

تصميم ألياف بلورية فوتونية ذات تشتت مسطح جداً

الدكتور إحسان شريتح *

رالدا عبوده جعفر **

تاريخ الإيداع 17 / 3 / 2014. قَبْلُ للنشر في 5 / 6 / 2014

□ ملخص □

تعد الاتصالات بالألياف البصرية إحدى الموضوعات التي جذبت الاهتمام بشكل كبير بسبب ميزاتها العديدة ومنها الألياف البلورية الفوتونية التي تتميز بشكل عام بوجود ثقوب هوائية على طولها. ندرس في هذا البحث التشتت اللوني والأطوال الموجية الصفيرية لبنيتين مختلفتين للليف البلوري الفوتوني (المثمنة والمربعة)، وذلك بعد إضافة ثقوب هوائية صغيرة جداً في القلب (اللب)، وتغيير بارامترات البنية بهدف الحصول على تشتت مسطح ومعدوم، وتمت نمذجة هذه البنية للحصول على دليل الانكسار الفعال باستخدام برنامج (Comsol Multiphysics4.2b) ومن ثم حساب التشتت باستخدام برنامج (matlabR2011).

وقد أظهرت الدراسات السابقة أنه بتغيير بارامترات البنية، كالمسافة بين ثقوب متجاورين وأقطار الثقوب الهوائية في الغلاف، يمكن الحصول على أنواع جديدة من الألياف، مثل الألياف مزاحة التشتت والألياف ذات التشتت المسطح والألياف ذات التشتت المسطح جداً ومعوّضات التشتت .

ونجعل عامل التشتت اللوني معدوماً عند إضافة ثقوب هوائية صغيرة في القلب بأقطار $d_c = 0.22[\mu\text{m}]$ و $d_c = 0.42[\mu\text{m}]$ لليف المربع و $d_c = 0.22[\mu\text{m}]$ و $d_c = 0.42[\mu\text{m}]$ و $d_c = 0.82[\mu\text{m}]$ من أجل الليف المثمن.

الكلمات المفتاحية : التشتت اللوني , الأطوال الموجية الصفيرية , طريقة العناصر المنتهية, الألياف البلورية الفوتونية.

*أستاذ - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Photonic Crystal Fibers (PCF) Design with Ultra-Flattened dispersion

Dr. Ihssan Shreitah*
Ralda Aboudeh Jaafar**

(Received 17 / 3 / 2014. Accepted 5 / 6 / 2014)

□ ABSTRACT □

Optical fiber communication system is a subject of growing interest due to its extremely attractive features. Photonic crystal fibers (PCFs) are one type of optical fiber, it is commonly characterized by a series of air holes that running along the fiber length. In this paper we study the chromatic dispersion and zero dispersion wavelengths(ZDW) between different structures(octangle and square) as we add very small air holes in the center and by changing the parameters of the structure in order to obtain zero or flat dispersion and we model and simulate these structures to calculate the effective refractive index using (Comsol Multiphysics 4.2b) program then calculating the dispersion using (matlabR2011)program.

It has been shown that by reshaping the cladding holes, varying the diameters of the holes in one or two rows around the core or changing the refractive index of the holes, different types of specialty fibers can be obtained, such as dispersion shifted fibers (DSFs), non-zero dispersion shifted fibers (NZ-DSFs),dispersion flattened fibers (DFFs), dispersion compensating fibers (DCFs).

We made a zero flattened dispersion curve when we add small air holes in the core with diameters $d_c = 0.22[\mu\text{m}]$, $d_c = 0.42[\mu\text{m}]$ for the square fiber and $d_c = 0.22[\mu\text{m}]$, $d_c = 0.42[\mu\text{m}]$, $d_c = 0.82[\mu\text{m}]$ for the octangle fiber.

Key words: Chromatic Dispersion, Zero Wavelength, Finite Element Method, Photonic Crystal Fibers.

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

**Postgraduate student, Department of communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen, Lattakia, Syria.

مقدمة :

إن الألياف البلورية الفوتونية التي تسمى الألياف المثقوبة جذبت الاهتمام بشكل كبير بسبب مزاياها الكثيرة، وهي تقسم بشكل أساسي إلى نوعين هما الألياف الفوتونية ذات القلب المصمت، والتي تملك قلباً ذا دليل انكسار أعلى من الغلاف الذي يحتوي على ثقوب هوائية مرتبة بشكل معين كالشكل السداسي والمثلث والعشاري أو الحلزوني، ويتم توجيه الضوء بآلية الانعكاس الكلي الداخلي بين القلب والغلاف. والألياف ذات القلب المجوف التي تقوم بحجز الضوء في القلب ذي دليل الانكسار الأقل من الغلاف، وتستخدم هذه الألياف تأثير الفجوة الحزمية الفوتونية في توجيه الضوء [1-2]. ومن تطبيقات الألياف البلورية الفوتونية التحليل الطيفي، وعلم القياسات، والطب الحيوي، والاتصالات، والتصوير، والآلات الصناعية، والتطبيقات العسكرية [3-4].

وبسبب تبعية دليل الانكسار الفعال للطول الموجي وتصميم الألياف البلورية الفوتونية المرنة يمكن الحصول على خواص جديدة ومميزة، مثل العمل بنمط وحيد، واللاخطية العالية، والمساحة الفعالة الكبيرة للقلب، والتشتت اللوني المنخفض السلبي أو المسطح على مجال واسع من الأطوال الموجية، وخسارة الحجز المنخفضة (Low confinement Loss) وغيرها [5].

وبغية التحكم بتشتت الألياف البلورية الفوتونية للحصول على منحنيات تشتت مسطحة أو سالبة، تمت دراسة عدة تصاميم بتغيير بعض بارامترات البنية، مثل تغيير قطر ثقب الهواء وشكله والمسافة بين ثقبين متجاورين وترتيب ثقوب الهواء في الغلاف مما يغير دليل الانكسار الفعال، ونتمكن من التحكم بصفات منحنيات التشتت اللوني و مقدار انحدارها [6].

درس في هذا البحث التشتت اللوني للليف البلوري الفوتوني ذي الترتيبين المثلث والمربع بعد صنع ثلاثة ثقوب صغيرة في مركزه وتغيير أقطارها باستخدام برنامج (COMSOL MULTIPHISICS) الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية.

أهمية البحث وأهدافه :

تأتي أهمية هذا البحث من الحاجة إلى تطوير أنظمة الاتصالات البصرية عريضة الحزمة قادرة على الوصول لمسافات طويلة دون تشوهات كبيرة والتي تعد الألياف البصرية عمادها وإحدى النجاحات التقانية الأساسية في القرن العشرين.

وقد تبين أن الألياف البلورية تتمكن من توجيه الضوء والتحكم به بطرق بسيطة، وأنها ذات خصائص تشتت محسنة مقارنة بالألياف التقليدية، كما حسنت التأثيرات اللاخطية عبر الحجز الشديد للضوء، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات نظم الإرسال لمسافات طويلة ولتطبيقات أخرى، كما أمكن استخدامها في مجالات أطوال موجية غير تقليدية مثل الأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية [7]. إن الهدف العام من دراسة بنيتين مختلفتين للليف البلوري الفوتوني (المثلثة والمربعة)، وبارامترات هندسية مختلفة لكل بنية، وصنع ثقوب هوائية صغيرة في القلب هو الحصول على منحنيات مختلفة للتشتت اللوني، وتحليل النتائج والبيانات لنحصل على تحديد بنية الليف البلوري الفوتوني الذي يتمتع بالتشتت المسطح جداً بفرض استخدامه في الشبكات البصرية المخصصة للمسافات الطويلة.

طرائق البحث و موادہ :

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

مقدمة :

تعد طريقة العناصر المنتهية أسلوباً عديداً لحل جملة المعادلات التفاضلية العادية أو الجزئية، وتعتمد على فكرة تقسيم الوسط المدروس إلى عدد من الأجزاء أو العناصر (Elements)، ويمكن استنتاج سلوك الوسط المستمر الذي تحكمه جملة المعادلات التفاضلية الجزئية أو الكلية المدروسة من التجميع المباشر للحلول العددية للأجزاء أو العناصر المشكّلة له، إذ بدلاً من تقريب المعادلات التفاضلية الجزئية فإن طريقة العناصر المنتهية تقرب حلولها.

