

Studying and Designing Photonic Crystal Fiber using Fractal Engineering

Dr. Alsamawal Saleh*

Dr. Hadeel Issa**

Ralda Jaafar***

(Received 18 / 1 / 2023. Accepted 13 / 9 / 2023)

□ ABSTRACT □

In recent years, Fractal engineering has been used extensively in all fields of science, especially in the field of microscopy and optical communication due to the additional parameters that the fractal object provides over Euclidean. This paper demonstrates the design of a photonic crystal fiber that depends on the (Sprinski Carpet). It aims to study and compare the fractional photonic crystal fiber (FPCF) with the hexagonal photonic crystal fiber (HPCF) by using (Comsol Multiphysics) as a simulation program, which depends on the finite element method (FEM). We change the stage of growth ($s = 1$) and ($s = 2$), then the dispersion and confinement loss properties were studied and calculated using (Matlab) program and compared with the traditional hexagonal photonic crystal fiber, within the range of studied wavelengths [$0.4 \leq \lambda \leq 2$] μm .

Keywords: Photonic Crystal Fibers – Fractal Engineering – Dispersion – Confinment Loss – Finite Element Method.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Professor- Department of communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering-Tishreen Latakia- Syria.

** Assistant Professor- Department of communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering-Tishreen-Lattakia- Syria.

***Ph.D student- Department of communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen, Lattakia, Syria. raldajaafar@gmail.com

تصميم وتحليل ليف بلوري فوتوني باستخدام الهندسة التجزئية

د. السموعل صالح*

د. هديل عيسى**

رالدا جعفر***

(تاريخ الإيداع 18 / 1 / 2023. قُبِلَ للنشر في 13 / 9 / 2023)

□ ملخص □

استخدمت الهندسة التجزئية في السنوات الأخيرة بشكل واسع جداً في جميع مجالات العلوم، وخاصة مجال الاتصالات الميكروية والضوئية نظراً لعدد البارامترات الإضافية التي يقدمها الجسم التجزئي. يقترح البحث تصميم ليف بلوري فوتوني يعتمد على التوضع التجزئي للنقوب الهوائية في غلاف الليف، وهذا التوضع يعتمد توزع سجادة سبرينسكي (Sprinski Carpet). يقارن البحث الليف البلوري الفوتوني التجزئي (FPCF) مع الليف البلوري الفوتوني السداسي (HPCF) من خلال برنامج المحاكاة (Comsol Multiphysics) الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية (FEM) عند تغيير درجة التجزء (s=1) و (s=2)، وتمت دراسة وحساب خواص عامل التشتت وخسارة الحصر باستخدام برنامج (Matlab) ومقارنتها مع الليف البلوري الفوتوني السداسي التقليدي ضمن مجال الأطوال الموجية ($0.4 \leq \lambda \leq 2$) μm .

الكلمات المفتاحية: الألياف البلورية الفوتونية - الهندسة التجزئية - التشتت - خسارة الحصر - طريقة العناصر المنتهية.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ-قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية سورية.
**مدرسة- قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية- سورية.
***طالبة دكتوراه -قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية- سورية.

raldajaafar@gmail.com

مقدمة:

تلعب الاتصالات الضوئية دوراً هاماً في نقل المعلومات بمعدلات ارسال عالية جداً، حيث يمكن أن نرسل عدداً كبيراً من الألياف في وقت واحد على ليف ضوئي واحد، بالمقابل توجد عدة ظواهر سلبية تحد من أداء أنظمة الألياف ومنها التشتت (Dispersion)، والذي يعرف على أنه ظاهرة تسبب في انبساط عرض النبضات الضوئية عند انتشارها في الألياف مما يؤدي إلى تداخل النبضات الرقمية وعدم إمكانية التمييز بينها عند وصولها إلى الهدف، والضياعات الضوئية مثل التناثر والانعكاس وضياع الحجز وغيرها. ولذا من الضروري تخفيض التشتت والضياعات أقل ما يمكن [1][2].

أدى تصنيع التقنيات الجديدة للبولرات الفوتونية إلى جيل جديد من الألياف تسمى الألياف البلورية الفوتونية Photonic Crystal Fibers (PCF)، والتي تظهر خواص فريدة من نوعها في أنظمة الاتصالات. تتميز هذه الألياف بإمكانية الإرسال بنمط واحد (Endlessly Single Mode) لمجال واسع من الأطوال الموجية، بالنتيجة توفير مجال كبير من عرض الحزمة الضوئية مما يزيد من سعة الشبكات الضوئية. كما تتميز بالقدرة على التحكم بالخواص الضوئية من خلال ضبط البارامترات البنوية لها. بالإضافة إلى أن الألياف البلورية الفوتونية توفر حرية كبيرة بالتصميم بالمقارنة مع الألياف التقليدية. كما أنها تصنع عادة من زجاج السليكا مع مصفوفة من قنوات الثقوب الهوائية المارة على طولها وعند إزالة الثقب المركزي من هذه المصفوفة يتشكل عندها قلب الليف [3][4].

من ناحية ثانية فقد ازداد الاهتمام بالتطبيقات العملية للهندسة التجزئية في مجال الأمواج الضوئية، كونها تملك خصائص فريدة مثل خاصية التشابه الداخلي، بالإضافة إلى عدم الانتظام الموجود فيها. بالنتيجة يمكن تصميم العديد من التجهيزات الضوئية بتطبيق الهندسة التجزئية في تصميم الليف الضوئي والذي يعطي درجات حرية أكبر في تصميم هذا النوع من الألياف [5][6].

