

تصميم ألياف بلورية فوتونية عالية اللاخطية ذات خسارة حصر منخفضة جداً

الدكتور إحسان شريطح*
باسل خالد حجي**

(تاريخ الإيداع 29 / 8 / 2013. قُبِلَ للنشر في 23 / 12 / 2013)

▽ ملخص ▽

الألياف البلورية الفوتونية هي نوع جديد من الألياف البصرية، مصنوعة من مادة واحدة وتحتوي ثقوباً هوائية في الغلاف، تجري في هذا البحث دراسة ومقارنة الخصائص البصرية، مثل المساحة الفعالة وخسارة الحصر واللاخطية، بين ثلاث بنى مختلفة للليف البلوري الفوتوني (البنية السداسية والبنية الثمانية والبنية العشارية) وبياراتات بنوية مختلفة (عدد حلقات الثقوب الهوائية وقطر الثقب الهوائي وثابت الشبكية)، وذلك بهدف استخدام هذا الليف في مضخمات رامان البصرية، تمت نمذجة هذه البنى بالاستعانة ببرنامج

(COMSOL MULTIPHYSICS)، الذي يعتمد في الحل على طريقة العناصر المنتهية.

تبين من نتائج المحاكاة الرقمية أن الليف البلوري الفوتوني ذي البنية العشارية يؤمن اخفض خسارة للحصر واصغر مساحة فعالة بالإضافة إلى أعلى معامل لاخطية وذلك بالمقارنة مع البنيتين الأخرين، وهذا يؤهله لأغلب تطبيقات شبكات الاتصالات البصرية بعيدة المسافة .

الكلمات المفتاحية: خسارة الحصر، المساحة الفعالة، اللاخطية، طريقة العناصر المنتهية، الليف البلوري الفوتوني.

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

High Nonlinear Photonic Crystal Fibers (PCF) Design with Very Low Confinement Loss

Dr. Ihssan Shreitah*
Basel Khaled Haji**

(Received 29 / 8 / 2013. Accepted 23 / 12 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

A Photonic Crystal Fiber (PCF) is a special class of optical fibers which is made of a single material and having air holes in the cladding. This paper studies and compares the optical characteristics such as effective area, confinement loss and nonlinearity, among three different PCF's structures: Hexagonal PCF (H-PCF), Octagonal PCF (O-PCF) and Decagonal PCF (D-PCF) with varied structural parameters (number of the air-holes rings, the air-hole's diameter, and the lattice constant), and the target is to use the fiber in a Raman amplifier. Proposed structures are simulated by using COMSOL MULTIPHYSICS which depends on Finite Element Method (FEM).

The numerically simulated results shows that Decagonal PCF (D-PCF) offers lower confinement loss, lower effective area, and larger value of nonlinearity than the other two structures. It is seen that Decagonal PCF(D-PCF) is suitable for long transmission fiber applications.

Keywords: Confinement Loss, Effective Area, Nonlinearity, Finite Element Method, Photonic Crystal Fibers .

* Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, University of Tishreen, Lattakia: Syria.

** Postgraduate student, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, University of Tishreen, Lattakia: Syria.

مقدمة:

ولدت الألياف البلورية الفوتونية، المعروفة كذلك باسم الألياف المحفورة أو الألياف ذات البنية المجهرية، مؤخرًا اهتمامًا بالغًا في المجتمع العلمي وذلك بفضل الآليات الجديدة التي تؤمنها للتحكم وقيادة الضوء والتي لا يمكن الحصول عليها في الألياف البصرية التقليدية. لم تقتصر تطبيقاتها على مجال الاتصالات ولكنها شملت أيضًا ما يتعلق بعلم القياس والمطيافية والفحص المجهرى وعلم الفلك والتصنيع المجهرى وعلم الأحياء والتحسس. فهي تحتوي على ثقوب هوائية مجهرية ممتدة على طول الليف المصنوع من مادة السيليكا. قد تكون هذه الثقوب مرتبة في منطقة الغلاف المحيطة بالقلب بشكل دوري أو غير دوري. أما آلية قيادة الضوء في القلب فيحددها الفرق في دليل الانكسار بين منطقتي القلب والغلاف، لذا يمكن تصنيف الألياف البلورية الفوتونية إلى صنفين رئيسيين أحدهما ألياف ذات توجيه بقرينة الانكسار وللآخر ألياف ذات توجيه بفجوة الحزمة [1]. تشبه ألياف الصنف الأول الألياف التقليدية لأن الضوء يُحصَر في القلب المصمت بفضل آلية الانعكاس الكلي الداخلي المعدلة ولكن تختلف عنها بأنها يمكن أن تصنع من مادة السيليكا النقية فقط قلبًا وغلافًا. وجود الثقوب الهوائية في منطقة الغلاف يخفض متوسط قرينة انكساره مما يولد فرقًا موجبًا في قرينة الانكسار بين منطقتي القلب والغلاف، ووصفت آلية القيادة بالمعدلة لأن قرينة انكسار الغلاف ليست ثابتة كما في الألياف التقليدية بل تتغير بشكل كبير مع طول الموجة. أما ألياف الصنف الثاني فتتميز بقرينة انكسار للقلب أخفض من تلك الخاصة بالغلاف فيقاد الضوء بآلية مختلفة تمامًا وهي فجوة الحزمة الفوتونية، أي منع مرور الفوتونات بمستويات قدرة معينة توافق أطوالاً موجية متطابقة مع فجوة الحزمة الفوتونية بينما تسمح لأطوال موجية أخرى بالمرور بحرية.

يمكن تغيير الخصائص الهندسية للثقوب الهوائية في المقطع العرضي للليف من حيث الحجم والأبعاد والشكل والتوزيع من الحصول على ألياف بخصائص متعكسة تمامًا. فمثلاً ألياف ذات قلب صغير وثقوب هوائية كبيرة تملك خصائص لاخطية أفضل مقارنة بالألياف التقليدية التي يمكن أن تستخدم بنجاح في عدة تطبيقات مثل التوليد فائق الاستمرارية ومضخمات رامان [2]. عند تصغير الثقوب الهوائية وتكبير المسافات بين مراكزها نحصل على مساحة شكلية كبيرة مفيدة لتوصيل الاستطاعة العالية بشكل مختلف عن الألياف التقليدية، فإن الألياف البلورية الفوتونية بخصائص هندسية ملائمة يمكن أن تكون أحادية النمط بشكل فائق [3] فهي ذات نمط أساسي وحيد يقاد بغض النظر عن طول الموجة والألياف بانكسار تثنائي للضوء بمستويات عالية، ويمكن تصميم ألياف ذات خصائص تشتت بمرونة عالية كتحرك طول موجة التشتت الصفري إلى المجال المرئي والحصول على منحنى تشتت شديد التسطح أو حتى بميل سلبي كبير [4].

أهمية البحث و أهدافه :

تأتي أهمية هذا البحث من الحاجة إلى تطوير أنظمة الاتصالات البصرية عريضة الحزمة وفائقة المسافة وبشكل خاص الألياف البصرية التي كانت أحد النجاحات التكنولوجية الأساسية للقرن العشرين. ففي أواخر ذلك القرن بدت السرعة (أو عرض الحزمة) التي يمكن للليف بصري وحيد نقل البيانات بواسطتها غير محدودة، لذا فإن زيادة عرض الحزمة كانت لوقت طويل مسألة تحسين منابع والمستقبلات. لكن وبالطلب المتزايد بشكل أساسي لعرض حزمة أوسع سوية مع التقدم في الإلكترونيات عالية السرعة والإلكترونيات الضوئية، وتوفر طرق حقن البيانات عالية الكثافة فقد تم الوصول إلى السعة العظمى للألياف البصرية التقليدية التي لم يعد بإمكانها بعد ذلك تقديم سعة أكبر [5].

