابل استفاده نیست.



شکل (۹). تغییرات گاف نواری برای فیبرهای بلور فوتونی مغزی تهی با ساختار لانه‌زنبوری با شش‌لایه حفره هوا اطراف مغزی و کسر پرشدگی هوا برابر ۰/۶ بر حسب اندازه مغزی، الف-دولایه، ب-چهارلایه، ج-شش‌لایه حفره هوا اطراف مغزی.

۴- نتیجه گیری

مغزی یا کسر پرشدگی هوا تأثیر کمتری در پهنای باند عبور و ناحیه انتقال پرتو دارد. کلیه شبیه‌سازی‌ها در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار آرسافت انجام شده است.

این تحقیق توسط پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای بر اساس کد پروژه به شماره PRI-L1-98-003 پشتیبانی شده است.

۵- مراجع

- [1] X. L. Yang, L. Z. Cai and Q. Liu, "Theoretical bandgap modeling of two-dimensional triangular photonic crystals formed by interference technique of three noncoplanar beams", *Opt. express.*, Vol. 11, pp. 1050-1055, 2003.
- [2] C. Y. Kao, S. Osher, E. Yablonovitch, "maximizing band gaps in two-dimensional photonic crystal by using level set methods", *App. Phys. B.*, Vol. 81, pp. 235-244, 2005.
- [3] F. Wen, S. David, X. Checoury, M. E. Kurdi, P. Boucaud, "Two-dimensional photonic crystals with large complete photonic band gaps in both TE and TM polarizations", *Opt. Express.*, Vol. 16, pp. 12278-12289, 2008.
- [4] M. Karimi, "Analysis of Photonic Crystal fibers Using Finite Difference Frequency Domain Method", *J. App. Electromagnet.*, Vol. 1, pp. 33-42, 2018.
- [5] M. Midrio, M. P. Singh, and C. G. Someda, "The Space Filling Mode of Holey Fibers: An Analytical Vectorial Solution", *IEEE J. Lighthwave. Technol.*, Vol. 18, pp. 1031-1037, 2000.
- [6] A. Bjarklev, J. Broeng, and A. S. Bjarklev, "Photonic crystal fibers", *Kluwer Academic Publishers*, London, 2003.
- [7] F. Poletti, M. N. Petrovich, and D. J. Richardson, "Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications", *Nanophotonics*, Vol. 2, pp 3-5, 2013.
- [8] M. J. Li, J. A. West, and K. W. Koch, "Modeling Effects of Structural Distortions on Air-Core Photonic Bandgap Fibers", *J. Lightwave. Technol.*, Vol. 25, pp. 2463-2468, 2007.
- [9] V. Pureur, A. Bétourné, G. Bouwmans, L. Bigot, A. Kudlinski, K. Delplace, A. L. Rouge, Y. Quiquempois, and M. Douay, "Overview on Solid Core Photonic BandGap Fibers", *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 28, pp.27-50, 2009.
- [10] X. E. Lin, "Photonic band gap fiber accelerator", *Phys.Rev. Special. Top. Accelerators and Beams*, Vol. 4, pp. 051301-1: 7, 2001.
- [11] - F. BENABID, "Hollow-core photonic bandgap fibre: new light guidance for new science and technology", *Phil. Trans. R. Soc. A*, Vol. 364, pp. 3439-3462, 2006.
- [12] S. R. Sandoghchi; G. T. Jasion; N. V. Wheeler; J. P. Wooler; R. P. Boardman; N. Baddela; Y. Chen, J. Hayes, E. Numkam Fokoua, T. Bradley, D. R. Gray, S. M. Mousavi, M. Petrovich, F. Poletti, D. J. Richardson, "X-ray tomography for structural analysis of microstructured optical fibres and preforms", in