على الرغم من أن الفكرة التي تعتمد عليها الطريقة (التحليل بالتجزئة ثم التركيب) قديمة نسبياً، إذ استخدمها الرومان والمصريون القدماء لحل مسائل مختلفة، منها على سبيل المثال حساب مساحة الدائرة من خلال تقريبها إلى عدد من الأشكال الشهيرة، فإنه يصعب تحديد المنشأ الحقيقي لطريقة العناصر المنتهية، إلا أن أول من استعمل تعبير (عنصر منتهي) هو كلوف (Clough) عام 1960، ثم شهدت الستينيات تطوراً كبيراً في طريقة العناصر المنتهية رافقت التطور السريع في الحواسيب الإلكترونية. وكان التركيز في تلك الفترة على استخراج عناصر منتهية جديدة متخصصة، وتطوير طرق حل عددية مختلفة لحل جمل المعادلات الآتية الكبيرة [8].

في السبعينيات من القرن الماضي خرجت طريقة العناصر المنتهية من طور البحث العلمي لتصبح طريقة معتمدة أكاديمياً وفي مجالات متعددة من العلوم الهندسية، وشهدت تلك الفترة تطورات كبيرة في مجال التطبيقات اللاخطية والتطبيقات المتقدمة الأخرى كالتحليل الديناميكي للمنشآت، وشهدت تأسيس عدد كبير من المنشآت العامة للدراسات المتخصصة (الإنشائية وغير الإنشائية)، وقد نال بعضها شهرة دولية، وقامت شركات ومؤسسات علمية خاصة برعاية برامج عناصر منتهية مختلفة التخصص وتطويرها (مثل COMSOL و STRUDL و ADINA و GENYSIS و SAP و ANSYS و ETABS و MATLAB وغيرها). وقد استمر تطور طريقة العناصر المنتهية متسارعاً في الثمانينيات والتسعينيات لتصبح الآن الطريقة الأساسية في التحليل والتصميم في كثير من المجالات والتخصصات العلمية من أهمها منشآت الهندسة المدنية، والصناعات الجوية، وهندسة الجيوتكنيك، وميكانيك السوائل، والمنشآت المائية، والهندسة النووية، والهندسة الميكانيكية، والهندسة الطبية، وهندسة الاتصالات، في مسائل الانتشار الموجي (wave propagation problems) [9].

مبدأ العناصر المنتهية والخطوات الرئيسية في المحاكاة:

تعتمد فكرة العناصر المنتهية (المحدودة) على تقسيم الوسط المستمر المدروس إلى أجزاء منتهية الأبعاد ليتمكن وصف سلوك هذه العناصر الصغيرة كل على حدة ومن ثم استنتاج سلوك الوسط المستمر، وذلك عن طريق التجميع المباشر لأجزائه. ويمكن أن تطبق الطريقة على أي وسط مستمر (continuum)، مثلاً: منشأ هيكلي، أو مستوي، أو حجمي، أو على وسط سائل، وأي مسألة فيزيائية قابلة للوصف عن طريق معادلات تفاضلية. وقد تم تطوير عناصر منتهية خاصة بالمسائل الخطية والمستوية والفراغية، وقد قمت بالاستعانة ببرنامج النمذجة (COMSOL MULTIPHYSICS) الذي يعتمد في الحل على طريقة العناصر المنتهية. ويتضمن هذا البرنامج العديد من النماذج الفيزيائية ونافذة تصميم بمساعدة الحاسوب (Computer-Aided Design (CAD)) من أجل تصميم البنى الهندسية، ويمكننا بواسطته أيضاً الحصول على قيم دليل الانكسار الفعال والمساحة الفعالة للنمط الأساسي المنتشر في الليف [10].

والخطوات الأساسية في محاكاة الألياف البلورية الفوتونية هي :

• 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، فالهواء يملأ الثقوب بينما تتكون باقي مناطق الليف من الزجاج الذي يعتمد دليل انكساره على طول الموجة من خلال معادلة سيلميير (Sellmeier) [14] التي تربط بين دليل الانكسار وطول الموجة المارة في الليف البصري، ولها الشكل العام :

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (1)$$

ويمثل (n) دليل الانكسار و (λ) طول الموجة أما ($B_{1,2,3}$) و ($C_{1,2,3}$) فهي معاملات سيلميير :

$$B_1 = 1.03961212, B_2 = 0.231792344, B_3 = 1.01046945,$$

$$C_1 = 6.00069867 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, C_2 = 2.00179144 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$C_3 = 1.03560653 \times 10^2 \mu\text{m}^2$$

• التشبيك Meshing :

وتعني تقسيم المقطع العرضي للليف إلى مجالات جزئية صغيرة بشكل 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.

• الحل و المعالجة :

يقوم البرنامج بحل معادلة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الاتجاه (Z) بالصيغة الآتية:

$$E_y = A \cos(\omega t - kz) \quad (2)$$

وتمثل (E_y) مركبة الحقل الكهربائي باتجاه y و (A) مطال الموجة و (k) العدد الموجي للموجة في الوسط،

وعندها تكون معادلتا الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في الشكل الآتي:

$$E = E_0(x, y) e^{-j\beta z} \quad (3)$$

$$H = H_0(x, y) e^{-j\beta z} \quad (4)$$

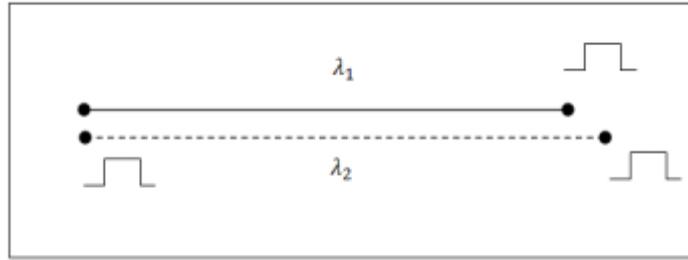
ثم يقوم البرنامج بحساب توزيع الحقل الكهربائي في الليف وحساب الخصائص البصرية مثل دليل الانكسار الفعال والمساحة الفعالة، ويحسب التشتت اللوني عن طريق تعويض قيم دليل الانكسار الفعال، وطول الموجة في العلاقات الرياضية الخاصة بهما، ورسم المنحنيات بمساعدة الماتلاب [11-12].

التشتت (Dispersion) [13-14]:

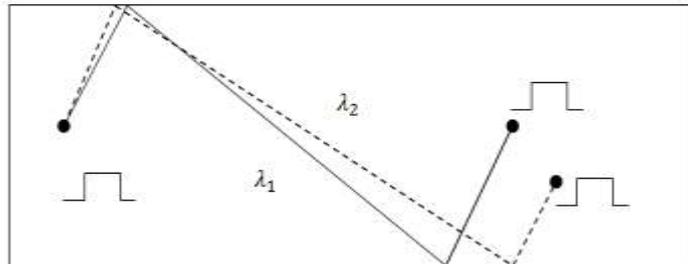
ترسل المعلومات في النظم الرقمية في شكل معطيات ثنائية (Binary data)، وتأخذ شكل نبضات في الليف البصري، وفي مجال الأدلة البصرية يعد التشتت مصطلحاً عاماً يشير إلى ظاهرة توسع (Broadening) النبضات

أثناء انتشارها، مما يؤدي إلى تداخل الرموز وتقييد عرض الحزمة، وهناك فعلياً أربعة أنواع للتشتت هي: التشتت المادي، وتشتت دليل الموجة، والتشتت متعدد المسارات، و تشتت نمط الاستقطاب. ويبين الشكل (1) الأنواع الثلاثة الأولى بشكل تخطيطي بينما يحدث تشتت نمط الاستقطاب في البنى غير المنتظمة للألياف الناجمة عن الضغط أو الانحناء أو الالتواء، و ينجم عن انقسام الطول الموجي إلى نمطي استقطاب و انتشار كل نمط بسرعة مختلفة كما في الشكل (2).