لحسن الحظ، في الوقت نفسه تقريباً، اكتشفت مبادئ البلورات الفوتونية، مؤدية إلى اقتراح آليات جديدة جذرية لتوجيه الضوء. ففي الثمانينيات من القرن العشرين جذب اهتمام الباحثين إمكانية بناء مواد بأبعادٍ من مرتبة طول الموجة البصرية تعرف بالبلورات الفوتونية، وهي بنى تمنع إرسال فوتونات بأطوال موجية معينة، والسماح لأطوال موجية أخرى بالمرور بكل حرية. فظهر أول ليف ببنية بلورية فوتونية في منتصف التسعينيات اعتمد على الانعكاس الكلي الداخلي في قيادة ضوء ذي شبكة سداسية من الثقوب الهوائية مصمت النواة، ويشكل دليل موجة أحادي النمط عبر مجال عريض من أطوال الموجة. وفي أواخر التسعينيات، ظهر أول ليف بلوري فوتوني مجوف النواة مستند إلى مفهوم فجوة الحزمة الفوتونية في قيادة الضوء.

وقد بدأ أن الألياف البلورية تتمكن من توجيه الضوء والتحكم به بطرق بسيطة، وأنها تملك خصائص تشتت محسنة مقارنة بالألياف التقليدية كما حسنت التأثيرات اللاخطية عبر الحجز الشديد للضوء، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات نظم الإرسال لمسافات طويلة ولتطبيقات المضخمات البصرية، مثل مضخم رامان. كما أمكن استخدامها في مجالات أطوال موجية غير تقليدية مثل الأشعة تحت الحمراء البعيدة وفوق البنفسجية [6].

إن الهدف العام من دراسة ثلاث بنى مختلفة لليف البلوري الفوتوني (البنية السداسية والبنية الثمانية والبنية العشارية)، وبعدد حلقات وبارامترات هندسية مختلفة لكل بنية مع تحديد خصائصها البصرية مثل المساحة الفعالة وخسارة الحصر واللاخطية وصولاً إلى تحليل النتائج والبيانات التي تقود إلى تحديد الليف البلوري الفوتوني الذي يتمتع بأقل خسارة حصر وبأعلى قيمة لمعامل اللاخطية، من أجل استخدامه في الشبكات البصرية فائقة المسافة وفي مضخمات رامان البصرية.

طرائق البحث ومواده :

1-2- نمذجة الألياف البلورية الفوتونية - مسألة ماكسويل المميزة:

يمكن وصف انتشار الضوء في الألياف البلورية الفوتونية بوساطة معادلات ماكسويل. في حال وسط عازل كهربائي، عديم الشحنات أو التيارات، يمكن كتابة الشكل التفاضلي للمعادلات الأربع :

$$\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial B(r, t)}{\partial t} \quad (1a)$$

$$\nabla \times H(r, t) = \frac{\partial D(r, t)}{\partial t} \quad (1b)$$

$$\nabla \cdot B(r, t) = 0 \quad (1c)$$

$$\nabla \cdot D(r, t) = 0 \quad (1d)$$

إذ $E(r, t)$, $H(r, t)$ هما شعاعا الحقلين الكهربائي والمغناطيسي على التوالي، $D(r, t)$, $B(r, t)$ هما حقل الإزاحة الكهربائية، والتحريض المغناطيسي في النقطة التي تبعد r واللحظة الزمنية t . وتعطى العلاقة بين هذه الحقول:

$$D(r, t) = \varepsilon(r) \cdot E(r, t) \quad (2a)$$

$$B(r, t) = \mu \cdot H(r, t) \quad (2b)$$

ويمثل $\varepsilon(r)$ العازلية الكهربائية و μ السماحية المغناطيسية. في اغلب المواد العازلة الكهربائية تُفرض μ ثابتة، أما العازلية الكهربائية فهي بشكل عام تابعة للتردد للزاوي ω ، وشعاع الموضع r ، وتحديد العلاقة الرياضية التي تصف اعتمادها المكاني هي إحدى الصعوبات الأساسية عند نمذجة الليف البلوري الفوتوني. إذ يعود القسم التخيلي للعازلية الكهربائية إلى الخسارة المتعلقة بالمادة (الامتصاص)، ويمكن في حالة عازل كهربائي منخفض الخسارة مثل السيليكا في الجزء من الطيف تحت الأحمر القريب اعتبارها قيمة حقيقية. وبتقديم التمثيل العدي للأشعة \mathbf{E} , \mathbf{H} من خلال :

$$\begin{aligned} H(r, t) &= \text{Re}\{\mathbf{H}(r)e^{j\omega t}\} \\ E(r, t) &= \text{Re}\{\mathbf{E}(r)e^{j\omega t}\} \end{aligned} \quad (3)$$

وبتعويض المعادلة (3) في (1) نحصل على :

$$\nabla \times \mathbf{E}(r) = -j\omega\mu\mathbf{H}(r) \quad (4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r) = j\omega\varepsilon(r, \omega)\mathbf{E}(r) \quad (4b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}(r) = 0 \quad (4c)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r, \omega)\mathbf{E}(r)) = 0 \quad (4d)$$

يمكن من المعادلات السابقة أن نحصل على معادلة انتشار الموجة بدلالة الحقل المغناطيسي :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r, \omega)} \nabla \times \mathbf{H} \right) = \omega^2\mu\mathbf{H}(r) \quad (5)$$

في حالة البنى الثابتة على امتداد المحور z نبحث عن حل للمعادلة (5) من الشكل :

$$\mathbf{H}(x, y, z) = \mathbf{H}(x, y)e^{-j\beta z} \quad (6)$$

إذ يمثل β ثابت الانتشار على طول المحور z . بتعويض المعادلة (6) في (5) نحصل على مسألة القيمة المميزة، إذ $\mathbf{H}(x, y)$ هو الشعاع المميز المرتبط بالقيمة المميزة β . وبما أن ثابت الانتشار للأشكال المتسربة لليف البلوري الفوتوني هو بشكل عام عدد عقدي، فإن قسمه التخيلي يمثل خسارة حصر النمط خلال انتشاره على طول الليف. في حالة وسط متجانس $\varepsilon(r, \omega) = \varepsilon(\omega)$ تخفض المعادلة (5) إلى معادلة هلمهولتز العددية التي يمكن أن تُحل بشكل تحليلي في الإحداثيات الديكارتية أو الأسطوانية إذ يمكن تطبيق الشروط الحدية عند السطوح الفاصلة بين أوساط متجانسة مختلفة، مما يمكن من إنجاز الحل بكامله في شكل تحليلي عند دراستنا للألياف التقليدية أو ألياف براغ. ولكن في حالة الليف البلوري الفوتوني يستحيل التعبير عن الشروط الحدية في شكل تحليلي نظراً للتعقيد البالغ عند تحديد علاقة رياضية لدليل الانكسار المكاني. فالتباين العالي بين أدلة انكسار الألياف 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 [7] ولا بد من تطبيق الطرق الرقمية بغية حل المعادلة (5) وحساب القيم المميزة والأشعة المميزة والخصائص البصرية للبنية.

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

2-2-1- مقدمة :

تعد طريقة العناصر المنتهية أسلوباً عددياً 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 بدلا من تقريب المعادلات التفاضلية الجزئية فان 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 تقريبيها إلى عدد من الأشكال الشهيرة، يصعب تحديد المنشأ الحقيقي لطريقة العناصر المنتهية، فإن أول من استعمل تعبير (عصر منته) هو كلوف (Clough) في 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 الأتية 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 ADINA و STRUDL 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 (WAVEPROPAGATION PROBLEMS) [9].

