

تأثير قدرة نبضة ليزر (تيتانيوم-ياقوت أزرق) على خصائص الانتشار في الألياف البلورية الفوتونية

مروان حفيظ يونس

عبد الغفور إبراهيم عبد الله

قسم الفيزياء / كلية التربية

جامعة الموصل

القبول

الاستلام

٢٠١١ / ٠٤ / ٠٦

٢٠١١ / ٠٢ / ٠٧

Abstract:

Two designs of photonic crystal fibers with similar parameters are proposed, the difference only in the air fraction. The Air fraction of the PCF1 is 0.4, while for the second design is increased to 0.45. The propagation properties of the both designs are investigated. The results show that the zero dispersion wavelength (λ_{ZD}) for PCF1 and PCF2 are pushed to the visible region far away from the $1.27\mu\text{m}$ as in traditional silica fibers.

The effect of the laser pulsed power of the (Ti-Sapphire) of $0.8\mu\text{m}$ on the dispersion profile of PCF1 and PCF2 is also studied. The λ_{ZD} for the PCF1 is blue shifted, while a small increment in the air fraction as in PCF2 cause red shift for λ_{ZD} . On the other hand, the sensitivity of the PCF2 for the pulse power (0.3nm/kW) is 10 times more comparing with the sensitivity (0.03nm/kW) of the PCF1.

المخلص:

تم في هذا البحث وضع تصميمين للألياف البلورية الفوتونية لهما المواصفات ذاتها ولكن يختلفان فقط في الجزء الهوائي، ففي التصميم الأول PCF1 كان الجزء الهوائي 0.4 وفي التصميم الثاني PCF2 زاد إلى 0.45، وتم دراسة خصائص الانتشار للتصميمين. أشارت النتائج إلى أن موقع التشتت الصفري لكلا التصميمين قد اندفع نحو الأطوال الموجية المرئية بعيدا عن موقع التشتت الصفري 1.27 مايكرون كما هو في الألياف التقليدية.

كذلك تم دراسة تأثير قدرة نبضة ليزر (تيتانيوم-ياقوت أزرق) ذات الطول الموجي $0.8\mu\text{m}$ في منحنى التشتت للتصميم ين. في PCF1 اندفعت قيم التشتت الصفري λ_{ZD} نحو الأطوال الموجية الأقصر. في حين زيادة الجزء الهوائي في التصميم PCF2 جعلت استجابته لقدرة نبضة الليزر بان يندفع التشتت الصفري λ_{ZD} نحو الأطوال الموجية الأطول. من جهة أخرى أظهر التصميم PCF2 حساسية قدرها 0.3nm/kW وهي عشر أضعاف حساسية التصميم PCF1 والتي كانت 0.03nm/kW .

١ - المقدمة:

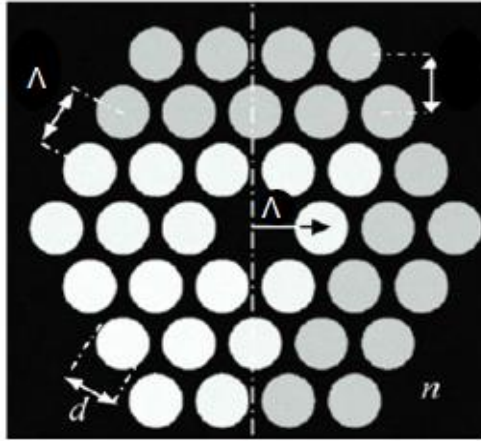
تتميز أنظمة الاتصالات بالألياف الضوئية سعة إرسال كبيرة ويعود ذلك إلى كون الترددات التي تعمل عليها عالية جدا (10^{14} Hz) مما ينتج عنه نطاق ترددي عال جدا، مما يعني كماً هائلاً من المعلومات بمختلف أشكالها يمكن إرسالها عبر هذه الألياف. وبالمقارنة، فإن سعة الإرسال في أنظمة الاتصالات باستخدام الألياف الضوئية قد تكون أكبر بألاف المرات قياساً بأي نظام آخر. لقد تم تطوير الألياف الضوئية في السنوات الأخيرة والتي تعمل عند نوافذ الاتصال 800nm و 1300nm و 1550nm ، حيث تصنع بمعامل فقد صغير جداً يصل إلى أقل من 0.2 dB/km و تكون هذه الأرقام متميزة ولا يوجد منافس لها في أي نوع من أنواع خطوط الاتصال، تعتبر هذه الميزة من أهم ميزات الألياف الضوئية كونها تؤدي إلى بناء أنظمة اتصال بعيدة المدى وسعة إرسال عالية. [1]

إن التطور الهائل في مجال الاتصالات الضوئية أدى إلى ولادة جيل جديد من الألياف انفردت بمواصفات لم تكن موجودة بل ولا يمكن إنجازها في الألياف التقليدية والتي سيتم الإشارة إليها لاحقاً، إنها الألياف البلورية الفوتونية Photonic Crystal Fibers(PCFs) و تسمى أيضاً بالألياف مايكروية التركيب Microstructure Fibers(MFs) [2-3]. و بشكل عام فإن هذه الألياف تتكون من منطقة مركزية فيها خلل تركيبى ليمثل القلب والذي يقع داخل شبكة منتظمة من الفجوات الهوائية مرتبة بشكل هندسي متماثل ومتكرر على مسافات منتظمة مكونة ما يسمى بالغلغاف، إن مواصفات هذا الغلغاف تزود الليف بدرجات إضافية من الحرية في معالجة خصائص الانتشار. وبسبب هذه الهندسة فإن الضوء الداخل سينعكس أو ينكسر عند الحد الفاصل بين قلب الليف وغلغافه [2,3].