أجريت العديد من الدراسات عن الألياف البلورية الفوتونية التجزئية بأشكال مختلفة خلال السنوات السابقة، واستخدمت في العديد من التطبيقات الضوئية نظراً للميزات الجديدة التي تقدمها [7-12]. وفيما يلي بعض الدراسات المرجعية: اقترحت إحدى الدراسات استخدام مادة بلازموونية وهي الذهب ووضعها على الغلاف الخارجي لليف البلوري الفوتوني بشكل مستقيم واستخدام الليف المقترح كحساس ضوئي، وذلك لزيادة إمكانية استشعار التغيير في قرائن الانكسار، حيث درس البحث [7] تأثير تغيير سماكة المادة البلازموونية والتوزيع التجزئي على خسارة الحصر وقرينة الانكسار الفعالة، وبالرغم من هذه النتائج إلا أن الليف المدروس صعب التصميم. تضمن البحث [8] دراسة التشتت اللوني والتخميد لليف بلوري فوتوني ووزعت الثقوب فيه بالتوزيع التجزئي وإمكانية استخدامه لنقل المعلومات لمسافات بعيدة، واستخدمت مادة الذهب فقط كمادة بلازموونية، لكن لوحظ انه تم ملئ الثقب بالمادة البلازموونية بالكامل مما يزيد من كلفة التصنيع بشكل كبير. كما قدم البحث [9] دراسة عن تصميم ليف بلوري فوتوني بلازمووني تجزئي يعمل كحساس أو مستقطب ضوئي على شكل (D Shape) بثقوب دائرية الشكل، وقد استخدم مادة الفضة كمادة بلازموونية، ودرس القسم الحقيقي لقرائن الانكسار الفعالة وخسارة الحصر والحساسية عند الاطوال الموجية الضوئية، أهمل هذا البحث تأثير دراسة مادة أخرى وأشكال أخرى من الثقوب. بينما درس البحث [10] استخدام مواد بلازموونية أخرى مثل النحاس والألمنيوم مقارنتها مع مادتي الذهب والفضة، ودرس القسم الحقيقي لقرينة الانكسار وخسارة الحصر عند مجال الطيف المرئي، ووزعت الثقوب على شكل سجادة سبرينسكي، ووجد أن للذهب والفضة أعلى خسارة حصر وبالتالي هما المادتين الأفضل استخداماً لإنشاء بلازموونات السطح. أما البحث [11] تضمن دراسة التوزيع التجزئي لثقوب ليف بلوري فوتوني مجوف القلب

ودرس أثر هذا التوزيع على خسارة الحصر للليف، بينما درس البحث [12] ليف بلوري فوتوني يعمل كمرشح استقطاب ووزعت فيه الثقوب تجزيئياً واستخدم مادة الذهب كمادة بلازمونية. بتغيير بارامترات الألياف المختلفة مثل أقطار وأشكال الثقوب وعدد حلقات الثقوب الهوائية والتباعد بين تقبين متجاورين ونحصل على (PCFs) بخواص جديدة محسنة [13]، لذا اقترحنا دراسة وتحليل ليف بلوري فوتوني تجزيئي Fractal Photonic Crystal Fiber (FPCF)) يعتمد على توزيع سجادة سيرينسكي للثقوب الهوائية مصمت القلب ويكون توجيه الضوء فيه باستخدام قرينة الانكسار (Index Guiding)، أي أن قرينة انكسار القلب أعلى من الغلاف، لذا يكون التوجيه في هذا النوع يعتمد على الانعكاس الكلي الداخلي [14].

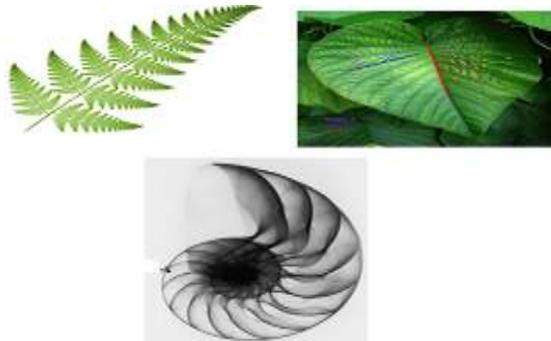
أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من الحاجة إلى تطوير أنظمة اتصالات ضوئية عريضة الحزمة وبشكل خاص الألياف الضوئية التي كانت إحدى النجاحات التكنولوجية الأساسية للقرن العشرين. كما أن الألياف البلورية تتميز بقدرتها على توجيه الضوء والتحكم به بطرق بسيطة وأنها تملك خصائص ضوئية محسنة مقارنة بالألياف التقليدية كالحجز الشديد للضوء، تخفيض قيمة التشتت والخسارة، وغيرها [15]، وبالأستفادة من ميزات البنى التجزيئية في توزيع الثقوب حصلنا على تصميم جديد، مناسب لتطبيقات نظم الإرسال لمسافات طويلة ولتطبيقات النقل الضوئي والمرشحات الضوئية. كما أمكن استخدامها في مجالات أطوال موجية غير تقليدية مثل الأشعة تحت الحمراء البعيدة وفوق البنفسجية.

طرائق البحث ومواده:

1- الهندسة التجزيئية (Fractal Geometry):

تستخدم الهندسة التجزيئية لوصف الأجسام التي لا يمكن وصفها بشكل دقيق في الهندسة الإقليدية التي تعطي نظرة تقريبية عن بعض الأجسام الطبيعية أو بعض الخطوط المحددة لهذه الأجسام، فمثلاً تصف الهندسة الإقليدية الشوائب على أنها رسماً أملساً وليس متعرجاً، هذا ما لاحظته العالم ماندل بور الذي وضع قواعد الهندسة التجزيئية. يعرف الجسم التجزيئي بأنه جسم غير منتظم من الممكن أن يكون محدد ولكنه غير منتهٍ، ويتصف بخاصية التشابه الداخلي (Self Similarity) أو تكرار الشكل العام أي أن القطعة الصغيرة هي شكل مصغر جداً عن الشكل الأساسي، ويتولد هذا الجسم بالتجزئ أي يتجزأ الشكل الأساسي إلى أصغر فأصغر ويشكل مشابه للجسم الأساسي [16-17] كما في الشكل (1).



الشكل(1): خاصية التشابه الداخلي لعدة اجسام طبيعية [16].