2-2-2- مبدأ العناصر المنتهية والخطوات الرئيسية في المحاكاة:

تعتمد فكرة العناصر المنتهية (المحدودة) على تقسيم الوسط المستمر المدروس إلى أجزاء منتهية الأبعاد يمكن 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 مستو، 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 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 [10]. وان الخطوات الأساسية في محاكاة الألياف البلورية الفوتونية :

1- تحديد الشكل الهندسي :

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

2- تعريف المجالات الجزئية :

يتضمن تحديد الخصائص الفيزيائية للمواد في كل مجال جزئي، فمثلاً تشير الثقوب البيضاء في الشكل (1) إلى منطقة الهواء، بينما تشير المنطقة الرمادية إلى الزجاج الذي يعتمد دليل انكساره على طول الموجة من خلال معادلة سيلميير (Sellmeier). إن الطبقة الخارجية المحيطة بالبنية هي طبقة المواءمة بشكل كامل (Perfect Matched Layer PML) وهي طبقة امتصاص ومصممة بشكل خاص لمنع انعكاس أي موجة كهرومغناطيسية تسقط عليها بأي تردد وعند أي زاوية سقوط وبأي استقطاب، لقد طرح مفهوم (PML) في العام 1994 من قبل (Berenger) [11],[12].

3- التشبيك Meshing :

وتعني تقسيم المقطع العرضي لليف إلى مجالات جزئية صغيرة بشكل مثلثات، بزيادة عدد هذه المثلثات وتصغير أبعادها تزداد دقة الحل .

4- تحديد المسألة الفيزيائية المدروسة :

وهي في حالتنا مسألة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الأوساط العازلة الكهربائية. وتحديد تردد الإشارة المدروسة.

5- الحل و المعالجة :

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

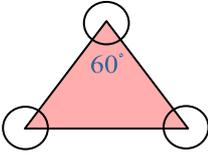
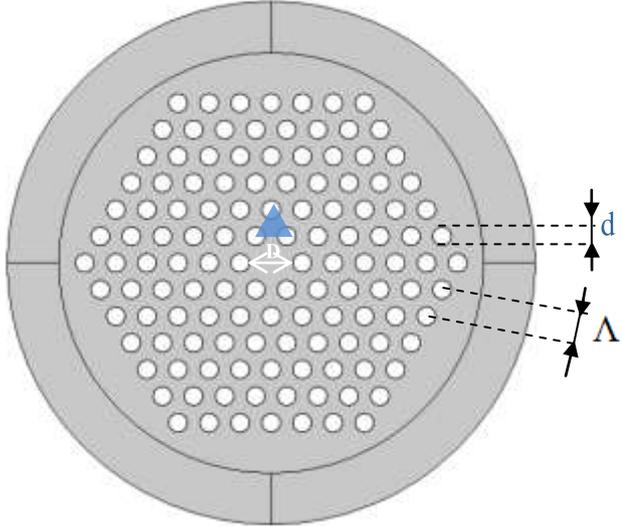
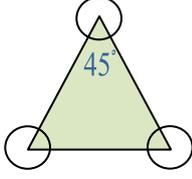
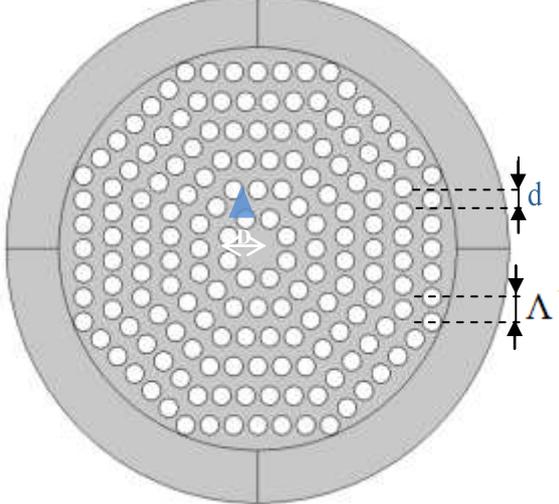
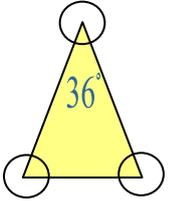
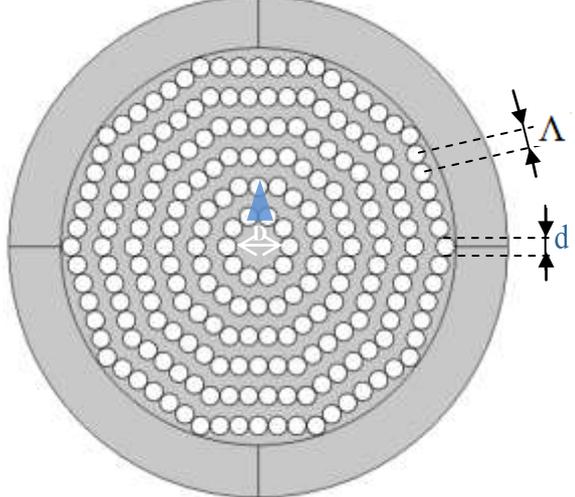
3- خصائص الانتشار للبنى المدروسة للألياف البلورية الفوتونية :

3-1- البنى المدروسة :

بين الشكل (1) البنى المدروسة للألياف البلورية الفوتونية، قطر القلب $d = 2\Lambda - d$ ، ويمثل Λ ثابت الشبكية (المسافة الفاصلة بين ثقبين هوائيين متجاورين في الحلقة الواحدة) و d قطر الثقب الهوائي، تتشكل البنى الثلاث من تكرار مثلث الوحدة حول مركز القلب، مثلث الوحدة هو مثلث متساوي الساقين طول كل ساق يساوي ثابت الشبكية ويزاوية رأس هي 60° و 45° و 36° للبنية السداسية والثمانية والعشارية على التوالي. وقد أحيط كل ليف بطبقة تسمى الطبقة المتلائمة بشكل مثالي، وهي طبقة مصممة بشكل خاص لامتصاص الأمواج الكهرومغناطيسية بدون انعكاسها وبواسطتها نستطيع حساب خسارة الحصر لليف البصري.

تمت دراسة الخصائص البصرية لليف بتأثير تغير طول موجة الإشارة المنتشرة فيه λ ضمن المجال $(1[\mu m] \leq \lambda \leq 2[\mu m])$ وتغير ثابت الشبكية Λ ضمن المجال $(0.8[\mu m] \leq \Lambda \leq 2[\mu m])$ عند ثبات قطر الثقب الهوائي d ، وتغير قطر الثقب الهوائي ضمن المجال $(0.4 \leq \frac{d}{\Lambda} \leq 0.6)$ عند ثبات قيمة ثابت الشبكية، إن النسب $\frac{d}{\Lambda}$ الأكبر من 0.6 لا يمكن تحقيقها في الليف البلوري الفوتوني ذي البنية العشارية، وذلك لأنه عند نسبة أكبر من القيمة 0.6 يزداد قطر الثقب الهوائي وتتداخل الثقوب الهوائية المتجاورة. تتغير قيمة نسبة الجزء المملوء بالهواء (Air Filling Fraction (AFF)) أي النسبة بين المساحة الهوائية الكلية إلى المساحة الكلية للمقطع العرضي لليف بين 33% و 74% وهي تمثل بالعلاقة:

$$AFF = \frac{A_{hole}}{A_{cell}} \quad (7)$$

 <p>مثث الوحدة للبنية السداسية</p>	 <p>المقطع العرضي للليف ذي البنية السداسية (H-PCF)</p>
 <p>مثث الوحدة للبنية الثمانية</p>	 <p>المقطع العرضي للليف ذي البنية الثمانية (O-PCF)</p>
 <p>مثث الوحدة للبنية العشارية</p>	 <p>المقطع العرضي للليف ذي البنية العشارية (D-PCF)</p>

الشكل (1) المقطع العرضي للألياف البلورية الفوتونية المدروسة مع مثث الوحدة لكل بنية.