در این مقاله نتایج شبیه‌سازی گاف نواری در فیبر کریستال فوتونی با مغزی تهی و دو ساختار مثلثی و شانه عسلی بررسی و با هم مقایسه شد. در شبیه‌سازی سه‌بعدی ساختار مثلثی و شانه عسلی هیچ نوع گاف نواری برای مدهای عرضی حاصل نمی‌شود در حالی که در نمایش دوبعدی ساختار مثلثی گاف نواری برای مد TE و برای ساختار شانه عسلی دارای گاف نواری در مد TM بود. در شبیه‌سازی مقادیر عددی مشخصات شامل ثابت شبکه، کسر پرشدگی هوا و اندازه مغزی یکسان در نظر گرفته شد. در این مقاله نشان داده شد که برای هر دو ساختار مثلثی و شانه عسلی، ارتباط خطی بین کسر پرشدگی هوا و تعداد و پهنای گاف‌های نواری وجود ندارد. در فیبرهای شانه عسلی، برای کسر پرشدگی هوا بیش از $d/\Lambda = 0.5$ ، گاف نواری به گونه‌ای پهن شود که عملاً پهنای باند وسیعی از پرتو را از خود عبور دهد. به همین دلیل در کاربردهای که نیاز به انتخاب بازه عبوری محدود هستیم، عملاً فیبرهای مغزی تهی با ساختار شانه عسلی کاربردی ندارد و موجب شده عمده استفاده از فیبرهای مغزی تهی با ساختار مثلثی در صنعت صورت می‌گیرد. همچنین تأثیر اندازه مغزی در گاف نواری این دو ساختار از فیبر مغزی تهی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که در فیبر با ساختار مثلثی می‌توان اندازه مغزی را تا حدود ۱۰ میکرون افزایش داد در حالی که در نتیجه گاف‌های نواری تأثیر نداشته باشد. در فیبر مغزی تهی با ساختار شانه عسلی می‌توان اندازه مغزی را تا ۱۵ میکرون بدون آنکه تأثیری در گاف نواری داشته باشد تغییر داد. افزایش بیشتر اندازه مغزی موجب جابجایی در ناحیه انتقال پرتو در هر دو ساختار شده و در فیبر با ساختار شانه عسلی، چنان پهنای باند عبوری وسیع می‌شود که نمی‌توان از این فیبر با این ساختار به عنوان انتخاب کننده بازه فرکانسی استفاده کرد. در هر دو ساختار با افزایش تعداد ردیف‌های حفره هوایی در اطراف مغزی موجب می‌شد که برای ناحیه شعاع مغزی بزرگ‌تر از R_{Core} ، روند تغییر و جابجایی گاف انرژی به سمت فرکانس‌های بالاتر با شیب سرعتی انجام شود.

در این مقاله نشان داده شد با افزایش تعداد ردیف‌های حفره هوا در اطراف مغزی در ساختار مثلثی باعث حذف نوارهای فرعی و در نتیجه انتقال انرژی در یک باند خاص می‌شود. افزایش تعداد ردیف‌های حفره هوا در ساختار شانه عسلی بیش از چهار ردیف موجب می‌شود که پهنای باند نواری چنان افزایش یابد که نتوان از این فیبرها به‌عنوان انتخاب‌گر محدوده باریک طول موجی استفاده کرد. نتایج حاصل از این مقاله دلیل انتخاب فیبرهای مغزی تهی با ساختار مثلثی را در صنعت نمایان می‌کند. زیرا این نوع فیبرها دارای باند باریک انتقال پرتو هستند و افزایش اندازه