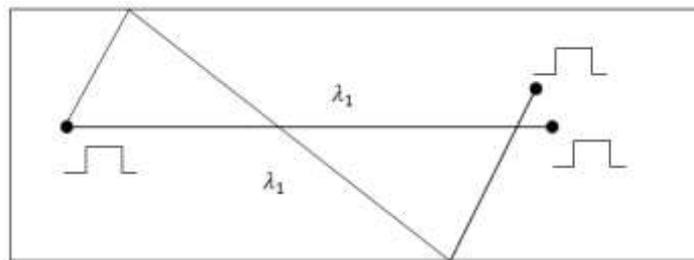
(a) التشتت المادي



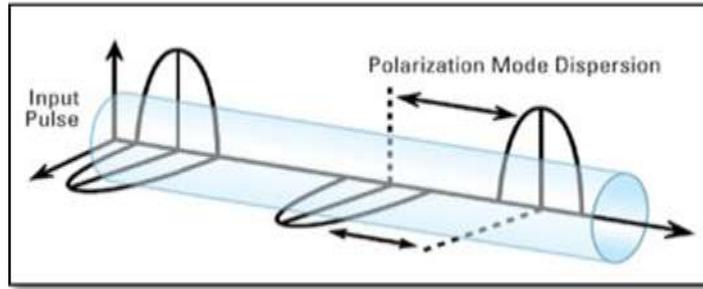
(b) تشتت دليل الموجة



(c) التشتت متعدد المسارات



الشكل (1): (a) نبضات ذات أطوال موجية لها سرعات مختلفة، (b) نبضات بأطوال موجية مختلفة (إلا أنها تنتشر بنفس الأسلوب) تنتشر بزوايا مختلفة قليلاً فتنتج اختلافاً في السرعات المحورية النهائية، (c) نبضة بطول موجة وحيد تتوزع قدرتها إلى أساليب تنتشر بسرعات محورية مختلفة بسبب الاختلافات في المسار.



الشكل(2): تشتت نمط الاستقطاب

إن التشتت اللوني (Chromatic Dispersion) هو المجموع الجبري للتشتتين المادي ودليل الموجة، وعندما يكون التشتت اللوني موجباً فإن الأطوال الموجية القصيرة تنتشر بسرعة أكبر من الأطوال الموجية الطويلة، وفي الحالة المعاكسة تنتشر الأطوال الموجية الطويلة بسرعة أكبر من الأطوال الموجية القصيرة، وفي حالة الليف البلوري الفوتوني نلاحظ أن التشتت اللوني هو التشتت المؤثر في الليف وذلك بسبب ميزة إيجاد ليف ذي نمط وحيد غير منتهٍ بغض النظر عن حجم القلب ولذا ينعدم التشتت متعدد المسارات، هذه الميزة غير موجودة في الألياف التقليدية [13-14].

في نظم الاتصالات البصرية تعد المحافظة على عرض النبضة البصرية أحد الأمور الرئيسية لأنه يؤثر في عرض الحزمة المستخدمة، وإذا حدث توسع للنبضات الضوئية فإنه يؤدي إلى تراكم النبضات ولا يمكن التمييز بينها في الاستقبال. وقد تقدمت الأبحاث في مجال تحسين إدارة التشتت ومن ثم عرض الحزمة وذلك عن طريق استخدام ألياف ذات تشتت صفري أو قريب من الصفر ومعوّضات التشتت عند أطوال موجية معينة.

التحليل العددي [15]:

يعطى عامل التشتت اللوني بالمعادلة الآتية :

$$D = -\left(\frac{\lambda}{c}\right) * \left(\frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial \lambda^2}\right) \quad (5)$$

وتمثل (λ) و (c) طول الموجة وسرعة الضوء على الترتيب، و (n_{eff}) هو دليل الانكسار الفعال للليف، ويمكن الحصول على دليل الانكسار الفعال للنمط من المعادلة الآتية:

$$n_{eff} = \beta / k_0 \quad (6)$$

إذ تمثل (β) ثابت الانتشار على طول محور الليف و (k_0) العدد الموجي للفراغ الحر الذي يعطى بالمعادلة التالية:

$$k_0 = 2\pi / \lambda \quad (7)$$

والضوء المقاد داخل القلب والذي يملك دليل انكسار فعال (n_{eff}) يجب ان يحقق الشرط الآتي:

$$n_{FSM} < n_{eff} < n_{co} \quad (8)$$

وتمثل (n_{co}) دليل الانكسار الفعال للقلب، و (n_{FSM}) دليل الانكسار الفعال للغلاف الذي يرتبط بالنمط المائي الأساسي، ونلاحظ في حالة الليف البلوري الفوتوني ذي التوجيه بدليل الانكسار أن دليل انكسار الغلاف لا يبقى ثابتاً كما في حالة الليف التقليدي، وذلك بسبب احتوائه على الثقوب الهوائية في مادة السيليكا، فيتغير دليل انكسار الغلاف بين قيمتين الأولى هي دليل انكسار الهواء، والثانية هي دليل انكسار السيليكا وذلك بتغيير حجم الثقوب الهوائية، والمسافات الفاصلة بينها، وسوف تنتشر الموجة المستوية المرتحلة في غلاف الليف البلوري الفوتوني اللانهائي بثابت

انتشار يعرف بالنمط المالى الأساسي ((Fundamental Space Filling mode (FSM)، وعندها تعطى قيمة دليل الانكسار الفعال لمادة الغلاف بالعلاقة :

$$n_{FSM} = \frac{\beta_{FSM}}{k_0} \quad (9)$$

خصائص الانتشار للبنى المدروسة للألياف البلورية الفوتونية :

1- البنى المدروسة :

❖ الليف ذو الترتيب المربع (يكون ترتيب حلقات ثقوب الهواء بشكل مربع)

❖ الليف ذو الترتيب المثلث (يكون ترتيب حلقات ثقوب الهواء بشكل مثلث)

علماً أن الألياف المدروسة هي ألياف ذات قلب مصمت وتصنع من مادة السيليكا بدليل انكسار مساو ل $n_2 = 1.45$ وتتكون من ثلاث حلقات للثقوب الهوائية لليف المربع وأربعة حلقات لليف المثلث ويبلغ قطر ثقب الهواء في كل حلقة $(d=1.4\mu m)$ ، والمسافة بين ثقبين متجاورين $(\Lambda = 2.3\mu m)$ ، وقطر القلب $(D_c = 2\Lambda - d)$ ، وتتشكل البنية المثلثة من تكرار مثلث الوحدة حول مركز القلب، فمثلث الوحدة هو مثلث متساوي الساقين طول كل ساق يساوي ثابت الشبكة (Λ) وبزاوية رأس 45° ، أما البنية المربعة فتتشكل من تكرار مثلث الوحدة وهو مثلث قائم الزاوية كما يتضح من الشكل (3).

ويبين الشكل (4) الألياف المدروسة عند صنع ثلاثة ثقوب صغيرة في منتصف القلب في رؤوس مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه $(1.15\mu m)$ لليف المثلث و $(0.6\mu m)$ لليف المربع، والهدف الأساسي من إضافة ثقوب هواء صغيرة ضمن القلب هو تخفيض دليل الانكسار الفعال للقلب الذي يؤدي إلى تغير دليل الانكسار الفعال الكلي لليف ومن ثم إلى تغير التشتت اللوني، وندرس في هذا البحث تغير التشتت اللوني عند تغير طول الموجة في المجال $(0.7[\mu m] \leq \lambda \leq 1.6[\mu m])$ ، وذلك عند تغيير أقطار الثقوب الهوائية الصغيرة بحسب المجال $(0.02[\mu m] \leq d_c \leq 1.2[\mu m])$ بخطوة (0.2) أما تغير توزع هذه الثقوب فلم يدرس.