يمكن وصف أي جسم تجزئي من خلال معاملاته وهي:

- البعد التجزئي (Fractal Dimension (D)) : هو عدد غير صحيح يعطى بالقانون [18] :

$$D = \frac{\log(N)}{\log\left(\frac{1}{\rho}\right)} \quad (1)$$

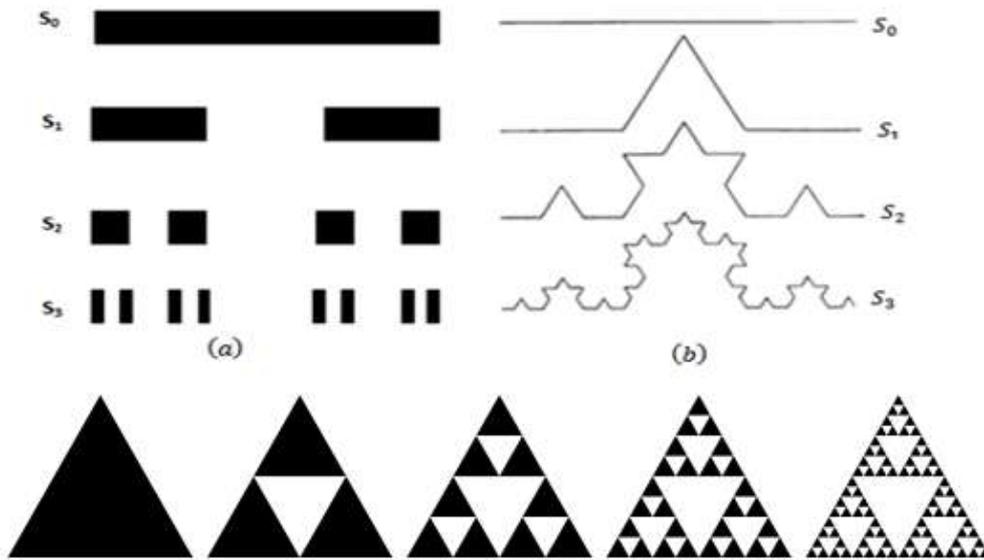
حيث N عدد القطع أو النسخ المتشابهة في التركيب عند درجة التجزئ الأولى، (ρ) معامل التقسيم أو التصغير لهذا الجسم التجزئي.

- درجة التجزئ (Stage of growth (S)) : تعبر عن عملية التكرار في الحصول على الجسم التجزئي وتكون بعدة مراحل تبدأ من الدرجة $S = 0$ وتستمر حتى اللانهاية وعندها تتعدم المادة بحيث تظهر البنية نفس الخصائص.

- معامل تغيير أبعاد الفجوات (lacunarity) : يعبر عن توزيع الفجوات ذات قرينة انكسار (n_0) ضمن الجسم

التجزئي (اي كثافة توزع المادة الاساس ضمن الجسم التجزئي) مع ثبات البعد التجزئي ودرجة التجزئ [19] . ويبين الشكل (2) أهم أنواع التراكيب التجزئية [20-23].

سنهتم في هذا البحث بدراسة توزيع الثقوب بحسب سجادة سيرينسكي ذات الشكل المثلثي.



الشكل (2): أهم التراكيب التجزئية: (a) شريط كانتور (Cantor bar)، (b) ندف ثلج (Koch Snowflak)، (c) سجادة سيرينسكي (Sierpinski carpet) [20-23]

2- الطريقة الرقمية - طريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method (FEM)):

- مبدأ العناصر المنتهية والخطوات الرئيسية في المحاكاة:

في حالة الليف البلوي الفوتوني يستحيل التعبير عن الشروط الحدية في شكل تحليلي نظراً للتعقيد البالغ عند تحديد علاقة رياضية لقرينة الانكسار المكانية. فالتباين العالي بين قرائن الانكسار للألياف البلورية الفوتونية الأكبر بمرتين من قيمته في الألياف التقليدية يمنعنا من استخدام التقريبات التي تقود على سبيل المثال إلى تعريف الأنماط المستقطبة

خطياً للألياف التقليدية، لذلك لا يمكن صياغة حلول تحليلية في حالة الألياف البلورية الفوتونية ولا بد من تطبيق الطرق الرقمية من أجل حساب القيم والأشعة المميزة والخصائص الضوئية للبنية [24]. ومن أشهر الطرق الرقمية المستخدمة وأكثرها دقة وسهولة هي طريقة العناصر المنتهية (Finit Element Method (FEM) حيث تعتمد فكرة العناصر المنتهية على تقسيم الوسط المستمر المدروس إلى أجزاء منتهية الأبعاد حتى يتبين لنا وصف سلوك هذه العناصر الصغيرة كل على حدة، ومن ثم اعتبار كل جزء منبع أساسي، وباستخدام مبدأ التنضيد نستطيع حساب أو إيجاد السلوك الكلي للوسط، ويمكن أن تطبق الطريقة على أي وسط مستمر مثلاً: منشأ هيكلي، أو مستوي، أو حتمي، أو على وسط سائل، وأي مسألة فيزيائية قابلة للوصف عن طريق معادلات تفاضلية، وقد تم تطوير عناصر منتهية خاصة بالمسائل الخطية والمستوية والفراغية.

تمت الاستعانة ببرنامج النمذجة (COMSOL MULTIPHYSICS) والذي يعتمد في الحل على طريقة العناصر المنتهية. ويتضمن هذا البرنامج العديد من النماذج الفيزيائية وناذة تصميم بمساعدة الحاسوب (Computer-Aided Design (CAD)) من اجل تصميم البنى الهندسية، ويمكننا بواسطته الحصول على قيم دليل الانكسار الفعال والمساحة الفعالة للنمط الأساسي المنتشر في الليف. وإن الخطوات الأساسية في محاكاة الألياف البلورية الفوتونية هي [25]:

☒ تحديد الشكل الهندسي:

إن أول خطوة هي الرسم الهندسي للمقطع العرضي للليف، وتحديد عدد الثقوب الهوائية وأشكالها وأبعادها والمسافة الفاصلة بين مراكزها.

☒ تعريف المجالات الجزئية:

يتضمن تحديد الخصائص الفيزيائية للمواد في كل مجال جزئي، فمثلاً تشير الثقوب الرمادية في الشكل (3(a)) إلى منطقة الهواء، بينما تشير المنطقة الزرقاء إلى الزجاج والذي يعتمد دليل انكساره على طول الموجة من خلال معادلة سيلميير (Sellmeier) [26].

