

مجله فیزیک کاربردی دانشگاه الزهرا (س)

شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۲

## بررسی تاثیر پارامترهای ساختاری روی ضریب تحدید نوری و ناحیه تک مدی تارهای نوری ریز ساختار: MOF7 و MOF3، MOF1

خدیدجه سلیمانی اقدم<sup>۱</sup>

فاطمه شهشانی<sup>۲</sup>

مهناز عساری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۴/۱۳

تاریخ تصویب: ۹۱/۱۱/۹

### چکیده

در این مقاله وابستگی ناحیه تک مدی تارهای نوری ریز ساختار سیلیکا-هوا به پارامترهای ساختار از جمله قطر حفره ها  $d$ ، و فاصله تناوبی حفره ها،  $A$  به طور تئوری بررسی شده است. محاسبات بر اساس روش ضریب شکست مؤثر اسکالر برای سه نوع تار نوری ریز ساختار که مغزی آنها به ترتیب از حذف یک، سه و هفت حفره

---

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه الزهرا، khsolimani@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار فیزیک، دانشگاه الزهرا، f\_shahshahani@alzahra.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه الزهرا، mahnaz\_assari@yahoo.com

بوجود آمده انجام شده است. سه ساختار مذکور که بترتیب MOF1، MOF3 و MOF7 نامیده می شود دارای نواحی تک مد متفاوت بوده و ناحیه تک مدی ساختار MOF1 وسیع تر از دو ساختار دیگر می باشد. ضریب تحدید نوری در ناحیه مغزی برای سه ساختار برای مقدارهای مختلف  $d$  و  $A$  و به ازای دو مقدار معین طول موج نور،  $\lambda=0.98, 1.55 \mu\text{m}$  محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده اند. نتیجه محاسبات نشان می دهد که ساختار MOF7 ضریب تحدید نوری بالاتری نسبت به دو ساختار دیگر داشته و برای مواردی که انتقال توانهای نوری بالا مورد نیاز است ساختار مناسبی می باشد. با افزایش نسبت  $d/A$  ضریب تحدید نوری افزایش می یابد.

## واژه های کلیدی: تار نوری ریز ساختار، ضریب تحدید نوری،

تار نوری بلور فوتونی

### ۱- مقدمه

در سالهای اخیر، بلورهای فوتونی توجه زیادی را از لحاظ تئوری و تجربی به خود جلب نموده اند. از این بلورها در تارهای نوری موسوم به تارهای بلور فوتونی، PCF<sup>۱</sup> که تارهای نوری ریز ساختار، MOF<sup>۲</sup> نیز نامیده می شوند به طور گسترده استفاده میشود. MOFها در قطعه های اپتیک غیرخطی، لیزرها و تقویت کننده های تار نوری کاربرد فراوان دارند [۱-۳]. تارهای نوری ریز ساختار، ساختارهایی از سیلیس ذوب شده اند که غلافشان یک بلور فوتونی دو بعدی سیلیکایی است که حفره های هوا در امتداد طول تار جاسازی شده اند [۴]. با حذف یک یا چند حفره در مرکز تار ناحیه ای تشکیل می شود که به عنوان مغزی تار عمل میکند. در تارهای بلور فوتونی ریز ساختار نور بر اساس پدیده بازتاب داخلی کلی همانند تارهای نوری معمولی در امتداد طول مغزی تار هدایت می شود [۳]. مشخصات کلی