2- النسبة المائنة للهواء [16]:

هي النسبة بين المساحة الهوائية الكلية الناتجة عن ثقوب الهواء الموجودة في الليف سواء في قلبه أو غلافه، والمساحة الكلية للمقطع العرضي لليف، وكلما نقصت هذه النسبة نقص دليل الانكسار الفعال والذي يؤدي بدوره إلى نقصان التشتت اللوني وعدم تراكم النبضات وهذه النسبة تعطى بالعلاقة الآتية:

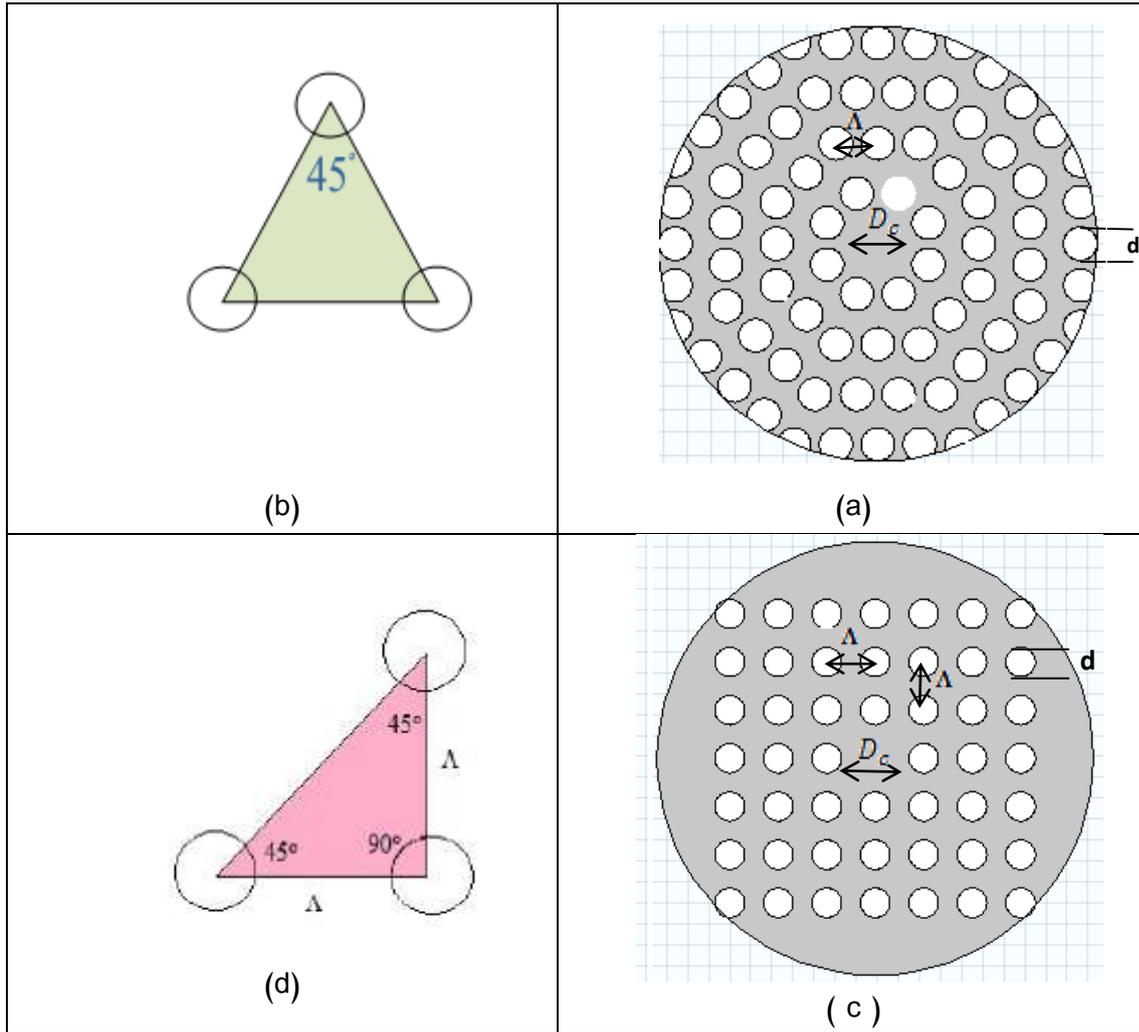
$$AFF = \frac{A_{holes}}{A_{cell}} \quad (10)$$

إذ تمثل (A_{holes}) مساحة ثقب الهواء في مثلث الوحدة و (A_{cell}) مساحة مثلث الوحدة وتعطى مساحة ثقب

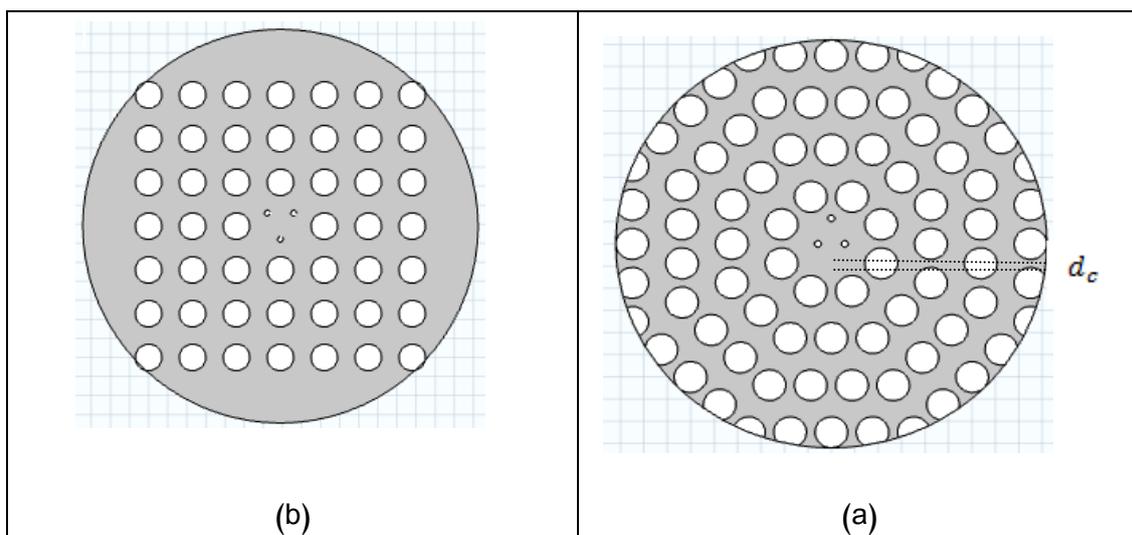
الهواء بالعلاقة الآتية:

$$a_{holes} = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4} \quad (11)$$

إذ (r) هو نصف قطر ثقب الهواء.



الشكل (3): (a) الليف البلوري الفوتوني ذو الترتيب المثلث، (b) مثلث الوحدة لليف ذو الترتيب المثلث، (c) الليف البلوري الفوتوني ذو الترتيب المربع، (d) مثلث الوحدة لليف ذو الترتيب المربع.



الشكل (4): (a) الليف البلوري الفوتوني ذو الترتيب المثلث بوجود ثقب صغيرة في القلب، (b) الليف البلوري الفوتوني ذو الترتيب المربع بوجود ثقب صغيرة في القلب.