☒ التشبيك Meshing :

وتعني تقسيم المقطع العرضي للليف إلى أجزاء صغيرة على شكل مثلثات، بزيادة عدد هذه المثلثات وتصغير أبعادها تزداد دقة الحل.

☒ تحديد المسألة الفيزيائية المدروسة:

وهي في حالتنا مسألة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الأوساط العازلة الكهربائية. وتحديد تردد الإشارة المدروسة ودراسة الأنماط المنتشرة [27].

☒ الحل و المعالجة:

يقوم البرنامج بحل معادلة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية وحساب توزيع الحقل الكهربائي في الليف وحساب الخصائص الضوئية مثل دليل الانكسار الفعال والمساحة الفعالة، وتحسب خسارة الحصر والتشتت عن طريق تعويض قيم دليل الانكسار الفعال وطول الموجة في العلاقات الرياضية الخاصة بهما ورسم المنحنيات بمساعدة برنلمج الماتلاب [28].

1. خصائص الانتشار للبنى المدروسة للألياف البلورية الفوتونية :

إن بنى الألياف البلورية الفوتونية لها نوعان أساسيان هما ذات القلب المصمت وذات القلب المجوف وتختلف هذه الألياف بألية قيادة الضوء حيث تكون في القلب المصمت هي الانعكاس الكلي الداخلي والتي توصف بأنها معدلة

بسبب وجود الثقوب في الغلاف، بينما يقاد الضوء في القلب المجوف تبعاً لآثار الفجوة الحزمية، وكانت هذه البنى في الدراسات السابقة تتغير بأشكال ثقوب الهواء المختلفة مثل الدائري [29] الاهليلجي [30] وغيرها وبترتيب حلقات ثقوب الهواء مثل السداسي والثماني وغيرها [30-31]، وفي هذه الدراسة تم اقتراح بنى تجزئية لترتيب الثقوب ذات القلب المصمت، عند تغيير درجة التجزئ (s=1,2)، علماً أن زيادة درجة التجزئ تعطي نتائج أفضل ولكن في المقابل يزداد تعقيد التصميم لذا تم اختيار درجتين فقط، ويوضح الشكل (3(c,e)) مقطع عرضي للألياف البلورية الفوتونية التجزئية (FPCF) المقترحة، وتم توزيع الثقوب الهوائية بشكل تجزئي.

1-1- البنى المدروسة :

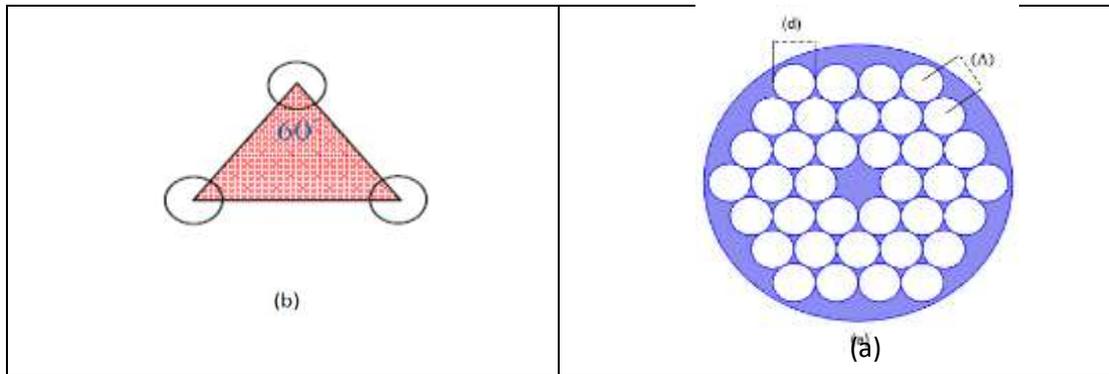
- الليف البلوري الفوتوني ذو الترتيب السداسي لثقوب الهواء (HPCF).
- الألياف البلورية الفوتونية ذو الترتيب التجزئي لثقوب الهواء (FPCF).