<sup>1</sup> Photonic Crystal Fiber

<sup>2</sup> Microstructure Optical Fiber

ساختارهای مذکور توسط دو پارامتر  $d$  قطر حفره و  $A$  دوره تناوب بلور توصیف می‌شود. از ویژگی‌های ارزشمند این نوع تار عملکرد تک مد آنها در بازه وسیعی از طول موج می‌باشد. از اینرو به آنها تارهای ESM<sup>1</sup> نیز اطلاق می‌شود [۴]. این خاصیت برای داشتن یک لیزر پرتوان و باریکه خروجی با کیفیت بالا بسیار حائز اهمیت است. لذا بررسی اثر پارامترهای مختلف روی انتشار موج در ساختارهای MOF به منظور بهینه کردن عملکرد آنها ضروری به نظر می‌رسد. از جمله پارامترهای مهم در این ساختارها گشودگی عددی و فرکانس نرمالیزه می‌باشد که بر حسب مقادارهای مختلف  $d$  و  $A$  مورد بررسی قرار می‌گیرند. یک تحلیل تئوری از خاصیت تقویت نور در تارهای نوری با ساختار بلور فوتونی آلاییده با یون اربوم با استفاده از روش تمام برداری المان محدود در [۵] و روش جدیدی برای بررسی عملکرد لیزرهای بلور فوتونی تار نوری در [۶] ارائه شده است. پهنای گاف نوار تار نوری بلور فوتونی با حفره هوا نشان می‌دهد که پهنای گاف با مشخصات تار بلوری فوتونی بسیار وابسته است [۷]. مدلسازی تقویت کننده رامان تار نوری بلور فوتونی در [۸] ارائه شده است. در این مقاله نخستین بار وابستگی گشودگی عددی تار نوری، ناحیه تک مدی و چند مدی و ضریب تحدید نوری سه ریز ساختار MOF1، MOF3 و MOF7 به پارامترهای ساختار بطور تئوری بررسی و ارزیابی شده است. مقاله به صورت زیر تنظیم شده است، در بخش دوم تئوری تارهای نوری ریز ساختار و روش ضریب شکست موثر نرده ای به طور مختصر ارائه شده است. بخش سوم به تجزیه و تحلیل نتایج عددی اختصاص یافته و در بخش پنجم نتیجه گیری کوتاهی آورده شده است.

## ۲- مدلسازی تارهای نوری ریزساختار

در شکل (۱) سطح مقطع یک تار نوری ریزساختار با قطر حفره  $d$  و ثابت شبکه  $A$  و طرحی از سلول واحد شش گوش نشان داده شده است. به دلیل ساختار پیچیده غلاف در MOF ها از روش‌های مدلسازی تارهای نوری معمولی نمی‌توان برای محاسبه اغلب پارامترهای کلیدی مانند گشودگی عددی، فرکانس نرمالیزه فیبر و تلفات خمش استفاده کرد. معمولاً

---

<sup>1</sup> Endlessly Single Mode

تار نوری ریزساختار با یک تار ضریب شکست پله ای،<sup>۱</sup> SIF معادل سازی می شود و یک مدل عددی ساده بر اساس روش ضریب شکست موثر نرده ای،<sup>۲</sup> SEIM برای توصیف عملکرد ویژگی های ساختار MOF مورد بررسی قرار می گیرد [۹-۱۱] که به طور مختصر در این بخش توضیح داده خواهد شد. در این روش از معادله هلمهولتز برای محاسبه ضریب شکست موثر غلاف استفاده شده و شرایط مرزی نیومن برای یک سلول شش وجهی که مطابق شکل (۱) یک حفره را در بر می گیرد اعمال می شود. در محاسبات این سلول شش وجهی با دایره ای به شعاع  $R$  طوری تقریب زده می شود که  $\pi R^2 = (3/2)^{1/2} \Lambda^2$  باشد [۱۲ و ۱۳].

پاسخ معادله هلمهولتز در نواحی حفره و سیلیکا به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Psi_1 = AI_0(WR); \quad R = r/a \quad (۱-الف)$$

$$\Psi_2 = BJ_0(RU) + CY_0(RU) \quad (۱-ب)$$

که در آن  $a$  شعاع حفره هوا و  $J_0$ ،  $Y_0$  و  $I_0$  به ترتیب معادلات بسل نوع اول، نوع دوم و تابع بسل تعمیم یافته نوع اول مرتبه صفر می باشد. با اعمال شرایط مرزی و برقراری ارتباط میان ثابت های  $A$ ،  $B$  و  $C$  به رابطه ویژه مقداری زیر می رسیم:

$$W \frac{I_1(Wa)}{I_0(Wa)} \left[ J_0(Ua) - Y_0(Ua) \frac{J_1(UR)}{Y_1(UR)} \right] = -U \left[ J_1(Ua) - Y(Ua) \frac{J_1(UR)}{Y_1(UR)} \right] \quad (۲)$$