وتشير A_{hole} إلى مساحة الثقب الهوائي في مثلث الوحدة و A_{cell} مساحة مثلث الوحدة. تتضمن مساحة المثلث نصف مساحة الثقب الهوائي إذا كان الثقب دائرياً فإن :

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

وفي الليف ذي البنية السداسية تكون مساحة مثلث الوحدة :

$$A_{cell} = \frac{1}{2} \Lambda^2 \times \sin(60) = \frac{\sqrt{3}}{4} \Lambda^2 \quad (9)$$

فتكون النسبة المملوءة بالهواء لهذا الليف :

$$AFF_{Hexa} = \frac{\frac{\pi d^2}{8}}{\frac{\sqrt{3}}{4} \Lambda^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 = 0.9069 \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 \quad (10)$$

وفي ليف ذي بنية ثمانية تصبح مساحة مثلث الوحدة.

$$A_{cell} = \frac{1}{2} \Lambda^2 \times \sin(45) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \Lambda^2 \quad (11)$$

فتكون النسبة المملوءة بالهواء :

$$AFF_{Octa} = \frac{\frac{\pi d^2}{8}}{\frac{1}{2\sqrt{2}} \Lambda^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 = 1.1107 \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 \quad (12)$$

أما في الليف ذي البنية العشارية فنحصل على المعادلتين التاليتين :

$$A_{cell} = \frac{1}{2} \Lambda^2 \times \sin(36) = 0.2939 \times \Lambda^2 \quad (13)$$

$$AFF_{Dec} = \frac{\frac{\pi d^2}{8}}{0.2939 \times \Lambda^2} = 1.3362 \times \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^2 \quad (14)$$

ونلاحظ أن

$$AFF_{Hexa} < AFF_{Octa} < AFF_{Dec} \quad (15)$$

2-3- أنماط الانتشار والنمط الأساسي ودليل الانكسار الفعال:

ينتشر الضوء عبر الليف البصري على شكل عدد محدود من الحزم الضوئية أو إشعاعات، وبزاويا معينة ذات قيم محددة. تسمى هذه الإشعاعات أو الحزم الضوئية المختلفة بأنماط الانتشار، حيث يرتبط كل شعاع بنمط انتشار معين. لذلك تستخدم الأرقام الجانبية بجانب اسم النمط لتمييزها بعضها عن بعض. والأنواع الأساسية للأنماط المنتشرة عبر الليف البصري هي :

- أنماط كهربائية عرضية ويرمز لها (TE-modes (Transverse Electric Modes

- أنماط مغناطيسية عرضية ويرمز لها (TM-modes (Transverse Magnetic Modes

- أنماط هجينة (Hybrid) تحتوي المجالين الكهربائي والمغناطيسي من النوع HE

- أنماط هجينة (Hybrid) تحتوي المجالين الكهربائي والمغناطيسي من النوع EH

وكمثال على طريقة تسمية أنماط الانتشار HE_{11} , EH_{12} , TE_{01} ...

في الليف أحادي النمط هنالك نمط واحد من الانتشار وهو HE_{11} وهو أول نمط يبدأ بالظهور والانتشار عبر الليف ولذا يسمى النمط الأساسي المنتشر أو الأول ويتميز الليف أحادي النمط بعدم وجود التشتت الضمني (Intermodal Dispersion) وذلك لوجود نمط وحيد وهكذا لا يوجد أي تأخير أو فروقات زمنية بين الأنماط. ففي حالة الليف البصري التقليدي ذي التوجيه بقرينة الانكسار يرتبط كل نمط منتشر (مقاد) في قلب الليف بثابت انتشار β يحقق الشرط التالي:

$$n_{clad} < \frac{\beta}{k_0} < n_{core} \quad (16)$$

إذ n_{core} دليل انكسار مادة القلب و n_{clad} دليل انكسار مادة الغلاف و $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ هو العدد الموجي في الخلاء أما القيمة $\frac{\beta}{k_0}$ فتسمى دليل الانكسار الفعال (Effective Refractive Index) للنمط المنتشر (المقاد) ويرمز لها n_{eff} .

بينما في حالة الليف البلوري الفوتوني ذي التوجيه بدليل الانكسار فإن دليل انكسار الغلاف لا يبقى ثابتا 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 فالموجة المستوية المرتحلة في غلاف الليف البلوري الفوتوني اللانهائي بثابت انتشار β_{FSM} يعرف بالنمط المائي الأساسي (Fundamental Space Filling mode (FSM)) وعندها تعطى قيمة دليل الانكسار الفعال لمادة الغلاف بالعلاقة $n_{FSM} = \frac{\beta_{FSM}}{k_0}$ وثابت انتشار النمط المقاد في قلب الليف البلوري يحقق العلاقة السابقة ذاتها ولكن بعد استبدال دليل انكسار الغلاف n_{clad} بدليل انكسار النمط المملوء الأساسي لتصبح العلاقة بالشكل التالي [1],[4]:

$$n_{FSM} < n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} < n_{core} \quad (17)$$

3-3- خسارة الحصر :

تنتج الخسارة في الألياف البلورية الفوتونية من أسباب مختلفة، منها الامتصاص المادي الذاتي والخسارة الناتجة من عملية التصنيع بسبب وجود المحتوى المائي ووجود الشوائب والتبعثر الناجم عن خشونة سطوح الثقوب الهوائية وخسارة الحصر الناتجة من العدد المحدود لحلقات الثقوب الهوائية. ففي الألياف المصنوعة من مادة واحدة كما في حالتنا فإن للقلب المادة ذاتها التي تفصل بين الثقوب الهوائية للغلاف أي دليل الانكسار نفسه، لذلك فإن أي نمط ضوئي منتشر في منطقة القلب معرض لأن ينسل قسما من طاقته من منطقة القلب إلى منطقة الثقوب الهوائية وهكذا تشكل كمية التسرب خسارة الحصر. ولكن لحسن الحظ تشير الدراسات والنتائج المخبرية إلى أنه يمكن تخفيض الخسارة الناتجة عن عملية التصنيع وذلك بتحسين طرقها [11]، وكما يمكن التحكم بخسارة الحصر عبر تغيير البارامترات الهندسية للثقوب الهوائية وعدد حلقاتها في الغلاف، ولذلك يخفض التصميم الملائم لبنية الليف خسارة الحصر للليف البلوري الفوتوني إلى مستويات يمكن إهمالها. تحسب خسارة الحصر من القسم التخيلي لدليل الانكسار الفعال n_{eff} بالعلاقة [13]:

$$L_c = -20 \cdot \log_{10} e^{-k_0 \cdot \text{Im}[n_{eff}]} = 8.686 \cdot k_0 \cdot \text{Im}[n_{eff}] \quad \left[\frac{dB}{m} \right] \quad (18)$$

الفعال. $k_0 = 2\pi/\lambda$ هو العدد الموجي في الخلاء و λ طول الموجة بالـ $[\mu\text{m}]$ و $Im[n_{eff}]$ هو القسم التخيلي لدليل الانكسار.

4-3- المساحة الفعالة :

تحسب المساحة الفعالة لليف باستخدام العلاقة [1],[4]:

$$A_{eff} = \frac{(\iint |E_t|^2 dx dy)^2}{\iint |E_t|^4 dx dy} \quad (19)$$

ويمثل E شعاع الحقل الكهربائي المشتق من حل معادلات ماكسويل و E_t المركبة العرضية لشعاع الحقل الكهربائي وتحسب بالعلاقة:

$$E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (20)$$

ويمكن حساب المساحة الفعالة حسب تقريبات (Mortensen) بالعلاقة التالية [14]:

$$A_{eff} = \left(\frac{\lambda^2}{\pi}\right) \left(\frac{1}{n_{eff}^2 - n_{FSM}^2} - 1\right) \quad (21)$$

5-3- التأثيرات اللاخطية في الألياف البصرية [15]:

أصبحت التأثيرات اللاخطية مهمة في حقل الاتصالات البصرية منذ ظهور الألياف البصرية. فقد لاحظها أول مرة العالم (Peter Franklin) بعد ظهور الليزر عام 1960م، فقد كان أول من اكتشف التأثيرات اللاخطية عندما لاحظ توليد التوافقية الثانية أول مرة في بلورة الكوارتز ومنذ ذلك الحين بدأت التأثيرات اللاخطية بالظهور، وتم استعمالها في العديد من الوسائل المهمة.