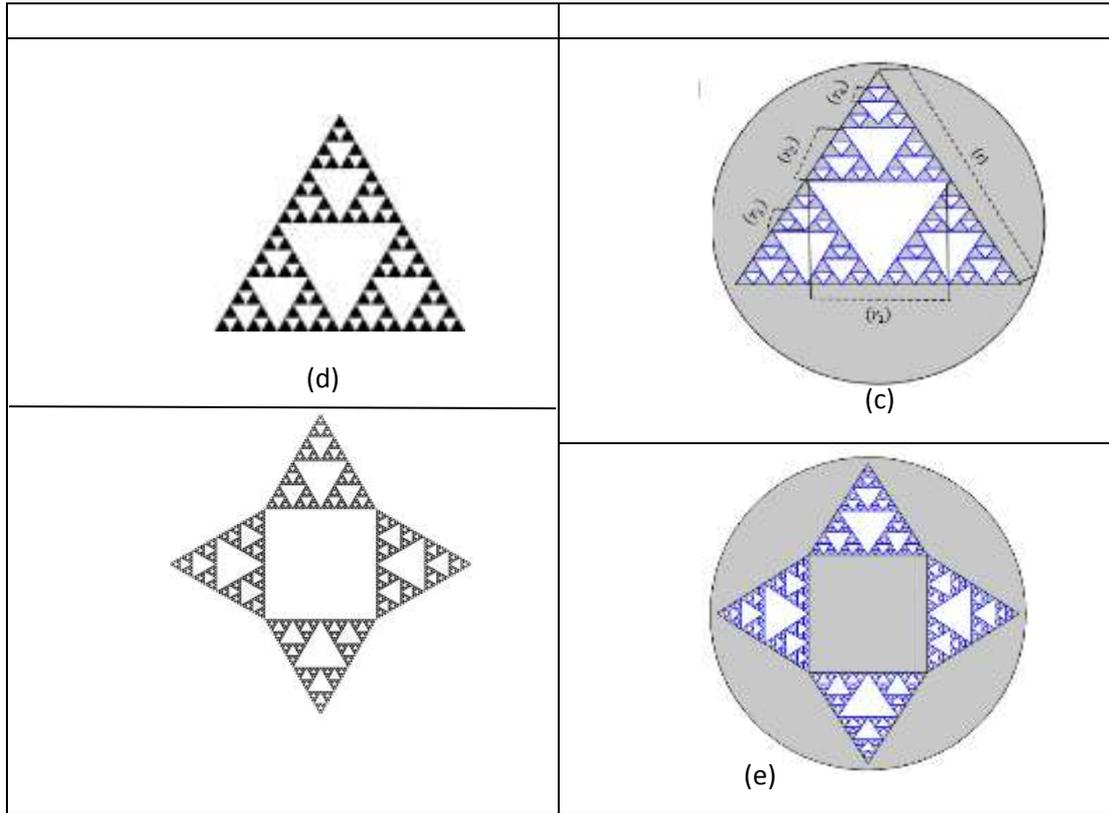
علماً أن الألياف المدروسة هي ألياف ذات قلب مصمت وتصنع من مادة السيليكا بدليل انكسار مساو إلى $n_s = 1.45$ وهي موضحة بالشكل (3)، وتتكون من ثلاث حلقات للثقوب الهوائية للليف السداسي، ويبلغ قطر ثقب الهواء في كل حلقة ($d = 1\mu m$)، والمسافة بين ثقبين متجاورين ($\Lambda = 2.3\mu m$)، وتتشكل البنية المسدسة من تكرار لمثلث الوحدة حول مركز القلب، علماً أن مثلث الوحدة هو مثلث متساوي الساقين طول كل ساق يساوي ثابت الشبكية (Λ) ويزاوية رأس 60° كما هو موضح بالشكل (3(b))، أما الليفين التجزئيين فكانت الثقوب على الشكل المثلث، والليف التجزئي الأول ($s = 1$) يملك ثقوب على شكل مثلث متساوي الاضلاع أطوال أضلاعه ($r = 8\mu m, r_1 = 4\mu m, r_2 = 2\mu m, r_3 = 1\mu m, r_4 = 0.5\mu m$) هي طول الضلع و (s) هي درجة التجزئ، ويكون شكل القلب مثلثاً أيضاً، أما الليف التجزئي الثاني ($s = 2$) فهو عبارة عن تكرار لشكل الثقوب للليف التجزئي الأول، ليتشكل قلب له الشكل المربع، كما في الشكل (3(c,e))، علماً أن اللون الأبيض يشير إلى الثقوب الهوائية، واللون الرمادي يشير إلى مادة السيليكا.

وقد وزعت الثقوب بحسب توزع سجادة سيرينسكي بعدد مثلثات مساو ($N = 3^n$)، ويكون طول الضلع ($r = \frac{1}{2^n}$)، وبالتالي يكون بعد الجزء هو [30] :

$$d = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln 3^n}{\ln 2^n} = \frac{\ln 3}{\ln 2} \cong 1.58496 \quad (2)$$

ودرسنا عامل التشتت (Dispersion) وخسارة الحصر (Confinement Loss) لليفين عند تغيير طول موجة الاشارة المنتشرة فيهما ضمن المجال [$400nm \leq \lambda \leq 2000nm$]، لتشمل بذلك نوافذ الاتصالات الثلاث، والحزم (O-E-S-C-L-U) وهي الحزم المستخدمة في أنظمة الاتصالات.





الشكل (3): (a) الليف البلوري الفوتوني السداسي، (b) مثلث الوحدة لليف ذو الترتيب السداسي لثقوب الهواء، (c) الليف البلوري الفوتوني ذو ترتيب ثقب الهواء بشكل تجزيئي بحسب توزيع سجادة سيرينسكي عندما (s=1) (d) التوزيع التجزيئي بحسب سجادة سيرينسكي عندما (s=1)، (e) الليف البلوري الفوتوني ذو ترتيب ثقب الهواء بشكل تجزيئي بحسب سجادة سيرينسكي عندما (s=2)، (f) التوزيع التجزيئي بحسب سجادة سيرينسكي (s=2).

2. التحليل العددي:

يعطى التشتت بالمعادلة التالية [30]:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial \lambda^2} \quad (3)$$

حيث أن (λ) و (c) هي طول الموجة و سرعة الضوء على الترتيب، و (n_{eff}) هو قرينة الانكسار الفعالة لليف، و يمكن الحصول على (n_{eff}) للنمط من المعادلة التالية [30]:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (4)$$

حيث (β) هو ثابت الانتشار على طول محور الليف، و (k_0) هو العدد الموجي للفراغ الحر والذي يعطى بالمعادلة التالية [30]:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

والضوء المقاد داخل القلب والذي يملك دليل انكسار فعال (n_{core}) يجب أن يحقق الشرط التالي [30]:

$$n_{clad} < \frac{\beta}{k_0} < n_{core} \quad (6)$$

حيث أن (n_{clad}) دليل الانكسار الفعال للغلاف الذي يرتبط بالنمط المالى الاساسي (Fundamental Space (Filling mode (FSM))، ونلاحظ في حالة الليف البلوري الفوتوني ذي التوجيه بقرينة الانكسار، فإن قرينة انكسار الغلاف لا تبقى ثابتة كما في حالة الليف التقليدي، وذلك بسبب احتوائه على الثقوب الهوائية في مادة السيليكا، فتتغير قرينة انكسار الغلاف بين قيمتين الأولى هي قرينة انكسار الهواء، والثانية هي قرينة انكسار السيليكا. أما خسارة الحصر فتعطى بالعلاقة [31]:

$$L_c = -20 \log_{10} e^{-K_0 \cdot Im[n_{eff}]} = 8.686 \cdot K_0 \cdot Im[n_{eff}] \quad (7)$$

علماً أن $Im[n_{eff}]$ هو القسم التخيلي لقرينة الانكسار الفعالة.

1-2- النسبة المائلة للهواء:

هي النسبة بين المساحة الهوائية الكلية الناتجة عن ثقوب الهواء الموجودة في الليف والمساحة الكلية للمقطع العرضي للليف، وهي تؤثر بشكل كبير في قرينة الانكسار الفعالة، وتعطى بالعلاقة التالية [31]:

$$AFF = \frac{A_{hole}}{A_{cell}} \quad (8)$$

إذ تمثل A_{hole} مساحة ثقب الهواء في مثلث الوحدة و A_{cell} مساحة مثلث الوحدة وتعطى مساحة ثقب الهواء بالعلاقة التالية [31]:

$$a_{hole} = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4} \quad (9)$$

إذ r هو نصف قطر ثقب الهواء.