که در آن  $U$  و  $W$  عبارتند از:

$$U^2 = n_{silica}^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (۳)$$

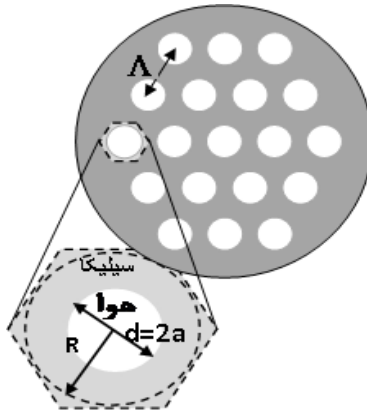
$$W^2 = \beta^2 - n_{air}^2 k_0^2 \quad (۴)$$

در رابطه های (۳) و (۴)،  $k_0$  و  $\beta$  به ترتیب ثابت انتشار موج در فضای آزاد و تار نوری می باشند. برای مد اصلی  $\beta$  به صورت  $\beta_{FSM}$  نشان داده شده و ضریب شکست موثر غلاف تار نوری ریزساختار به صورت  $n_{eff} = \frac{\beta_{FSM}}{k_0}$  تعریف می شود. این تعریف یک تعریف کلی و مستقل از حضور مغزی بوده و کاربردش محدود به زمانی است که ماده غلاف از

<sup>۱</sup> Step Index Fiber

<sup>۲</sup> Scalar Effective Index Method

قانون بازتاب کلی داخلی پیروی نماید [۱۴ و ۱۵].



شکل ۱: سطح مقطع یک تار نوری ریزساختار با قطر حفره  $d$  و ثابت شبکه  $A$  و طرحی از سلول واحد شش گوش با شعاع  $R$ .

حال با در نظر گرفتن ضریب شکست موثر  $n_{eff}$  به عنوان ضریب شکست غلاف، یک تار نوری ریزساختار مشابه یک تار ضریب شکست پله‌ای با مشخصات  $n_{core} = n_{silica}$  و  $n_{clad} = n_{eff}$  و شعاع مغزی  $a_{eff}$  معادل سازی می‌شود. به این ترتیب میتوان پارامترهایی مشابه تارهای ضریب شکست پله‌ای، مانند گشودگی عددی،  $NA^1$  و فرکانس نرمالیزه،  $V$ ، را برای یک MOF تعریف کرد. گشودگی عددی بنا بر تعریف معیاری از حداکثر زاویه‌ای است که باریکه فرودی برای انتشار در تار می‌تواند داشته باشد. فرکانس نرمالیزه و گشودگی عددی در تارهای نوری معمولی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (6)$$

که در آن  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب ضریب شکست مغزی و غلاف و  $a$  شعاع مغزی می‌باشد. تار

<sup>1</sup> Numerical Aperture

نوری زمانی به صورت کاملاً تک مد عمل می کند که شرط  $V < 2.405$  برقرار باشد [۱۶]. لذا با معادل سازی های صورت گرفته میان MOF ها و SIF ها، گشودگی عددی و فرکانس نرمالیزه برای تارهای نوری ریز ساختار به صورت زیر تعریف می شوند:

$$V_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} a_{eff} NA_{eff} \quad (7)$$

$$NA_{eff} = (n_{silica}^2 - n_{eff}^2)^{1/2} \quad (8)$$

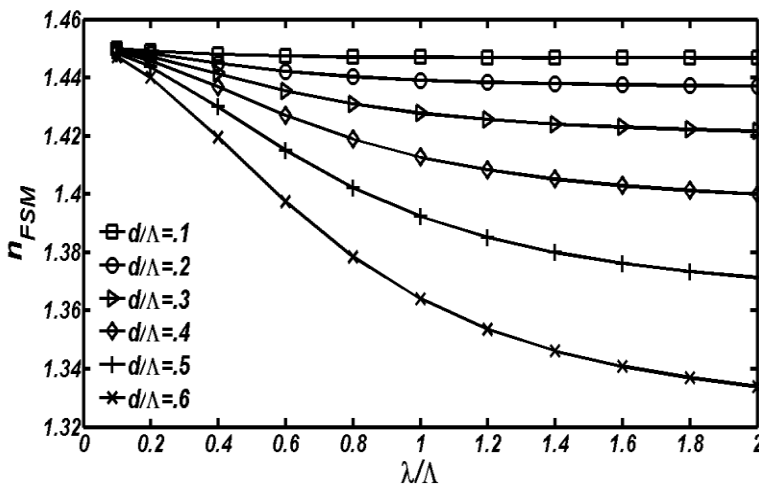
از آنجایی که در MOF ها مرز مشخصی میان مغزی و غلاف وجود ندارد شعاع مغزی این ساختار بطور موثر تعریف شده و به صورت کسری از  $A$  در نظر گرفته می شود [۱۲ و ۱۳]. در این مقاله شعاع مغزی برای ساختارهای مختلف مطابق با جدول (۱) در محاسبات وارد شده است. ضریب تحدید نوری به صورت نسبت توان نوری در مغزی تار به توان نوری کل تعریف می شود:

$$\Gamma = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^a |\Psi|^2 r dr}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty |\Psi|^2 r dr} \quad (9)$$

### ۳- تحلیل نتایج عددی

در این مقاله سه نوع مختلف تار نوری ریز ساختار که مغزی آنها مطابق جدول ۱ به ترتیب از حذف یک حفره MOF1، سه حفره MOF3 و هفت حفره MOF7 بوجود آمده است مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مغزی تار از جنس سیلیکا با ضریب شکست  $n_{silica} = 1.45$  می باشد. ابتدا مقدار  $n_{FSM}$  غلاف با اعمال شرایط مرزی و حل معادله ویژه مقداری (۲) بدست می آید. در شکل (۲) تغییر ضریب شکست موثر غلاف،  $n_{FSM}$  بر حسب  $\lambda/A$  و به ازاء مقادیر مختلف  $d/A$  رسم شده است. از آنجایی که این پارامتر معرف ناحیه تک مدی در این نوع تارها به شمار می رود، در طراحی این ساختارها از اهمیت خاصی برخوردار است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش نسبت  $d/A$  به دلیل افزایش کسر پرشدگی هوا در غلاف ضریب شکست موثر به طور قابل

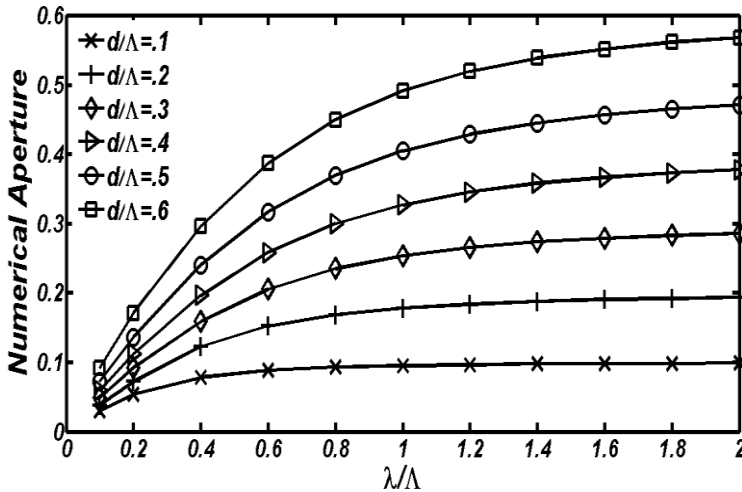
توجهی کاهش می‌یابد. هم چنین حضور حفره های هوا در غلاف سبب وابستگی شدید ضریب شکست موثر به طول موج شده است. به طوریکه با افزایش طول موج، میدان الکترومغناطیسی هدایت شده توسط MOF نفوذ بیشتری در غلاف پیدا کرده و منجر به کاهش مقدار ضریب شکست موثر می‌گردد. از روی شکل پیداست که برای هر مقدار معین  $d/\Lambda$  با افزایش  $\lambda/\Lambda$ ، ضریب شکست موثر غلاف افزایش می‌یابد.



شکل ۲: تغییر ضریب شکست موثر غلاف بر حسب  $\lambda/\Lambda$  به ازاء هفت مقدار مختلف  $d/\Lambda$ .