تنشأ التأثيرات اللاخطية بسبب الحركة اللاتوافقية للإلكترونات المقيدة في المادة عندما تكون كثافة الاستطاعة الضوئية كبيرة كفاية، بغض النظر عن المادة. وبالنتيجة فإن الاستقطاب الكلي P المحرض بواسطة ثنائيات الأقطاب الكهربائية لا يبقى خطياً في الحقل الكهربائي ويعبر عنه بالعلاقة :

$$P = \epsilon_0(\chi^{(1)}.E^1 + \chi^{(2)}.E^2 + \chi^{(3)}.E^3 + \dots) \quad (22)$$

إذ يمثل E الحقل الكهربائي للموجة الساقطة، و $\chi^{(j)}$ القابلية (susceptibility) من المرتبة j للمادة و ϵ_0 العازلية الكهربائية في الخلاء. إن القابلية الخطية $\chi^{(1)}$ هي المساهم المهيمن في الاستقطاب P . تكون القابلية $\chi^{(2)}$ معدوماً في السيليكا بسبب تركيبها الجزيئي المتناظر، مما يعني أن توليد التوافقية الثانية غير ممكن في الألياف البصرية، ومنه تصبح علاقة الاستقطاب الكهربائي :

$$P(E) = \epsilon_0.\chi^{(1)}.E^1 + \epsilon_0.\chi^{(3)}.E^3 \quad (23)$$

تنشأ معظم التأثيرات اللاخطية في الألياف البصرية من دليل الانكسار اللاخطي وهي تشير إلى اعتماد دليل الانكسار \tilde{n} على كل من الطول الموجي λ ومربع الشدة $|E|^2$ ويعطى بالعلاقة التالية :

$$\tilde{n}(\lambda, |E|^2) = n(\lambda) + n_2|E|^2 \quad (24)$$

إذ $n(\lambda)$ هو دليل الانكسار الخطي للمادة والمعتمد على طول الموجة و يعطى بعلاقة (Sellmeier):

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A_1.\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2.\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3.\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad (25)$$

إذ A_1 و A_2 و A_3 تمثل معاملات (Sellmeier) المتعلقة بالتردد الداخلي لذرات المادة عند تعرضها لأشعة خارجية، وتمثل λ_1 و λ_2 و λ_3 ، الأطوال الموجية الناتجة عن هذه الترددات وتعتمد قيم هذه المعاملات على نوع المادة ونسبة الإشابة، ففي السيليكا النقية تكون :

$$A_1 = 0.6961663 @ \lambda_1 = 0.0684043 [\mu\text{m}]$$

$$A_2 = 0.4079426 @ \lambda_2 = 0.1162412 [\mu\text{m}] \quad (26)$$

$$A_3 = 0.8974794 @ \lambda_3 = 9.8961600 [\mu\text{m}]$$

أما n_2 فهي معامل دليل الانكسار اللاخطي المرتبط بالقابلية $\chi^{(3)}$ بالعلاقة :

$$n_2 = \frac{3}{8n} \text{Re}(\chi^{(3)}) \quad (27)$$

وهي قيمة ثابتة تعتمد على مادة الليف، فهي تتغير بين $(2.2 \sim 3.4 \times 10^{-20} [m^2/W])$ وتبلغ قيمتها في السيليكا $(2.8 \times 10^{-20} [m^2/W])$.

يعتمد المعامل اللاخطي للليف البصري على قيمة القسم غير الخطي لدليل الانكسار والمساحة الفعالة للليف. ويمكن حسابه باستخدام المعادلة :

$$\gamma = \left(\frac{\omega}{c}\right) \left(\frac{n_2}{A_{\text{eff}}}\right) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{n_2}{A_{\text{eff}}}\right) \quad (28)$$

يمثل ω التردد الزاوي و $\frac{n_2}{A_{\text{eff}}}$ الثابت اللاخطي. من الممكن تعزيز اللاخطية بتصغير المساحة الفعالة عبر قلب

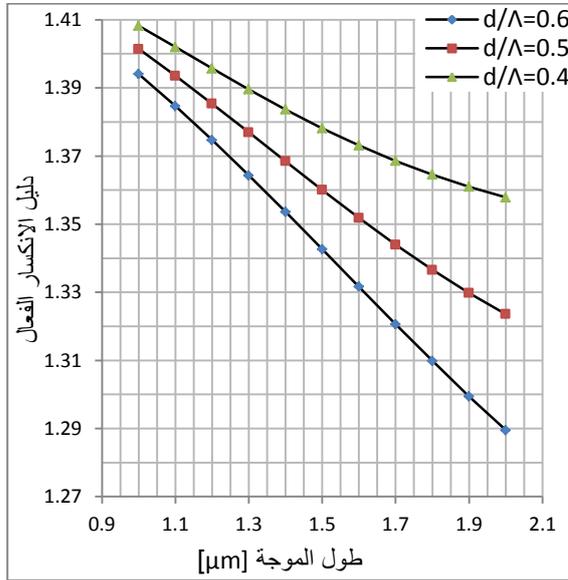
بقطر صغير و بزيادة القسم غير الخطي n_2 لدليل انكسار المادة.

4- النتائج و المناقشة:

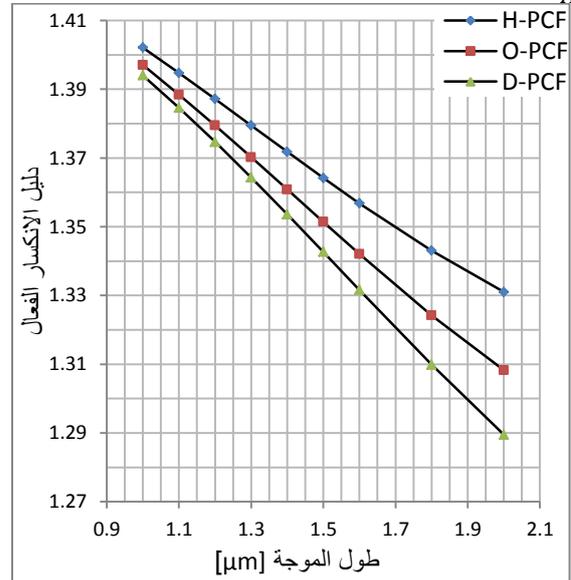
4-1- دليل الانكسار الفعال للنمط الأساسي المقاد:

يبين الشكل (2- أ) تغير دليل الانكسار الفعال بتغير طول الموجة ويظهر أن دليل الانكسار الفعال يتناقص

مع زيادة طول الموجة كما تتناقص قيمة دليل الانكسار الفعال بزيادة قيمة النسبة المملوءة بالهواء أو زيادة قيمة النسبة $\frac{d}{\Lambda}$ كما في الشكل (2-ب).



- ب -



- أ -

الشكل (2) : - أ - تغير دليل الانكسار الفعال بتغير طول الموجة للبنية الثلاث عند $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$, $\Lambda = 1.2 [\mu\text{m}]$ - ب - تغير دليل الانكسار الفعال بتغير طول الموجة وتغير النسبة $\frac{d}{\Lambda}$ للبنية العشارية، $\Lambda = 1.2 [\mu\text{m}]$ و 4 حلقات ثقب هوائية.