وبما أن مثلث الوحدة يغطي 180° درجة من مساحة الثقب الهوائي الدائري أي نصف مساحته تكون مساحة الثقب الهوائي في مثلث الوحدة [31]:

$$A_{hole} = \frac{a_{hole}}{2} = \pi \frac{d^2}{8} \quad (10)$$

ومن أجل الليف ذو الترتيب السداسي تكون مساحة مثلث الوحدة [31]:

$$A_{cell} = \frac{1}{2} \Lambda^2 \times \sin(60) = \frac{\sqrt{3}}{4} \Lambda^2 \quad (11)$$

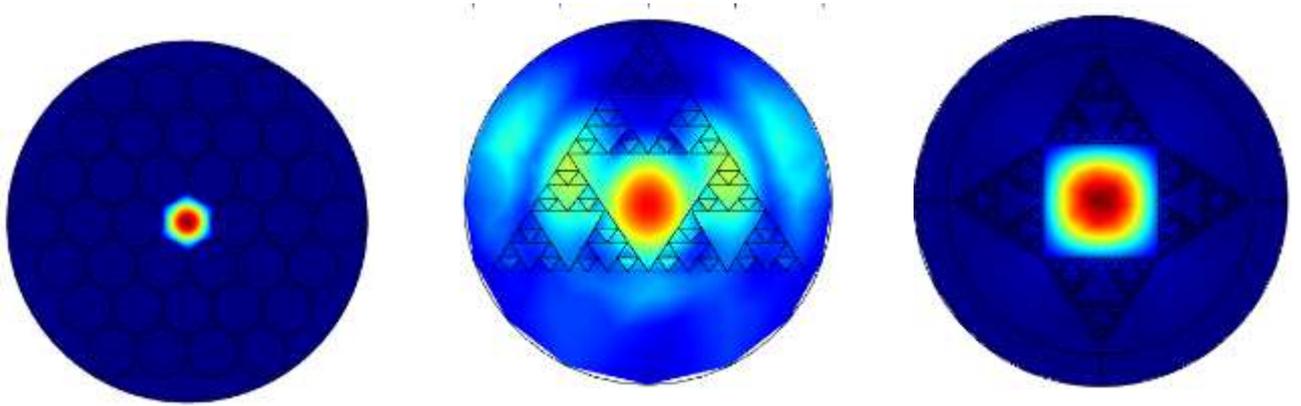
فتكون النسبة المائلة للهواء لحلقة واحدة من الليف هي [31]:

$$AFF_{Hexa} = \frac{\frac{\pi d^2}{8}}{\frac{\sqrt{3}}{4} \Lambda^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 = 0.9069 \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 \quad (12)$$

اما بالنسبة لليف التجزئي فيتم حساب النسبة المائلة للهواء بشكل حسابي عن طريق حساب نسبة الهواء الموجودة في المقطع العرضي إلى نسبة السيليكا وتساوي 2.74 في حالة (s=1) و 16.323 عندما (s=2).

النتائج والمناقشة:

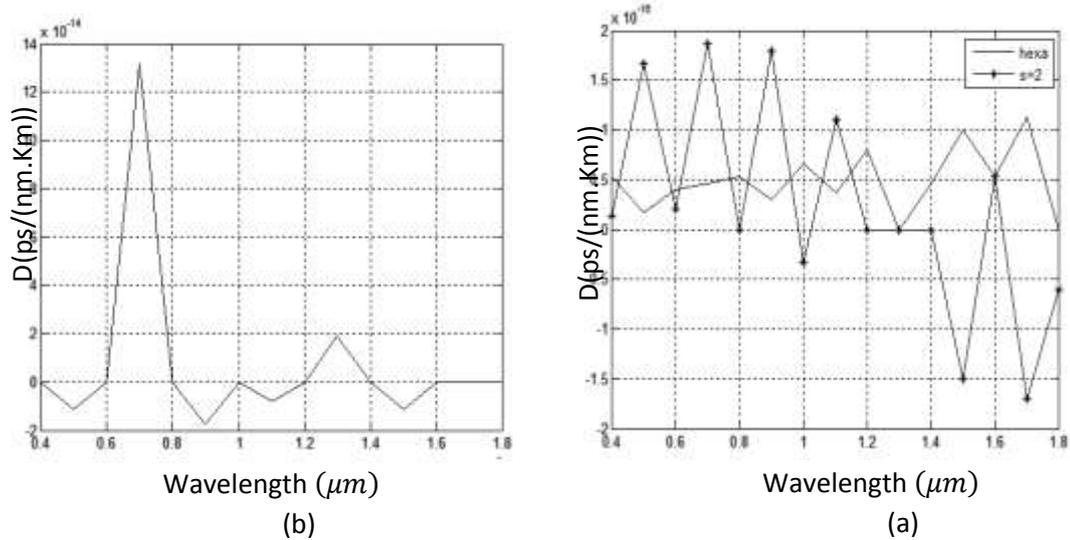
يوضح الشكل (4) بنى الألياف البلورية الفوتونية المدروسة، ونجد أن توزع الحقل الكهربائي محصور في مركز القلب.



ونلاحظ أن النمط محصور تماماً في القلب الدائري والمربع، أي في الليفين السداسي والتجزئي من الدرجة الثانية، مقارنة مع الليف التجزئي من الدرجة الأولى الذي يكون فيه شكل القلب مثلثاً.