وبما أن مثلث الوحدة يغطي (180) درجة من مساحة الثقب الهوائي الدائري أي نصف مساحته تكون مساحة الثقب الهوائي في مثلث الوحدة :

$$A_{hole} = \frac{a_{hole}}{2} = \pi \frac{d^2}{8} \quad (12)$$

ونلاحظ من الشكل (d-3) أن مثلث الوحدة لليف ذي الترتيب المربع هو مثلث يميني ولذا فإن:

$$A_{cell(sq)} = \frac{1}{2} \Lambda^2 \quad (13)$$

وكذلك تكون النسبة المائلة للهواء في حالة الليف البلوري الفوتوني ذي الترتيب المربع :

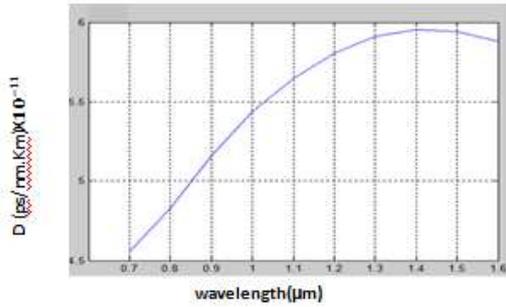
$$AFF_{sq} = \frac{\pi \frac{d^2}{8}}{\frac{1}{2} \Lambda^2} = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 \quad (14)$$

أما من أجل الليف المثلثي فإن:

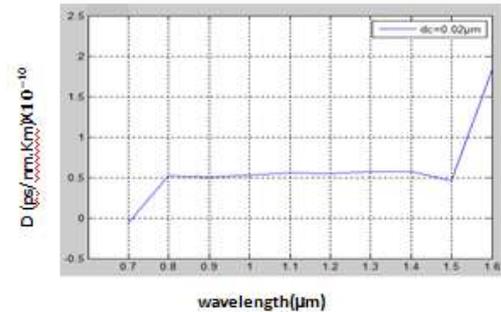
$$AFF_{octa} = \frac{\pi \frac{d^2}{8}}{\frac{1}{2\sqrt{2}} \Lambda^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 \quad (15)$$

النتائج و المناقشة:

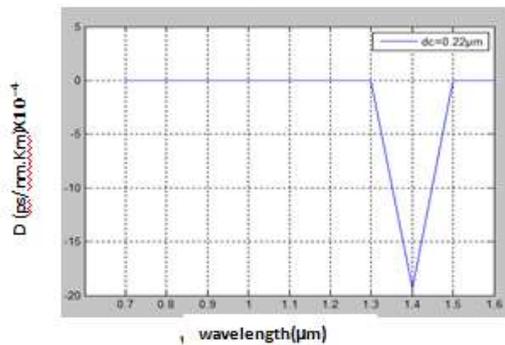
يبين الشكل(5) تغير عامل التشتت اللوني (D) بتابعة طول الموجة (wavelength) في حالة الليف ذي الترتيب المربع، وقد استخدم برنامج COMSOL MULTIPHYSICS بغية الحصول على أدلة الانكسار الفعالة مقابل الأطوال الموجية، ثم استخدم برنامج matlabR2011 من أجل حساب عامل التشتت اللوني الممثل بالمعادلة (5).



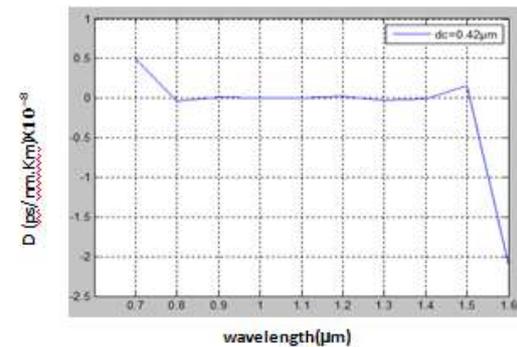
(a)



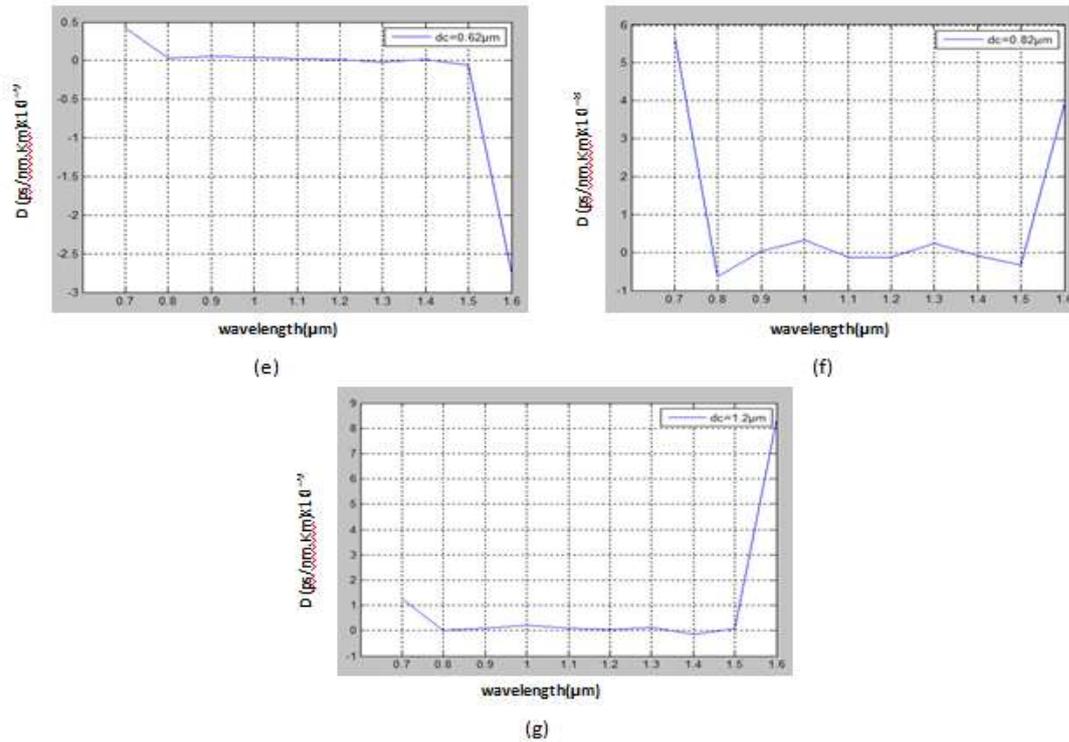
(b)



(c)



(d)



الشكل (5): تغير عامل التشتت اللوني بتابعة طول الموجة: (a) دون وجود ثقب في القلب، (b) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها (dc = 0.02 μm)، (c) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها (dc = 0.22 μm)، (d) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها (dc = 0.42 μm)، (e) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها (dc = 0.62 μm)، (f) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها (dc = 0.82 μm)، (g) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها (dc = 1.2 μm).

ومن الشكل (5) يمكن تقسيم منحنى عامل التشتت اللوني في الحالات (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) إلى ثلاثة أقسام، القسم الأول ضمن المجال $0.7[\mu m] \leq \lambda \leq 0.8[\mu m]$ و القسم الثاني ضمن المجال $0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m]$ أما القسم الثالث فهو ضمن المجال $1.5[\mu m] \leq \lambda \leq 1.6[\mu m]$ كما في الجدول الآتي:

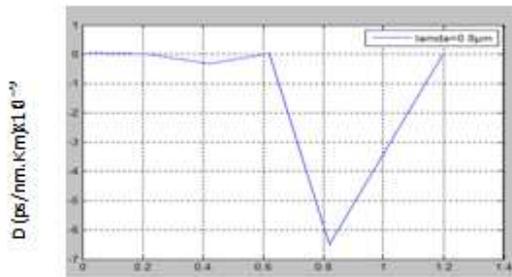
جدول(1): أقسام منحنيات التشتت اللوني في حالة وجود الثقوب الصغيرة في منتصف القلب لليف المربع، وجميع قيم (D) الواردة مقدرة بال Ps/nm.Km

الحالات	القسم الأول	القسم الثاني	القسم الثالث
مجال λ	$0.7[\mu m] \leq \lambda \leq 0.8[\mu m]$	$0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m]$	$1.5[\mu m] \leq \lambda \leq 1.6[\mu m]$
(b)	- يزداد (D) من الصفر إلى القيمة (0.5×10^{-10}) - منعدم عند $(\lambda = 0.72[\mu m])$	مسطح تقريباً عند $(D = 0.5 \times 10^{-10})$	- يزداد ليصل تقريباً إلى $(D = 2 \times 10^{-10})$
(c)	- مسطح و (D) معدوم	- مسطح و (D) معدوم ضمن المجال $(0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 1.3[\mu m])$ - ينخفض (D) إلى القيمة (-20×10^{-4}) تقريباً ضمن المجال $(1.3[\mu m] \leq \lambda \leq 1.4[\mu m])$	- مسطح و (D) معدوم