در شکل (۳) گشودگی عددی بر حسب  $\lambda/\Lambda$  و به ازای نسبت‌های مختلف  $d/\Lambda$  رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این پارامتر در تارهای نوری ریز ساختار نسبت به SIFها دارای تغییرهای بیشتری است و این ناشی از وابستگی شدید ضریب شکست موثر غلاف به طول موج می‌باشد. از روی شکل به سادگی دیده می‌شود که گشودگی عددی در MOFها برای یک مقدار ثابت  $\Lambda$  با افزایش طول موج افزایش می‌یابد. در ساختار مورد بررسی، این پارامتر در بازه  $0.77-0.29$  تغییر می‌کند که این بازه به اندازه حفره‌ها و فضای میان آنها بستگی دارد. لذا بازه وسیعی از مقدارها این پارامتر قابل دسترس است. هم چنین مشاهده می‌شود که با کاهش اندازه  $d/\Lambda$  مقدار  $NA$  کاهش یافته و بدین ترتیب

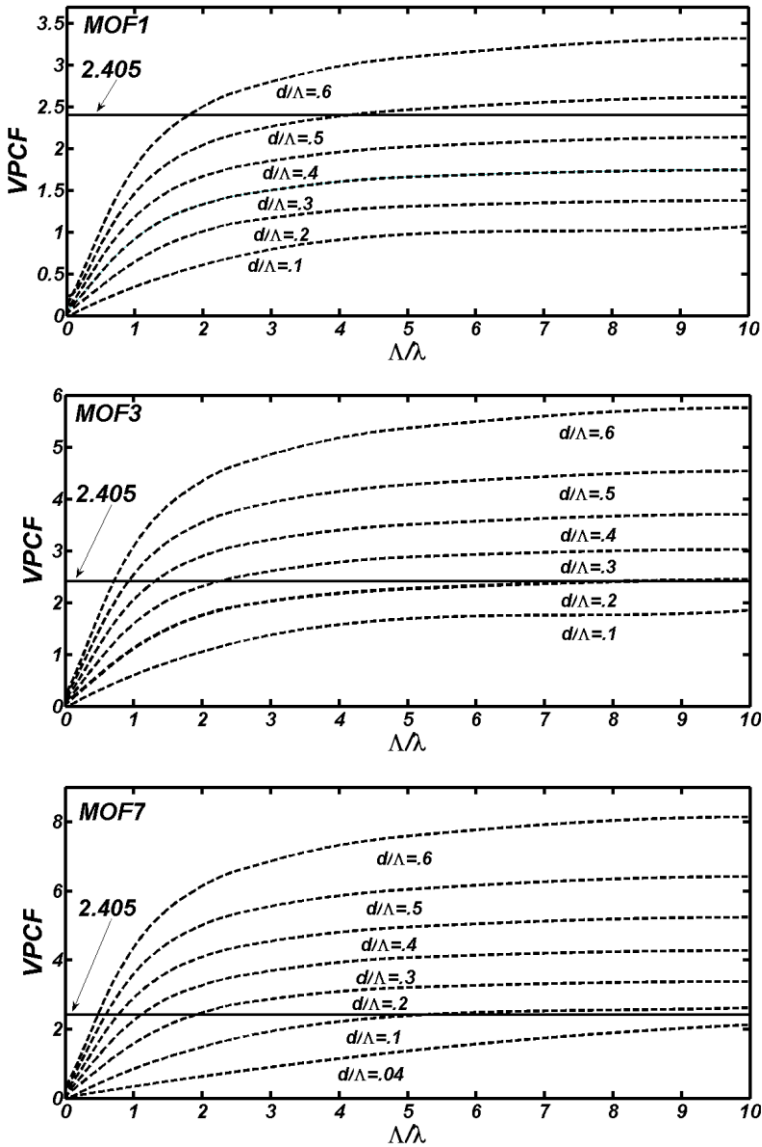
احتمال هدایت تک مد در MOF افزایش می یابد.



شکل ۳: تغییر گشودگی عددی یک تار نوری ریزساختار بر حسب  $\lambda/\Lambda$  برای هفت مقدار مختلف  $d/\Lambda$ .