1- التشتت :

بحسب المعادلة (3) يمكن حساب عامل التشتت للألياف المدروسة لنحصل على المنحنيات التالية التي تظهر تابعة عامل التشتت اللوني لطول الموجة:

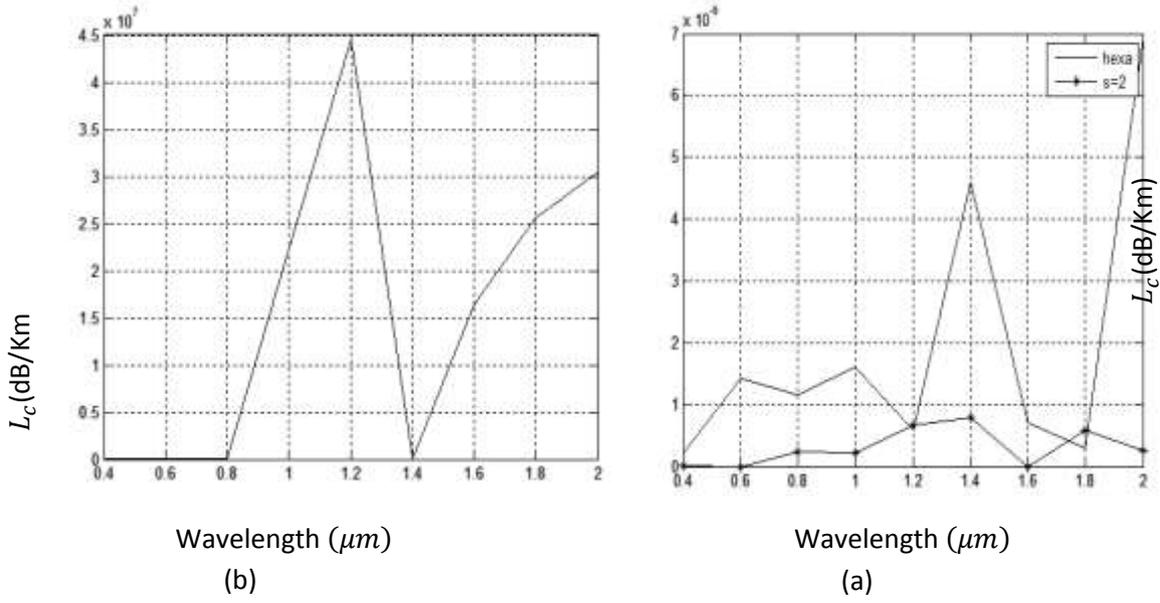


الشكل (6) منحنى عامل التشتت : (a) الليفين السداسي و التجزئي من الدرجة الثانية، (b) الليف التجزئي من الدرجة الأولى.

نلاحظ أن عامل التشتت اللوني للمنحنيات غير مسطح إلا في مجالات معينة لأطوال الموجة موضحة بالجدول (1)، ولكن قيمه صغيرة وقريبة من الصفر للليفين السداسي والتجزئي من الدرجة الثانية.

2- خسارة الحصر :

يمكن حساب خسارة الحصر بحسب المعادلة (7) لنحصل على المنحنيات التالية التي تظهر تابعة عامل خسارة الحصر لطول الموجة:



الشكل (7) منحنى خسارة الحصر: (a) الليفين السداسي والتجزيئي من الدرجة الثانية، (b) الليف التجزيئي من الدرجة الأولى. نلاحظ أن قيم خسارة الحصر للمنحنيات غير مسطح إلا في مجالات معينة لأطوال الموجة للألياف المدروسة موضحة بالجدول (2)، ولكن قيمه صغيرة وقريبة من الصفر لليفين السداسي والتجزيئي من الدرجة الثانية. ويمكن تلخيص النتائج التي حصلنا عليها بالجدول التالي:

الجدول(1): تلخيص نتائج عامل التشتت للألياف المدروسة

الأطوال الموجية الصفرية	قيم عامل التشتت عندما يكون المنحني مسطحاً	مجال الاطوال الموجية التي يكون عندها منحنى التشتت مسطح	الليف السداسي
$1.3\mu m$	-	المنحني غير مسطح	الليف التجزيئي (s=1)
$(0.4,0.6,0.8,1,1.2,1.4)\mu m$ $(1.6 - 1.8)\mu m$	صفر	$(1.6 - 1.8)\mu m$	الليف التجزيئي (s=2)
$(0.8,0.98,1.02,1.57,1.63)\mu m$ $(1.2 - 1.4)\mu m$	صفر	$(1.2 - 1.4)\mu m$	

الجدول(2): تلخيص نتائج خسارة الحصر للألياف المدروسة

الأطوال الموجية الصفرية	قيم خسارة الحصر عندما يكون المنحني مسطحاً	مجال الاطوال الموجية التي يكون عندها منحنى خسارة الحصر مسطح	الليف السداسي
-	-	غير مسطح	الليف التجزيئي (s=1)
$1.4\mu m$	صفر	$(0.4 - 0.8)\mu m$	الليف التجزيئي (s=2)
$1.6\mu m$	صفر	$(0.4 - 0.6)\mu m$	

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- درس هذا العمل ألياف بلورية فوتونية ذات ترتيب سداسي وتجزئي بحسب توزع سجادة سيرينسكي لتقريب الهواء في الغلاف، ووجدنا من النتائج السابقة والجدولين (عامل التشتت و خسارة الحصر) أن:
- ✓ الليف ذو الترتيب التجزيئي لتقريب الهواء عند درجة التجزيء ($s=2$) يملك قيم أفضل لعامل التشتت وخسارة الحصر كما هو موضح بالجدول السابقة.
 - ✓ نلاحظ أن الليف السداسي والتجزئي من الدرجة الثانية لهما قيم عامل تشتت وخسارة الحصر صغيرة مقارنة بالليف التجزيئي من الدرجة الأولى.
 - ✓ نستنتج أنه يمكن استخدام الليفين ذو التوزيع التجزيئي لتقريب الهواء من درجة التجزيء الأولى والثانية في مجال الاتصالات ونقل المعلومات، وذلك حسب مجال الأطوال الموجية المرغوبة، ونستنتج الليف ذو الترتيب السداسي لان منحنيين التشتت والخسارة غير مسطحين.
 - ✓ كما نلاحظ أن الأطوال الموجية الصفرية كانت ضمن مجال الاتصالات الضوئية والنوافذ الثلاث المذكورة سابقاً، وتختلف بحسب الخاصية الضوئية المدروسة (عامل التشتت أو خسارة الحصر).