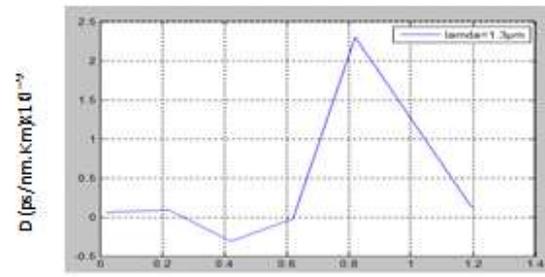
	- يزداد (D) إلى الصفر ضمن المجال $(1.4[\mu\text{m}] \leq \lambda \leq 1.5[\mu\text{m}])$		
(d)	- ينخفض (D) من القيمة (0.5×10^{-9}) إلى الصفر - مسطح و (D) معدوم تقريباً ضمن المجال $(0.8[\mu\text{m}] \leq \lambda \leq 1.4[\mu\text{m}])$ - يزداد (D) إلى القيمة (0.2×10^{-9}) ضمن المجال $(1.4[\mu\text{m}] \leq \lambda \leq 1.5[\mu\text{m}])$	- ينخفض (D) من القيمة (0.5×10^{-9}) إلى الصفر تقريباً	
(e)	- مسطح و (D) معدوم تقريباً	- ينخفض (D) من القيمة (0.5×10^{-9}) إلى الصفر تقريباً	
(g)	- مسطح تقريباً و (D) معدوم	- ينخفض (D) من القيمة (0.2×10^{-9}) إلى الصفر تقريباً	

وقد استبعدنا المنحنيين (a), (f) لأن عامل التشتت اللوني في جميع الأقسام من المنحنيات غير مسطح وغير معدوم وبالنتيجة لا يخدم هدف البحث. ونلاحظ أن إضافة الثقوب الصغيرة في القلب جعلت عوامل التشتت اللوني ثابتة تقريباً في جميع الحالات كما تنعدم في بعض الحالات.

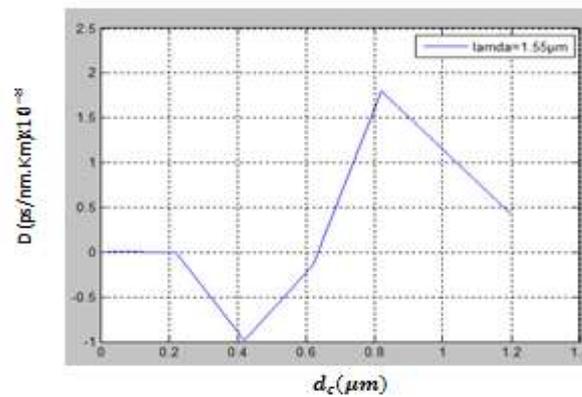
ويبين الشكل (6) تغير عامل التشتت اللوني (D) بتابعية قطر الثقوب الصغيرة (d_c) في النوافذ الثلاث: $(0.8[\mu\text{m}])$ و $(1.3[\mu\text{m}])$ و $(1.55[\mu\text{m}])$ على التوالي:



(a)



(b)



(c)

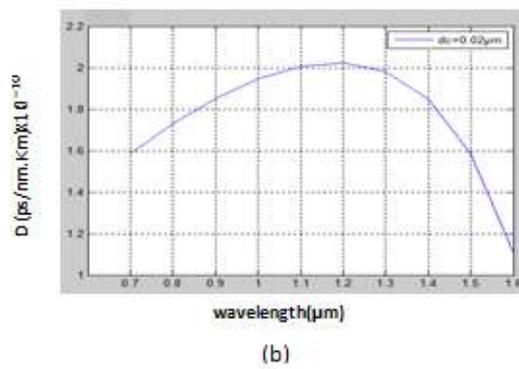
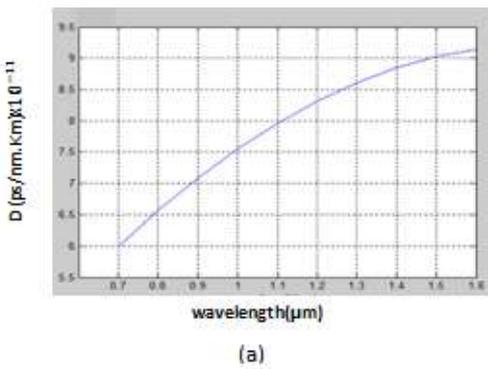
الشكل (6) تغير عامل التشتت اللوني بتابعية قطر الثقوب الصغيرة في القلب: (a) عند الطول الموجي $(\text{lamda}=1.55\mu\text{m})$ ، (b) عند الطول الموجي $(\text{lamda}=1.3\mu\text{m})$ ، (c) عند الطول الموجي $(\text{lamda}=0.8\mu\text{m})$.

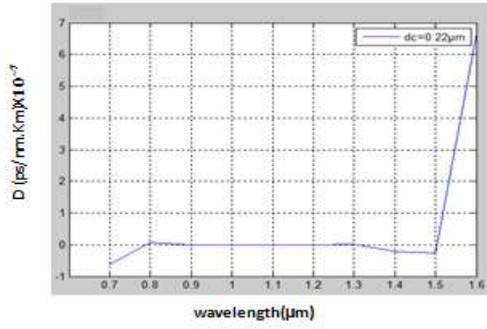
ويمكن أن نعد من هذا الشكل الجدول الآتي:

جدول(2): الأطوال الموجية وأقطار الثقوب التي تحقق أقل تشتت لوني وقيم عوامل التشتت اللوني المقابل

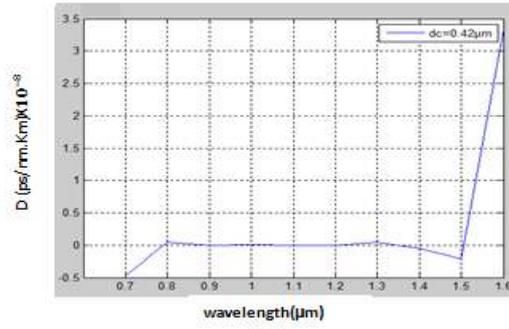
الطول الموجية $\lambda[\mu\text{m}]$	أقطار الثقوب التي تحقق أقل تشتت لوني $d_c [\mu\text{m}]$	قيمة عامل التشتت اللوني الأصغري المقابل (ps/nm.Km)
0.8	$0.02 \leq d_c \leq 0.24$ $d_c = 0.62$ $=1.2d_c$	معدوم تقريباً
1.3	$=1.23d_c$ $d_c = 0.62$	معدوم تقريباً
1.55	$0.02 \leq d_c \leq 0.24$ $d_c = 0.62$	معدوم تقريباً

ونلاحظ أنه عند القطر $d_c = 0.62[\mu\text{m}]$ يحدث تشتت لوني صفري في جميع نوافذ الاتصالات وذلك في حالة الليف المربع، أما في حالة الليف ذي الترتيب المثلث فقد حصلنا على الشكل (7) الذي يظهر أيضاً تابعة عامل التشتت اللوني لطول الموجة عند أقطار مختلفة للثقوب المصنوعة في القلب.