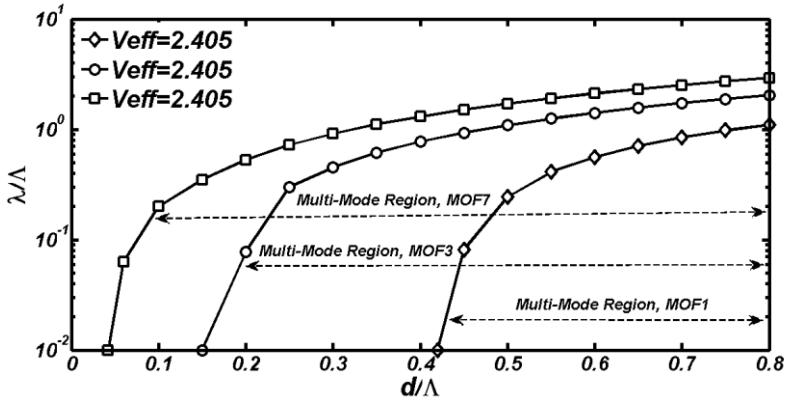
در انواع مختلف MOF در صورتی می توان از شرط  $V < 2/405$  به عنوان شرط تک مدی تار استفاده کرد که مقدارهای خاصی را مطابق با داده های جدول (۱) به عنوان شعاع موثر ساختار در نظر بگیریم. در شکل (۴) فرکانس نرمالیزه برای هر سه ساختار MOF1، MOF3 و MOF7 بر حسب  $A/\lambda$  و به ازای نسبت های مختلف  $d/\Lambda$  رسم شده است. همانگونه که مشاهده می شود برای هر کدام از ساختارها شرط  $V < 2/405$  تنها به ازاء مقدارهای معینی از  $d/\Lambda$  حاصل می شود. خلاصه ای از این سه نمودار در شکل (۵) به صورت تغییرات  $\lambda/\Lambda$  بر حسب  $d/\Lambda$  برای هر سه ساختار ارائه شده است. نکته قابل توجه در شکل ۵ آن است که برای ساختارهای MOF1، MOF3 و MOF7 به ترتیب تا زمانی که  $d/\Lambda < 0.42$ ،  $d/\Lambda < 0.15$  و  $d/\Lambda < 0.04$  باشد، تمامی طول موج ها در تار نوری مورد نظر به صورت کاملاً تک مد هدایت می شوند، لذا یکی از راه های رسیدن به یک تار تک مد کاهش قطر و کوچک تر کردن حفره ها می باشد. هم چنین مشخص است که با افزایش اندازه مغزی از وسعت ناحیه تک مد کاسته شده و بر وسعت ناحیه چند مدی تار افزوده





شکل ۴: فرکانس نرمالیزه بر حسب  $\Lambda/\lambda$  به ازای مقادیرهای مختلف  $d/\Lambda$  در هر سه نوع ساختار

MOF7 و MOF1, MOF3

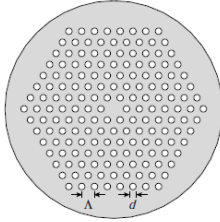
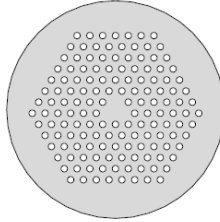
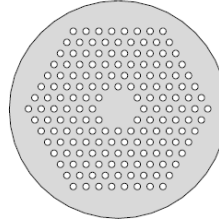


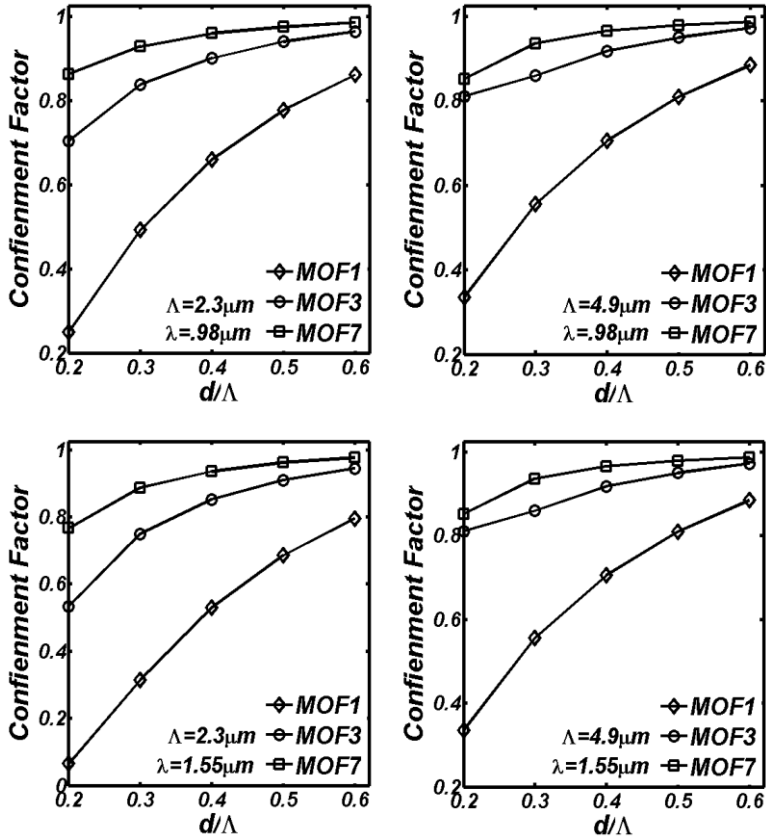
شکل ۵: تعیین مرز نواحی تک مد و چند مد در هر سه ساختار