2-4- المساحة الفعالة :

يبين الشكل (3-أ) المساحة الفعالة بوصفها تابعاً لطول الموجة، وتابعاً للبارامترات الهندسية Λ و $\frac{d}{\Lambda}$ في البنية السداسية الشكل (3-ب) والثمانية الشكل (3-ج) والعشارية الشكل (3-د)، حيث نلاحظ ما يلي :

- تزداد المساحة الفعالة بازدياد طول الموجة في جميع البنى المدروسة وفي البنية السداسية قيمة المساحة الفعالة هي أكبر من قيمتها في البنيتين الثمانية والعشارية .

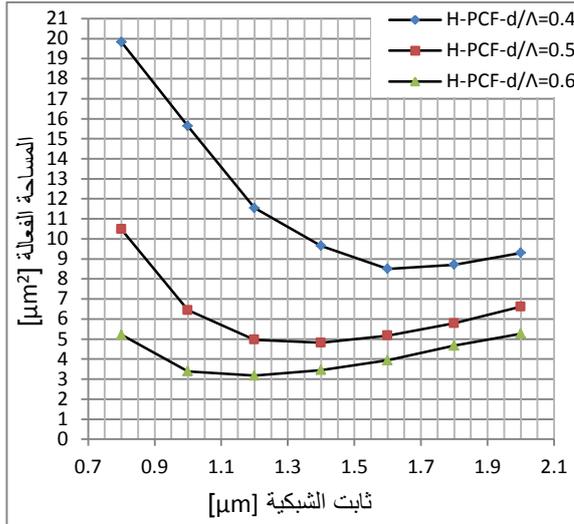
- تتخفض المساحة الفعالة بزيادة النسبة المملوءة بالهواء (أو بزيادة قيمة النسبة $\frac{d}{\Lambda}$) عند جميع قيم ثابت الشبكية Λ .

لا بد لنا هنا أن نفسر سلوك المساحة الفعالة بتغير ثابت الشبكية عند ثبات قيمة $\frac{d}{\Lambda}$ وخاصة عند حالتين:

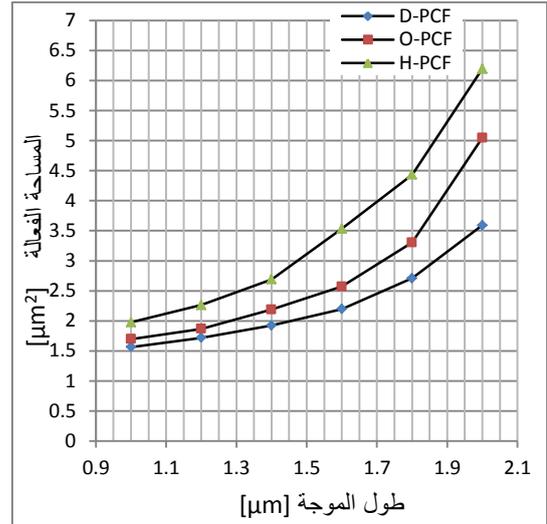
أ- الأولى عندما ($\Lambda \rightarrow 0$) حيث يقترب نصف قطر القلب ($\Lambda - d/2$) من الصفر حيث ($\Lambda - d/2 \rightarrow 0$) وبالنتيجة لا يوجد نمط مقاد و ($A_{eff} \rightarrow \infty$) .

ب- الحالة الثانية عندما ($\Lambda \rightarrow \infty$) يقترب نصف قطر القلب من اللانهاية ($\Lambda - d/2 \rightarrow \infty$) ومن ثم ($A_{eff} \rightarrow \infty$) .

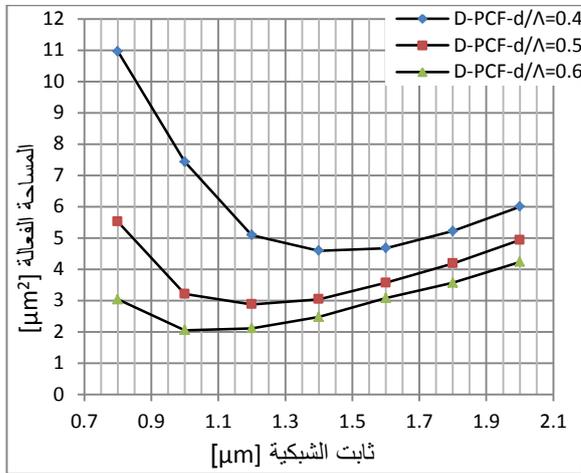
وبين هاتين الحالتين فن النمط المقاد يُحصر في القلب وتصل المساحة الفعالة إلى قيمة محلية صغيرة تبعاً لقيمة ثابت الشبكية [2].



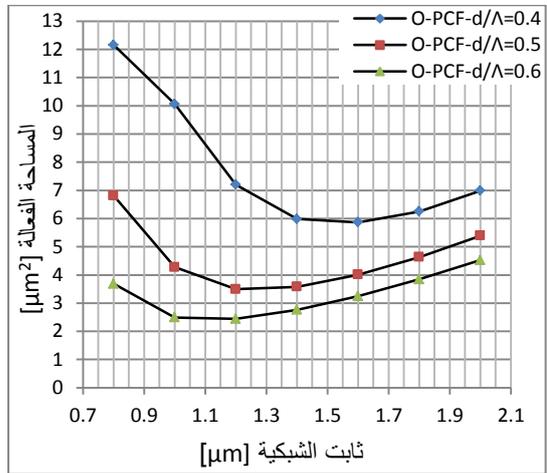
- ب -



- أ -



- د -



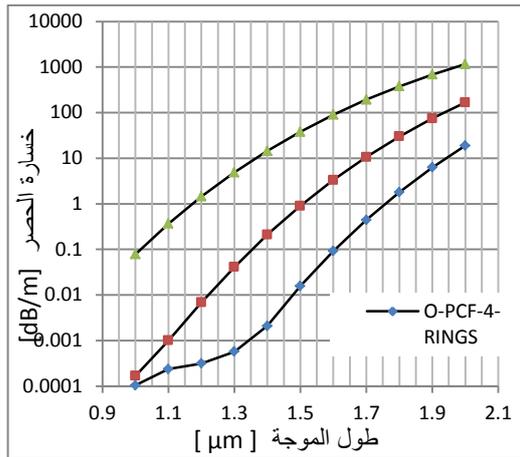
- ج -

الشكل (3) : أ- المساحة الفعالة بتبعية طول الموجة للبنى الثلاث $\Lambda = 1.2 [\mu m]$, $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$, المساحة الفعالة بتبعية ثابت الشبكية Λ والنسبة $\frac{d}{\Lambda}$ في البنية السداسية (ب) والثمانية (ج) والعشارية (د) عند $\lambda = 1.55 [\mu m]$.

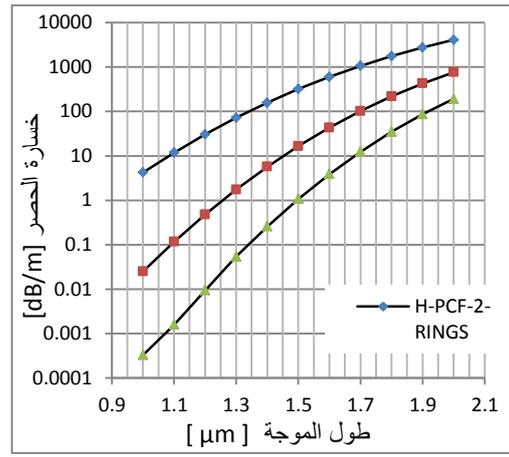
إن المساحة الفعالة لليف البلوري الفوتوني ذي البنية العشارية هي الأصغر مقارنة بالبنيتين السداسية والثمانية وهذا بدوره يؤدي إلى معامل لاخطية أكبر، وتبلغ قيمة المساحة الفعالة لهذا الليف عند طول الموجة $1.55 [\mu m]$ و $\Lambda = 1.2 [\mu m]$, $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ حوالي $2.04 [\mu m^2]$.