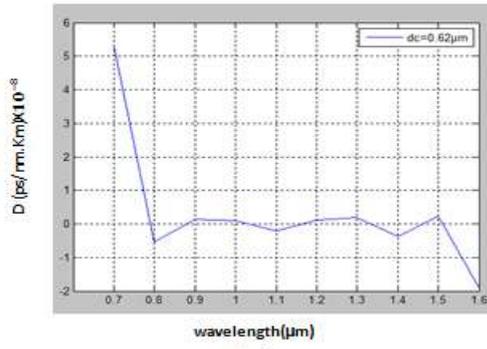




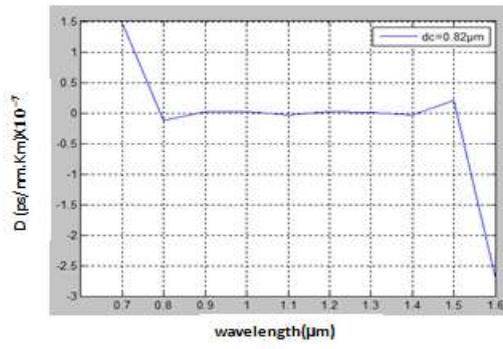
(c)



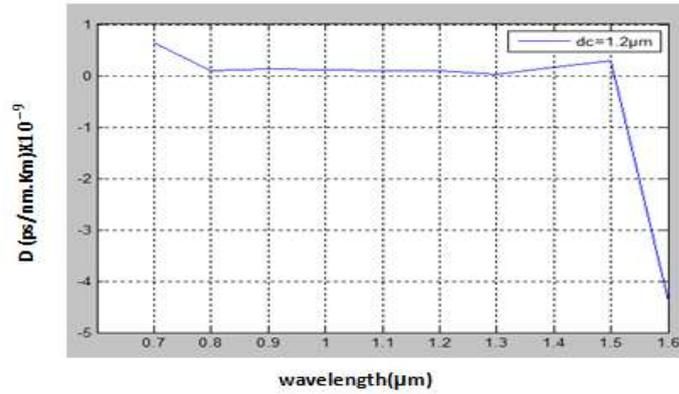
(d)



(e)



(f)



(g)

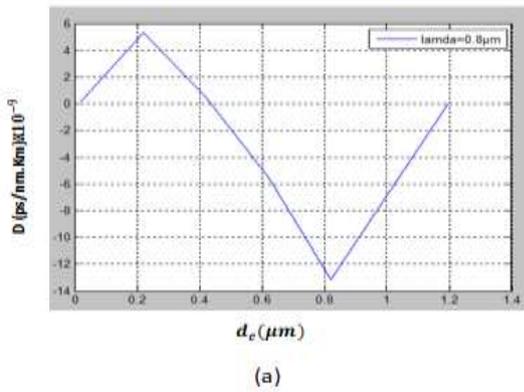
الشكل (7): تغير عامل التشتت اللوني بتابعة طول الموجة: (a) دون وجود ثقوب في القلب، (b) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها ($dc = 0.02\mu\text{m}$)، (c) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها ($dc = 0.22\mu\text{m}$)، (d) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها ($dc = 0.42\mu\text{m}$)، (e) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها ($dc = 0.62\mu\text{m}$)، (f) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها ($dc = 0.82\mu\text{m}$)، (g) بوجود ثلاثة ثقوب في القلب نصف قطر كل منها ($dc = 1.2\mu\text{m}$).

وعلى غرار ما فعلناه مع الليف المربع يمكن تقسيم منحنيات الشكل (7) الخاصة في الليف المثلث في الحالات (c), (d), (e), (f), (g) إلى ثلاثة أقسام، القسم الأول ضمن المجال ($0.7[\mu\text{m}] \leq \lambda \leq 0.8[\mu\text{m}]$)، والقسم الثاني ضمن ($0.8[\mu\text{m}] \leq \lambda \leq 1.5[\mu\text{m}]$)، أما القسم الثالث فهو ضمن ($1.5[\mu\text{m}] \leq \lambda \leq 1.6[\mu\text{m}]$) كما في الجدول الآتي:

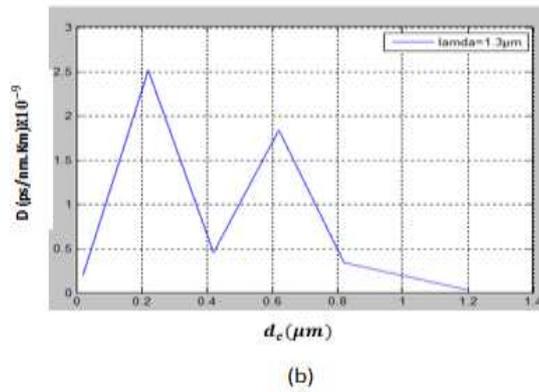
جدول(3): أقسام منحنيات التشتت اللوني في حالة وجود الثقوب الصغيرة
في منتصف القلب للليف المثمن، وجميع قيم (D) الواردة مقدره بال Ps/nm.Km

الحالات	القسم الأول	القسم الثاني	القسم الثالث
مجال λ	$(0.7[\mu m] \leq \lambda \leq 0.8[\mu m])$	$(0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m])$	$(1.5[\mu m] \leq \lambda \leq 1.6[\mu m])$
(c)	- يزداد (D) من القيمة الى الصفر (-0.8×10^{-7})	- مسطح تقريباً و (D) معدوم ضمن المجال - ينخفض (D) إلى القيمة (-0.3×10^{-7}) ضمن المجال $(1.32[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m])$	- يزداد (D) إلى القيمة (6.5×10^{-7})
(d)	- يزداد (D) من القيمة الى الصفر (-0.5×10^{-8})	- مسطح تقريباً و (D) معدوم ضمن المجال - ينخفض (D) إلى القيمة (-0.3×10^{-8}) ضمن المجال $(1.4[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m])$	- يزداد (D) إلى القيمة (3.4×10^{-7})
(e)	- ينخفض (D) من القيمة إلى القيمة (5.3×10^{-8}) (0.5×10^{-8})	- يزداد (D) من القيمة (-0.5×10^{-8}) الى (0.2×10^{-8}) ضمن المجال $(0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 1[\mu m])$ - ينخفض (D) إلى القيمة (-0.2×10^{-8}) ضمن المجال $(1[\mu m] \leq \lambda \leq 1.1[\mu m])$ - يزداد (D) إلى القيمة (0.2×10^{-8}) ضمن المجال $(1.1[\mu m] \leq \lambda \leq 1.3[\mu m])$ - ينخفض (D) إلى القيمة (-0.3×10^{-8}) ضمن المجال $(1.3[\mu m] \leq \lambda \leq 1.4[\mu m])$ - يزداد (D) إلى القيمة (0.2×10^{-8}) ضمن المجال $(1.4[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m])$	- ينخفض (D) إلى ما دون (-2×10^{-8})
(f)	- ينخفض (D) من القيمة إلى القيمة (1.5×10^{-7}) (0.1×10^{-7})	- يزداد (D) من (-0.1×10^{-7}) إلى الصفر تقريباً ضمن المجال $(0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 0.9[\mu m])$ - مسطح تقريباً و (D) معدوم ضمن المجال $(0.9[\mu m] \leq \lambda \leq 1.4[\mu m])$ - يزداد (D) إلى (0.2×10^{-7}) ضمن المجال $(1.4[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m])$	- ينخفض (D) إلى ما دون (-2.5×10^{-7})
(g)	- ينخفض (D) من القيمة إلى القيمة (0.7×10^{-9}) (0.1×10^{-9})	- مسطح تقريباً و (D) ثابت عند القيمة (0.1×10^{-9}) ضمن المجال $(0.8[\mu m] \leq \lambda \leq 1.3[\mu m])$ - يزداد (D) إلى (0.4×10^{-9}) ضمن المجال $(1.3[\mu m] \leq \lambda \leq 1.5[\mu m])$	- ينخفض (D) إلى ما دون (-4×10^{-9})