References:

- [1] Da,Jianan, Ma Qichang, Luo Aiping, *Nearly non-dispersive propagation of Pearcey–Gaussian pulses in optical fibers close to the zero dispersion point*. Optics Communications. China.2020.
- [2] A Djordjevich, A Simović, A Savović. *Infrared wavelength dependence of leaky mode losses and steady state distribution in W-type glass optical fibers*. Optics Communications,China.2018.
- [3] D Suslov, D Komanec, *.Exact modeling of photonic crystal fibers for determination of fundamental properties*. Optical Fiber Technology, Czech Republic .2020.
- [4] I Yakasai, K Abas, E Suhaimi, H Begum. *Low loss and highly birefringent photonic crystal fiber for terahertz applications*. Optik. Brunei Darussalam.2020.
- [6] A Horovistiz, A Laranjeira, S Davim, *. 3-D reconstruction by extended depth-of-field in tribological analysis: Fractal approach of sliding surface in Polyamide66 with glass fiber reinforcement*. Polymer Testing. Portugal .2018.
- [7] A. D Soriano, A. Ortiz-Mora, A. Dengra. *"A new low-dispersion and large-effective-area PCF based on a fractal design"* Campus de Rabanales ,Spain 2014.
- [8] S. Olyae, M. Sadeghi, and F. Taghipour. *"Design of Low-Dispersion Fractal Photonic Crystal Fiber"* Nano-photonics and Optoelectronics Research Laboratory, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tehran, Iran 2012.
- [9] Ji Fan, Xu Yang, Yong Liu. *"Fractal calculus for analysis of wool fiber: Mathematical insight of its bio mechanism"* Journal of Engineered Fibers and Fabrics. China. 2019.
- [10] O, F William, J. Carvalho , R. Mejía-Salazar. *" Surface Plasmon Resonances in Sierpinski-Like Photonic Crystal Fibers: Polarization Filters and Sensing Applications"* .National Institute of Telecommunications, Brazil; 2020.
- [11] N WATARI, A TAKANO, A NAITO, T WATANABE, *." Fractal photonic bandgap fibers"* Research & Innovation Center, Mitsubishi Heavy Industries, Japan 2020.

- [12] O. F William, J. R Carvalho, "**Plasmonic Modal and Polarization Filter Based on a Fractal-Like Photonic Crystal Fiber**" OSA Technical Digest, Washington, DC United States 2020.
- [13] M. J Leon, M Kabir. **Design of a liquid sensing photonic crystal fiber with high sensitivity, birefringence & low confinement loss**. Sensing and Bio-Sensing Research, Bangladesh.2021.
- [14] S Liang, Y Yang, S Kang. **Influences of Asymmetrical Geometric Structures on the Birefringence of Index-Guiding Photonic Crystal Fiber**. Optik. China .2019.
- [15] F. A Mou., M Rahman. **Development of a photonic crystal fiber for THz wave guidance and environmental pollutants detection**. Sensing and Bio-Sensing Research, Bangladesh. 2022.
- [16] K Razminia, K Razminia, A Shiryaev. **Application of Fractal Geometry to Describe Reservoirs with Complex Structures**. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. Iran.2019.
- [17] T Babadagli .**Unravelling transport in complex natural fractures with fractal geometry: A comprehensive review and new insights**.Journal of Hydrology, Canada.2021.
- [18] Y Xia, Y Cai, J Perfect. **Fractal dimension, lacunarity and succolarity analyses on CT images of reservoir rocks for permeability prediction**. Journal of Hydrology, China. 2019.
- [19] N Souza, M Anselmo, V Mello, R Silva. **Analysis of fractal groups of the type within the framework of Kaniadakis statistics**. Physics Letters A, Brazil.2014.
- [20] N Foster, N Sebastia-Saez, D Arellano-Garcia. **Fractal branch-like fractal shell-and-tube heat exchangers: A CFD study of the shell side performance**. IFAC PapersOnLine. Germany .2019.
- [21] R Gurjar, D Upadhyay K Kanaujia. **A Compact Modified Sierpinski Carpet Fractal UWB MIMO Antenna with Square-shaped Funnel-like Ground Stub**. AEU - International Journal of Electronics and Communications, India, 2022.
- [22] J Salini, S Natarajamani, A Vaitheeswaran . **Minkowski Fractal Circularly Polarized Planar Antenna for GPS Application**. Procedia Computer Science, India .2018.
- [23] S HUMPHRIES. **Finite Element Methods for electromagnetics**. CRC Press, USA, 2010
- [24] S Mishram, S SINGH. **Designing of Index Guiding Photonic Crystal Fiber by Finite Element Method Simulation**. Advanced Networking and Applications. India.
- [25] M Mollah, A Yousufali, M Ankan, M Rahman, H Chakrabarti,. **Twin core photonic crystal fiber refractive index sensor for early detection of blood cancer**. Sensing and Bio-Sensing Research, India.2019.
- [26] W NORIKO, T AKEMI . **Fractal photonic bandgap fibers** .Optics Express.Japan.2020.
- [27] G Dhanu Krishna, V Mahadevan Pillai, P; Gopchandran,. **Hybrid photonic crystal fiber with elliptical micro air hole as an efficient supercontinuum source**. Optical Fiber Technology, India.2020.
- [28] M KHATUN, N ISLAM. **Propagation Properties and Stress Sensitivity of S-PCF, H-PCF and O-PCF**. Journal Of Communications, Bangladesh, 2012.
- [29] A Kwasi Amoah, K Kofi Akowuah, E Nukpezah, G Haxha, S Ademgil. **A theoretical investigation of a photonic crystal fibre with ultra-flattened chromatic dispersion with three zero crossing dispersion wavelengths**. Optical Fiber Technology, United Kingdom.2019.

- [30] Z Akbar,H Marniam, H Kambiz. *Optimum values of air-filling fraction for photonic crystal fibers with different configurations and fixed number of air rings*. Applied Optics . Arak University of Technology.2014.
- [31] M Rahman; A, Khaleque;T, Rahman .*Gold-coated photonic crystal fiber based polarization filter for dual communication windows*, Optics Communications".Bangladesh. 2020.