MOF1, MOF3 و MOF7.

از آنجایی که اندازه مغزی توسط ساختار تناوبی غلاف محدود می‌شود، تارهایی با مغزی بزرگ باید دارای ساختار غلافی با دوره تناوب بزرگ باشند که این امر منجر به تلفات شدید و جدی در تار نوری می‌شود. از طرف دیگر اندازه مغزی بزرگ برای بسیاری از کاربردهای پر توان مورد نیاز می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای سه ساختار MOF1, MOF3 و MOF7.

	 MOF1	 MOF3	 MOF7
$a_{eff} / \Lambda$	$1/\sqrt{3}$	۱	$\sqrt{2}$
$d / \Lambda$	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۰۴



شکل ۶: ضریب تحدید نوری بر حسب  $d/\Lambda$  برای دو مقدار مختلف طول موج نور و دو مقدار متفاوت دوره تناوب شبکه.

در شکل (۶) ضریب تحدید توان نوری بر حسب  $d/\Lambda$  به ازاء دو طول موج مختلف و دو دوره تناوب متفاوت برای هر سه ساختار MOF1، MOF3 و MOF7 رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود در یک طول موج و دوره تناوب معین با افزایش اندازه نرمالیزه حفره ها، ضریب تحدید نوری برای هر سه ساختار دارای روند افزایشی است. همچنین این ضریب برای ساختار MOF7 بیشترین مقدار و برای ساختار MOF3 کم ترین مقدار را دارد و این بدان معناست که با افزایش اندازه مغزی یک تار نوری ریزساختار بر شدت تحدید نور در مغزی تار افزوده می شود.

همان طور که پیشتر نیز اشاره شد، شعاع مغزی در یک ریزساختار فیبر نوری می تواند به صورت ضریبی از  $A$  در نظر گرفته شود، بنابراین در یک طول موج معین با افزایش دوره تناوب شبکه، اندازه مغزی بزرگ تر شده و در نتیجه ضریب تحدید نوری برای هر سه ساختار افزایش می یابد. هم چنین این ضریب با کاهش اندازه طول موج در هر سه ساختار افزایش می یابد، زیرا طول موج های کوتاه تر بیشتر در ناحیه ای با ضریب شکست بالا متمرکز می شوند. به عبارت دیگر در طول موج های کوتاه تر میدان نوری بیشتر در ناحیه سیلیکا متمرکز شده و به داخل حفره ها کمتر نفوذ می کند و بدین ترتیب ضریب تحدید نوری افزایش می یابد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش ضریب شکست موثر اسکالر ناحیه تک مدی و چند مدی برای سه نوع مختلف تار نوری ریز ساختار، MOF1، MOF3 و MOF7 بر حسب مقدارهای مختلف فاصله تناوبی بین حفره ها و قطر حفره ها بررسی شد و نشان داده شد که ساختار MOF1 در بازه وسیع تری نسبت به ساختار MOF3 و MOF7 تک مد می باشد. به طور مثال به ازاء کمیت  $d/A=0.3$  ریز ساختار MOF7 برای  $\lambda/A > 0.8$  تک مد است در حالی که ریز ساختار MOF3 برای  $\lambda/A > 0.4$  تک مد بوده و ساختار MOF1 برای تمام مقدارهای  $\lambda/A$  تک مد می باشد. سه ساختار MOF1، MOF3 و MOF7 از نظر مقدار ضریب تحدید نوری در ناحیه مغزی با یکدیگر مقایسه شدند و با توجه به اینکه شعاع مغزی ریز ساختار MOF7 بزرگ تر از دو ساختار دیگر است، ضریب تحدید نوری بالاتری داشته و برای انتقال توانهای بالا مناسب می باشد. هم چنین محاسبه گشودگی عددی تارهای نوری ریز ساختار نشان داد که با افزایش  $d/A$  و  $\lambda/A$  این کمیت افزایش یافته و برای مقدارهای بزرگ  $\lambda/A$  به مقدار ثابتی میل می کند.