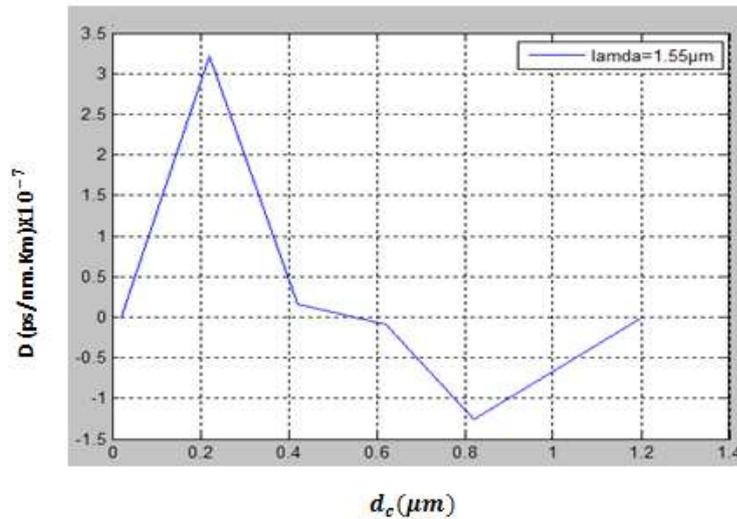
وقد استبعدنا باقي المنحنيين (a),(b) لأن عامل التشتت اللوني في جميع الأقسام من المنحنيات غير مسطح وغير معدوم وبالنتيجة لا يخدم هدف البحث. ونجد في حالة الليف ذي الترتيب المثلث أن صنع الثقوب الصغيرة قد جعل منحنى التشتت اللوني مسطحاً تماماً ومعدوماً في الحالات (c),(d),(f)، أما في حالة عدم إضافة ثقوب في القلب فإن منحنى التشتت يزداد مع زيادة الطول الموجي، وهو غير مسطح، ولا يأخذ عامل التشتت اللوني قيمة صفرية. ويبين الشكل (8) تغير عامل التشتت اللوني (D) بتابعية قطر الثقوب الصغيرة (d_c) في النوافذ الثلاث: (0.8[μm]) و(1.3[μm]) و(1.55[μm]) وذلك للليف المثلث:



(a)



(b)



(c)

الشكل (8) تغير عامل التشتت اللوني بتغير قطر الثقوب الصغيرة في القلب: (a) عند الطول الموجي ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$), (b) عند الطول الموجي ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$), (c) عند الطول الموجي ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$).

ويمكن أن نعد من هذا الشكل الجدول الآتي:

جدول(4): الأطوال الموجية وأقطار الثقوب التي تحقق أقل تشتت لوني وقيم عوامل التشتت اللوني المقابل

القيمة عامل التشتت اللوني الأصغري المقابل (ps/nm.Km)	أقطار الثقوب التي تحقق أقل تشتت لوني $d_c [\mu m]$	الأطوال الموجية $\lambda [\mu m]$
معدوم تقريباً	$d_c = 0.44$ $=1.2d_c$	0.8
معدوم تقريباً	$=1.2d_c$	1.3
معدوم تقريباً	$d_c = 0.56$	1.55

ونلاحظ حدوث تشتت لوني صفري في جميع نوافذ الاتصالات.

الاستنتاجات والتوصيات:

إن التشتت اللوني للألياف البلورية الفوتونية، كما هو معروف، يتناسب طردياً مع دليل الانكسار الفعال ومع عرض الخط البصري للمصدر، ونعتقد بأن صنع الثقوب الهوائية الصغيرة في القلب أدى إلى إنقاص عامل التشتت اللوني وتسطحه، ويبدو أن هناك حداً لأقطار هذه الثقوب، فإذا قمنا بتصغيرها إلى مادون القيمة ($d_c = 0.02[\mu m]$) فإن ذلك يؤدي إلى زيادة دليل الانكسار الفعال للليف مما لا يمكن من تخفيض التشتت اللوني أو تسطّحه، وأما إذا زدنا قطر ثقب القلب إلى أكثر من ($d_c = 1.2[\mu m]$) حيث تشكل مساحة الثقوب أكثر من 30% من مساحة القلب، مما يجعل الضوء ينتشر بألية أخرى وهي تأثير الفجوة الفوتونية بالتشارك مع آلية الانعكاس الكلي الداخلي، ولذلك اقتصرنا في دراستنا على تغيير قطر ثقب القلب ضمن المجال المنوه عنه.

نستنتج ما يأتي :

1. في الليف المربع يكون منحنى التشتت اللوني مسطحاً تقريباً في الحالات (b),(c),(d),(e),(g)، أما في الليف المثلث فالمنحنى مسطح تقريباً في الحالات (c),(d),(e),(f),(g).
2. في الليف المربع حصلنا على تشتت لوني مسطح تقريباً ومعدوماً في الحالتين (c),(d)، أما في الليف المثلث فالمنحنى مسطح تقريباً ومعدوم في الحالات (c),(d),(f).
3. عند القطر $d_c = 0.62[\mu m]$ يحدث تشتت لوني صفري في جميع نوافذ الاتصالات في الليف ذي الترتيب المربع، أما في الليف المثلث فيحدث تشتت لوني صفري في النوافذ الثلاث ولكنه لا يحدث عند القيمة ذاتها لقطر ثقب القلب.

ونوصي في الدراسات اللاحقة بتبع تأثير تغيير توزع الثقوب الهوائية الصغيرة ضمن القلب، وكذلك دراسة بنى أخرى للألياف البلورية الفوتونية كالمسدسة و المعشرة بوجود ثقب القلب.

المراجع:

- [1] SAITOH,K;KOSHIBA,M.*Numerical modeling of photonic crystal fibers*. Journal of Lightwave Technology, Japan,2005,vol. 23, no. 11, pp. 3580 – 3590,.
- [2] RUSSELL,P.*Photonic Crystal Fibers*.Science,USA,2007,358
- [3] POURMAHYABADI,M ;NEJAD,S. *Numerical analysis of index-guiding photonic crystal fibers with low confinement loss and ultra-flattened dispersion by FDFD method*. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering,Iran,2009,vol. 5, no. 3, pp.170-197,.
- [4] OBAYYA,S.;RAHMAN,B; GRATTAN,K.*Accurate finite element modal solution of photonic crystal fibers*.IEEE Proceedings, Optoelectronics,UK,2005,vol. 152, no. 5, pp. 241-246.
- [5] ROJA,M;SHEVGAONKAR,R.*Geometrical Parameters Identification for Zero Dispersion in Square Lattice Photonic Crystal Fiber using Contour Plots*. IEEE Proceedings, Signal processing, Communications and Networking, Chennai,2008,pp. 116 – 118
- [6] NOZHAT, N ;GRANPAYEH ,N. *SPECIALTY FIBERS DESIGNED BY PHOTONICCRYSTALS*.Progress In Electromagnetics Research,Iran, 2009,225-244.
- [7] OYHENART,L ; VIGNÉRAS,V.*Photonic Crystals - Introduction, Applications and Theory*.InTech, France, 2012,344.
- [8] FENNER,R,T. *Finite Element Methods for engineers*.Imperial College Press,London, 1996,190.
- [9] HUMPHRIES,S. *Finite Element Methods for electromagnetics*. CRC Press, USA, 2010,329.
- [10] MISHRA,S,S; SINGH,V,K. *Designing of Index Guiding Photonic Crystal Fiber by Finite Element Method Simulation*. Advanced Networking and Applications India, Vol.2, Issue 3,2010,666-670.
- [11] VIALE.P; FÉVRIER,S; GEROME,F; VILARD,H. *Confinement Loss Computations in Photonic Crystal Fibers using a Novel Perfectly Matched Layer Design*. Paris, 2005.
- [12] BERENGER, J. *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves* . J. Comput. Phys , 114, pp 185-200,1994 .
- [13] KIESER,G. *Optical Fiber Communication*.McGraw_Hill Companies ، 2000,1127.
- [14]MITSCHKE,F. *Fiber Optics Physics and Technology*.Springer ، 2009,288.
- [15] ZOLLA,F;RENVERSEZ,G; NICOLET,A. *Foundations of Photonic Crystal Fibers*. Imperial College Press, Singapore & London,2005,376.
- [16] KHATUN, M; ISLAM,M. *Propagation Properties and Stress Sensitivity ofS-PCF, H-PCF and O-PCF*. Journal Of Communications, Bangladesh, 2012,VOL. 7, NO. 11.