3-4- خسارة الحصر :

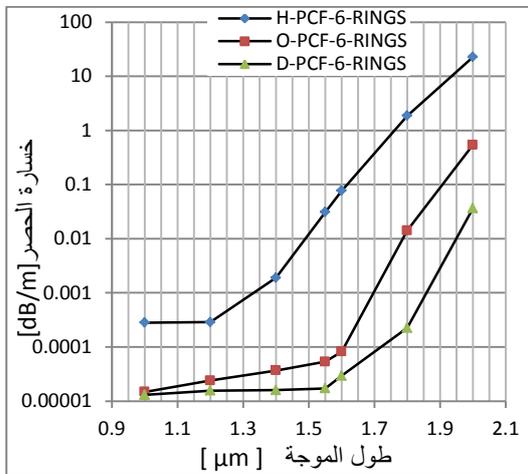
يبين الشكل (4-أ) والشكل (4-ب) والشكل (4-ج) تغير خسارة الحصر في البنية السداسية والبنية الثمانية والبنية العشارية، على الترتيب، بتغير طول الموجة وبتغير عدد حلقات الثقوب الهوائية، ويبين الشكل (4-د) تغير خسارة الحصر في البنى السابقة بست حلقات من الثقوب الهوائية بتغير طول الموجة، ويبين الشكل (4-هـ) تغير كل من خسارة الحصر والمساحة الفعالة للبنية العشارية بست حلقات من الثقوب الهوائية بتغير ثابت الشبكية Λ وثبات النسبة $\frac{d}{\Lambda}$ (المنحنيات المتقطعة)، وبالعكس (المنحنيات المستمرة).



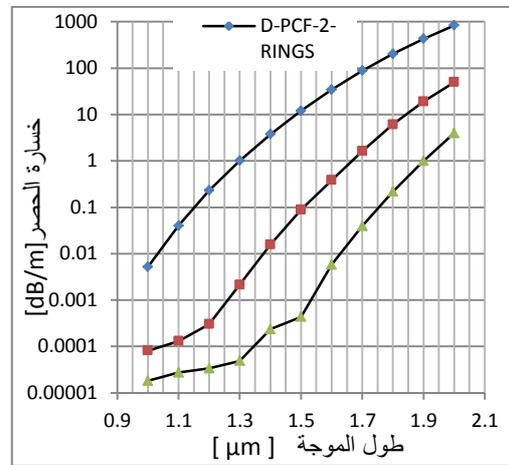
-ب-



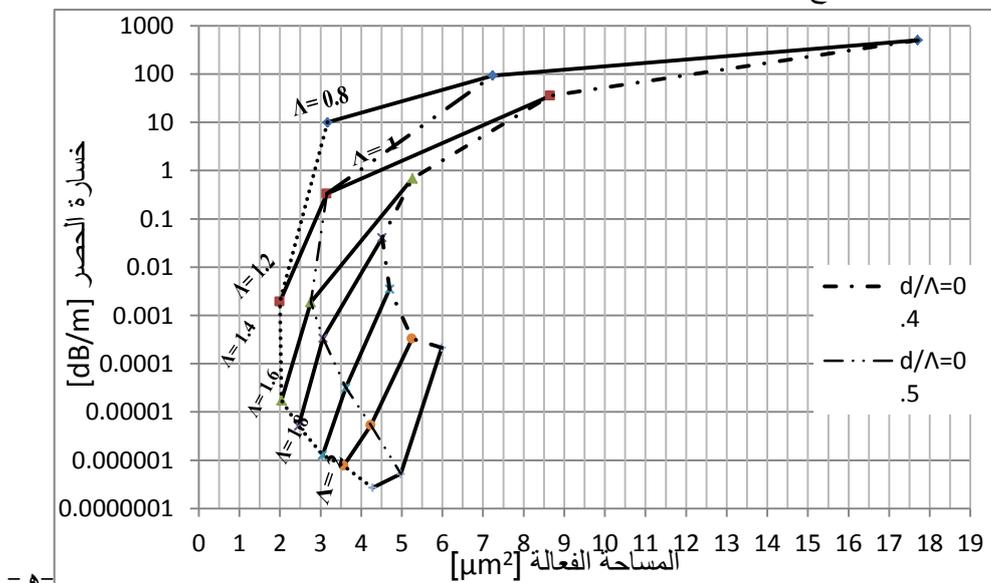
-أ-



-د-



-ج-



-هـ-

الشكل (4): تغير خسارة الحصر بتغير طول الموجة وعدد حلقات الثقوب الهوائية في البنية السداسية (أ) والثمانية (ب) والعشارية (ج). عند $(\frac{d}{\Lambda} = 0.6, \Lambda = 1, 2 [\mu m])$, وتغير خسارة الحصر بتغير طول الموجة للبنى الثلاث

عند $(\frac{d}{\Lambda} = 0.6, \Lambda = 1.2[\mu\text{m}])$ وست حلقات من الثقوب الهوائية (د)، وتغير خسارة الحصر المساحة الفعالة للبنية العشارية بست حلقات من الثقوب الهوائية بتغير ثابت الشبكية والنسبة $\frac{d}{\Lambda}$ (هـ).

يتبين أن الليف ذا البنية العشارية يتمتع بخسارة حصر أخفض مقارنة بالبنيتين السداسية والثمانية عند البارامترات نفسها، ونلاحظ ما يلي :

- عند أطوال الموجة الأقصر تكون خسارة الحصر أقل ويكون حصر الضوء في القلب أشد بينما تزداد خسارة الحصر بزيادة طول الموجة .

- تتخفض خسارة الحصر عند القيم الكبيرة للنسبة $\frac{d}{\Lambda}$ (أي بزيادة قطر الثقب الهوائي) من أجل كل قيم ثابت الشبكية وهذا غير مفاجئ بما أن النمط يحصر بشكل أفضل عند القيم الكبيرة للنسبة المملوءة بالهواء.
- تتخفض خسارة الحصر بزيادة عدد حلقات الثقوب الهوائية عند ثبات النسبة $\frac{d}{\Lambda}$ ومن أجل كل قيم ثابت الشبكية.

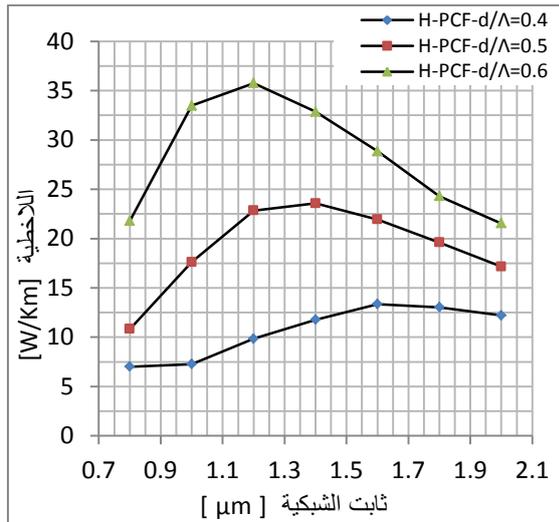
- تتخفض خسارة الحصر عند القيم الكبيرة لثابت الشبكية عند ثبات النسبة $\frac{d}{\Lambda}$.
تبلغ خسارة الحصر في الليف البلوري ذي البنية العشارية عند طول موجي $1.55[\mu\text{m}]$ وست حلقات من الثقوب الهوائية و $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$, $\Lambda = 1.2[\mu\text{m}]$ حوالي $1.7 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right]$ وهي أدنى قيمة للخسارة مقارنة بالبنيتين السابقتين.