## مراجع

- [1] J. Xu, J. Song, C. Li, and K. Ueda; "Cylindrically Symmetrical Hollow Fiber"; *Optics Communications* **182** (2000) 343-348.
- [2] L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor, and T. J. Shepherd; "Multicore Photonic Crystal Fiber Lasers for High Power/Energy Applications"; *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **15** (2009) 328-336.
- [3] K. Furusawa, T. Kogure, J. K. Sahu, J. H. Lee, T. M. Monro, and D. J. Richardson; "Efficient Low-Threshold Lasers Based on an Erbium-Doped Holey Fiber"; *IEEE Photonics Lett. Tech.* **17** (2005) 25-27.
- [4] A. M. Zheltikov; "Holey Fibers"; *Physics-Uspekhi* **43** (2000) 1125-1136.
- [5] A. Cucinotta, F. Poli, S. Selleri, L. Vincetti, and M. Zoboli; "Amplification Properties of Er<sup>3+</sup>-Doped Photonic Crystal Fibers"; *IEEE J. of Lightwave Tech.* **21** (2003) 782-788.
- [6] A. Mafi, J. V. Moloney, D. Kouznetsov, A. Schülzgen, S. Jiang, T. Luo, and N. Peyghambarian; "A Large-Core Compact High-Power Single-Mode Photonic Crystal Fiber Laser"; *IEEE Photonics Lett. Tech.* **17** (2004) 2595-2597.
- [7] T. A. Birks, P. J. Roberts, P. St. J. Russell, D. M. Atkin, and T. J. Shepherd; "Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures"; *Electron. Lett.* **31** (1995) 1941-1943.
- [8] M. Bottacini, F. Poli, A. Cucinotta, and S. Selleri; "Modeling of Photonic Crystal Fiber Raman Amplifiers"; *IEEE, J. of Lightwave Tech.* **22** (2004) 1707-1713.
- [9] J. Arriaga; "Effective Index Model and Guided Modes in a Photonic Crystal Fiber"; *Physics status solidi (B)* **242**, No. 9 (2003) 1868-1871.
- [10] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin; "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding"; *Optics. Lett.* **21** (1996) 1547-1549.
- [11] H. Li, A. Mafi, A. Schulzgen, L. Li, V. L. Temyanko, N. Peyghambarian and J. V. Moloney; "Analysis and Design of Photonic Crystals Fibers Based On an Improved Effective-Index Method"; *IEEE J. of Lightwave Tech.* **25** (2007) 1224-1230.
- [12] F. Bahloul, M. Zghal, R. Chatta, and R. Attia; "Modelling Microstructured Optical Fibers"; *Control, Communications and Signal Processing*, First International Symposium (2004) 647 – 650.

- [13] T. A. Birks, D. Mogilevtser, J. C. Knight, P. St. J. Russell, and J. Broeng; "The Analogy between Photonic Crystal Fibers and Step Index Fibers"; *Optical Fiber Communication Conference, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, OFC/IOOC '99*, **4** (1999) 114-116.
- [14] W. Chen, J. Li, S. Li, and H. Li; "Study on Single Mode Photonic Crystals Fibers in Wide Wavelength Range"; *Chinese Optics Letters* **5** (2007) 383-3857.
- [15] J. Broeng; "Photonic Crystal Fibers: A New Class of Optical Waveguides"; *Optical Fiber Tech.* **5** (1999) 305-330.
- [16] J. C. Knight, T. A. Birks, and P. St. J. Russell; "Properties of Photonic Crystal Fiber and The Effective Index Model"; *J. Opt. Soc. Am. A* **15** (1998) 748-752.