- accelerators", 10th Int. Particle Accelerator Conf., pp. 3605-3608, 2019.
- [26] J. Hu, and C. R. Menyuk, "Leakage loss and bandgap analysis in air-core photonic bandgap fiber for non-silica glasses", *Opt. Express.*, Vol. 15, pp. 339-349, 2006.
- [27] M. Skorobogatiy, "Microstructured and Photonic Bandgap Fibers for Applications in the Resonant Bio-and Chemical Sensors", *J. sensor*, Article ID 524237, 2009.
- [28] M. Yan, P. Shum, and J. Hu, "Design of air-guiding honeycomb photonic bandgap fiber", *Opt. Lett.*, Vol. 30, pp. 465-467, 2005.
- [29] A. V. Dyogtyev, I. A. Sukhoivanov, and R. M. De La Rue, "Photonic band-gap maps for different two dimensionally periodic photonic crystal structures", *J. App. Phys.*, Vol. 107, pp. 013108-1: 7, 2010.
- [30] K. Xie, W. Zhang, A. D. Boardman, H. Jiang, Z. Hu, Y. Liu, M. Xie, Q. Mao, L. Hu, Q. Li, T. Yang, F. Wen, and E. Wang, "Fiber guiding at the Dirac frequency beyond photonic bandgaps", *Light. Science & Applications*, Vol. 4, pp. e304 (1-8), 2015.
- [31] F. Wen, S. David, X. Checoury, M. E. Kurdi, P. Boucaud, "Two-dimensional photonic crystals with large complete photonic band gaps in both TE and TM polarizations", *Opt. Express.*, Vol. 16, pp. 12278-12289, 2008.
- [32] R. Buczynski, "Photonic Crystal Fibers", *Proceedings of the XXXIII International School of Semiconducting Compounds*, Jaszowiec, Vol. 106, pp. 141-168, 2004.
- [33] R. Gajić, R. Meisels, F. Kuchar, K. Hingerl, "All-angle left-handed negative refraction in Kagomé and honeycomb lattice photonic crystals", *Physic. Rev. B.*, Vol. 73, pp. 165310 (1-6), 2006.
- [34] R. J. Noble, J. E. Spencer, and B. T. Kuhlmeiy, "Hollow-core photonic band gap fibers for particle acceleration", *Phys. Rev. Special Top. Accelerators and beams*, Vol. 14, pp. 121303 (1-8), 2011.
- [35] M. Karimi, 2021, "Analysis and simulation of hollow core photonic band gap fibers using finite element method by software and comparison the results with plan wave method.", Final report, PRI-L1-98-003.
- [36] F. Poletti, N. V. Wheeler, M. N. Petrovich, N. Baddela, E. Numkam Fokoua, J. R. Hayes, D. R. Gray, Z. Li, R. Slavík, and D. J. Richardson, "Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum", *Nat. Photonics*, Vol. 7, pp. 279-284, 2013.
- [37] Y. YOU, H. GUO, Y. HAO, Z. WANG, AND Y. G. LIU, "Wideband, large mode field and single vector mode transmission in a 37-cell hollow-core photonic bandgap fiber", *Opt. Express.*, Vol. 29, pp. 24226-24236, 2021.
- [38] F. Aniq Salwa, M. M. Rahman, M. O. Rahman, M. A. M. Chowdhury, "Germanium Based Two-Dimensional Photonic Crystals: The Hexagonal and Honeycomb Lattices", *Opt. and Photon. J.*, Vol. 9, pp. 25-36, 2019.
- [39] R. Hillebrand, W. Hergert, "Band gap studies of triangular 2D photonic crystals with varying pore European Conference on Optical Communication (ECOC), P. 14768224, 2014.
- [13] M. Skorobogatiy, "Microstructured and Photonic Bandgap Fibers for Applications in the Resonant Bio-and Chemical Sensors", *J. sensor*, Article ID 524237, 2009.
- [14] S. R. Sandoghchi, G. T. Jasion, N. V. Wheeler, S. Jain, Z. Lian, J. P. Wooller, R. P. Boardman, N. Baddela, Y. Chen, J. Hayes, E. Numkam Fokoua, T. Bradley, D. R. Gray, S. M. Mousavi, M. Petrovich, F. Poletti, and D. J. Richardson, "X-ray tomography for structural analysis of microstructured and multimaterial optical fibers and preforms", *Opt. Express.*, Vol. 22, pp. 26181-26192, 2014.
- [15] A. Abdallah, "Experimental Study on the Concept of Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber Stethoscope", *International Journal of Optics*, Vol. 4, Article ID 6576397, 2018.
- [16] M. Wang, Y. Yang, L. Xing, Y. Zheng, W. Fan, W. Hu, C. Y. Jia, J. Chen, J. Zhang, T. Chang, H. L. Cui, "Terahertz low-loss hollow-core pipe waveguides", *Opt. Engin.*, Vol. 54, pp. 085106 (1-6), 2015.
- [17] F. Poletti, M. N. Petrovich and D. J. Richardson, "Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications", *J. NanoPhoton.*, Vol. 0042, 2013.
- [18] A. V. Vasudevan Nampoothiri, Andrew M. Jones, C. Fourcade-Dutin, Chenchen Mao, Neda Dadashzadeh, Bastian Baumgart, Y.Y. Wang, M. Alharbi, T. Bradley, Neil Campbell, F. Benabid, Brian R. Washburn, Kristan L. Corwin, and Wolfgang Rudolph, "Hollow-core Optical Fiber Gas Lasers (HOFGLAS): a review [Invited]", *Opt. material. Express*. Vol. 2, pp. 948-961, 2012.
- [19] F. Saifas, G. Feugnet, A. Ravaille, B. t. Debord, F. Gerome, A. Baz, G. Humbert, F. Benabid, S. Schwartz, and F. Bretenaker, "A Test Resonator for Kagome Hollow-Core Photonic Crystal Fibers for Resonant Rotation Sensing", *arXiv:1601.02899v2*, *Phys. Opt.*, 2016.
- [20] M. Yan, X. Yu, P. Shum, C. Lu, and Y. Zhu, "Honeycomb Photonic Bandgap Fiber with a Modified Core Design", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 16, pp. 2051-2053, 2004.
- [21] M. Karimi, "Analysis of Photonic Band-gap Fibers with the Triangular air Hole Structure Using Plane Wave Method", second national conference on advanced research in engineering and applied sciences, university of ayatollah ozma broujerdi, broujerd, Iran, P. 1820239, 2020.
- [22] M. Karimi, 2019, "Design and feasibility study of optical waveguide for beam transition for infrared interferometer", Final report, FRI-F4-96-002.
- [23] y. li, c. wang, x. lu, m. hu, y. chen, b. liu, and l. chai, "Bandgap properties of Kagome photonic crystal fibers", *Appl. Phys. B*, Vol. 86, pp. 235-242, 2007.
- [24] L Vincetti, M. Maini, F. Poli, A. Cucinotta, and S. Selleri, "Numerical analysis of hollow core photonic band gap fibers with modified honeycomb lattice", *Opt. and Quant. Electron.* Vol. 38, pp-903-912, 2006.
- [25] L. Genovese, F. Lemery, M. Kellermeier, F. Mayet, W. Kuropka, U. Dorda, R. Assmann, "Tolerance studies and limitations for photonic bandgap fiber

- [41] J. -K. Yang, Y. Hwang, and S. S. Oh, "Evolution of topological edge modes from honeycomb photonic crystals to triangular-lattice photonic crystals", *Phys. Rev. Research.*, Vol 3, pp. 1022025-1: 7, 2021.
- roundness", *Solid State Communications*, Vol. 115, pp. 227-232, 2000.
- [40] J. h. Chen, Y. f. Xiong, F. Xu, and Y. q. Lu, "Silica optical fiber integrated with two-dimensional materials: towards opto-electro-mechanical technology", *Science & Applications*, Vol. 10: 78, 2021.