4-4- اللاخطية :

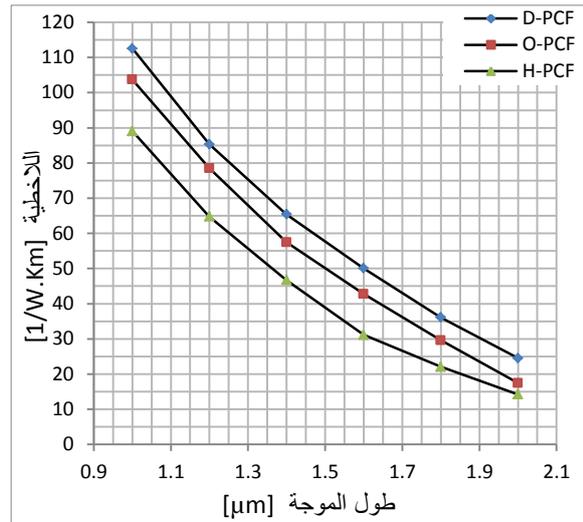
تبين المعادلة (28) علاقة معامل اللاخطية بكل من طول الموجة والمساحة الفعالة، إذ تتناقص قيمته بازدياد طول الموجة كما يظهر في الشكل (5-أ)، بينما تزداد قيمته بازدياد النسبة المملوءة بالهواء (بزيادة النسبة $\frac{d}{\Lambda}$) أي بتناقص قيمة المساحة الفعالة كما في الشكل (5-ب) للليف السداسي، والشكل (5-ج) للليف الثماني، والشكل (5-د) للليف العشاري، ونحصل على أعلى قيمة لمعامل اللاخطية في الليف ذي البنية العشارية فتبلغ $55 \text{ W}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$ عند $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و $\Lambda = 1[\mu\text{m}]$ وطول موجي $1.55[\mu\text{m}]$ ، وهي الأعلى بين البنى المدروسة، ويبين الجدول (1) مقارنة

الخصائص البصرية للبنى الثلاثة عند طول الموجة البصرية $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ وثابت الشبكية

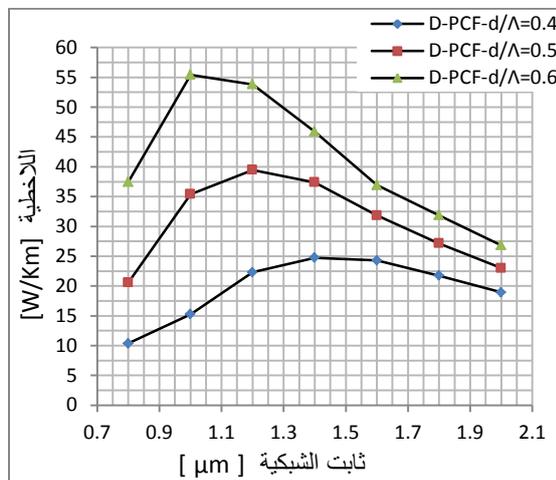
$\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$ والنسبة $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ وست حلقات من الثقوب الهوائية.



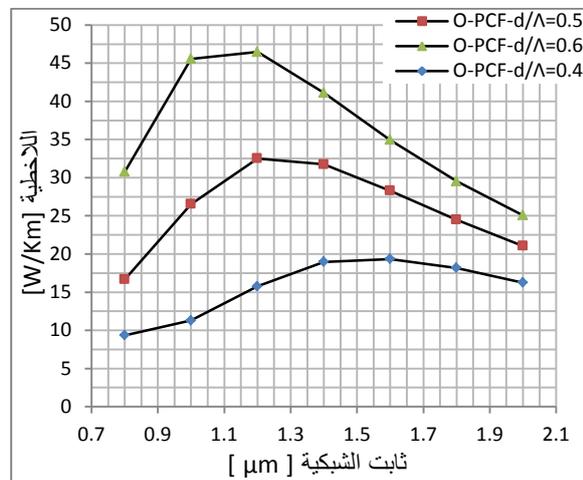
-ب-



-أ-



-د-



-ج-

الشكل (5) : أ - اللاخطية بتابعية طول الموجة للبنية الثلاث عند $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$, $\Lambda = 1.2 [\mu m]$, اللاخطية بتابعيته لـ Λ و $\frac{d}{\Lambda}$ في البنية السداسية (أ) والثمانية (ب) والعشارية (ج) عند $\lambda = 1.55 [\mu m]$.

D-PCF	O-PCF	H-PCF	الخاصية البصرية
2	2.4	3.1	المساحة الفعالة $[\mu m^2]$
55	45.5	36	معامل اللاخطية $[W^{-1}.km^{-1}]$
1.7×10^{-5}	5.31×10^{-5}	0.03	خسارة الحصر [dB/m]

الجدول (1) مقارنة الخصائص البصرية للبنية الثلاث عند $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$, $\Lambda = 1.2 \mu m$, $\lambda = 1.55 \mu m$ وست حلقات من الثقوب الهوائية.

5- الاستنتاجات و التوصيات :

يتبين لنا من نتائج المحاكاة الرقمية بأن للليف البلوري الفوتوني ذي البنية العشارية وست حلقات من الثقوب الهوائية أكبر قيمة لمعامل اللاخطية وأخفض قيمة لخسارة الحصر والمساحة الفعالة بالمقارنة مع البنيتين السداسية والثمانية وذلك عند البارامترات التصميمية نفسها، إذ تصل قيمة معامل اللاخطية إلى $55 [W^{-1}.Km^{-1}]$

والمساحة الفعالة إلى $2[\mu\text{m}^2]$ وخسارة الحصر حتى $1.7 \times 10^{-5}[\text{dB/m}]$ عدد $\frac{d}{\Lambda} = 0.6$ و $\Lambda = 1.2[\mu\text{m}]$ وطول موجي $1.55[\mu\text{m}]$, لذلك يمكن تفضيل الليف البلوري الفوتوني ذي البنية العشارية بغية استخدامه في مضخمات رامان نتيجة لمعامل اللاخطية المرتفع .

المراجع :

1. ZOLLA,F;RENVERSEZ,G; NICOLET,A. *Foundations of Photonic Crystal Fibers*. Imperial College Press, Singapore & London,2005,376.
2. AGRAWAL, GOVIND,P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. Elsevier Academic Press, USA, 2005, 383.
3. SAITOH,K; TSUCHIDA,Y; KOSHIBA,M. *Endlessly single-mode holey fibers: the influence of core design*. Optical Society of America Japan,2005.
4. POLI,F; CUCINOTTA,A; SELLERI,S. *Photonic Crystal Fibers Properties and Applications*. Springer, New York, 2007, 242.
5. EMMANUEL,B .*Capacity Demand and Technology Challenges for Lightwave Systems in the Next Two Decades*. Journal of lightwave technology France, VOL. 24, NO. 12, 2006.
6. OYHENART,L ; VIGNÉRAS,V. *Photonic Crystals - Introduction, Applications and Theory*. InTech, France, 2012,344.
7. POLETTI,F. *Direct and Inverse Design of Microstructured Optical Fibers*. UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON,2007,239.
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,P. *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves* . J. Comput. Phys , **114**, pp 185-200,1994 .
13. PRASAD,S ; PEARSON,N. *Design and Analysis of Modified Photonic Crystal Fiber with Low Confinement Loss*. IJSRD, Vol.1, Issue 4, 2013.
14. MORTENSEN,N,A.*Effective area of photonic crystal fibers*. Optical Society of America, 2002.
15. KELLEY,P,L; KAMINOW,I,P; AGRAWAL,G,P. *Nonlinear Fiber Optics*. Third Edition. Academic Press, USA, 2001, 481.