تصنف هذه الألياف إلى نوعين وذلك حسب توجيه الضوء فيها : النوع الأول التوجيه بمعامل الانكسار العالي أو ما يسمى بالألياف ذات القلب الصلب Solid-core fibers، حيث يعتمد توجيه الضوء على مبدأ الانعكاس الداخلي الكلي Total Internal Reflection(TIR). أما النوع الثاني فإنه يعتمد على توجيه الضوء بمبدأ حزمة الطاقة الفوتونية Photonic Band

gab Fibers(PBGFs) أو ما يسمى بالألياف ذات القلب المجوف [4,5]Hollow-core Fiber(HFs). إن ألياف الـ (PCFs) تقدم خصائص انتشار مهمة عند مقارنتها مع الألياف التقليدية وهذه احد أهم الصفات المهمة لهذه الألياف، حيث انه بالإمكان تغيير مواصفات الليف البلوري الفوتوني مثل التشنت وغيرها من ال خصائص وذلك من خلال تغيير المعلمات الهندسية لهذه الألياف وهي قطر الفجوة (Hole Diameter)(d) والمسافة بين مركزي أي فجوتين متجاورتين أو ما يسمى بمسافة الخطوة (Pitch Size)(Λ) أو الجزء الهوائي (Air Fraction)(d/Λ) فضلا عن عدد حلقات الفجوات الهوائية وعدد الحلقات المفقودة في قلب الليف وكما موضح في الشكل (1)[6].

إن الهدف من هذا البحث هو وضع مقترح لتصميمين من الألياف البلورية الفوتونية، متماثلة في جميع المعلمات الهندسية من حيث عدد حلقات الفجوات الهوائية وعدد الحلقات المفقودة ومسافة الخطوة إلا أن الاختلاف الوحيد بين التصميمين هو الجزء الهوائي (d/Λ) إذ انه في التصميم الأول PCF1 كان 0.4 أما في التصميم الثاني فان الجزء الهوائي هو 0.45 وذلك بسبب الزيادة البسيطة المقترحة على قطر الفجوة الهوائية . سيتم دراسة خصائص الانتشار لهذين التصميمين. وكذلك سيتم دراسة تأثير قدرات مخ تلفة لنبضة ضوء ليزر (تيتانيوم - ياقوت أزرق) في خصائص الانتشار في الليف البلوري الفوتوني والمتمثلة بمعامل الانكسار الفعال و شكل التشنت والتشنت الصفري.



الشكل رقم(1): مقطع عرضي للألياف البلورية الفوتونية ذات القلب الصلب (PCFs) يوضح المعلمات الهندسية للليف

٢ - التأثيرات اللاخطية

إن التأثيرات اللاخطية أصبحت مهمة في حقل الاتصالات الضوئية منذ ظهور الألياف الضوئية، حيث لوحظت أول مرة من قبل العالم Peter Franklin وجماعته بعد ظهور الليزر

عام ١٩٦٠، حيث كانوا أول من اكتشف التأثيرات اللاخطية عندما لاحظوا توليد التوافقية الثانية أول مرة في بلورة الكوارتز، منذ ذلك الحين بدأت التأثيرات اللاخطية بالظهور وبلغت أهميتها في حقل العلم والتكنولوجيا وتم استخدامها في العديد من الوسائل المهمة كما في توليد المتسلسلة الفائقة وذلك عندما تعمل الظواهر اللاخطية مجتمعة . من جهة أخرى قد تعتبر الظواهر اللاخطية ظاهرة غير مرغوب بها مثل مزج الأمواج الأربعة لما تشكله من تقاطعات في أنظمة الإرسال المتعدد لتقسيم الطول الموجي (Wavelength Division Multiplexing (WDM [7].

إن التطور الهندسي الفريد للألياف البلورية الفوتونية تعد إضافة جديدة للألياف الضوئية التي أظهرت تقنية عالية في توجيه الموجة والتأثيرات اللاخطية . ومن الواضح جدا إن الألياف البلورية الفوتونية تتميز بوجود فرق كبير في معامل انكسار كل من القلب والغلاف عند المقارنة بالألياف التقليدية، وفي النتيجة فإن معظم الطاقة للنمط الأساسي تنتزع في منطقة القلب، لذلك فبالإمكان عمل قلب صغير دون أن يكون هناك توزيع كبير للطاقة في قلب الليف . إن الفرق الكبير بين معاملي انكسار القلب والغلاف يسمح لان يتركز النمط الأساسي في مساحة صغيرة، هذا يعني إن الضوء عندما يتركز في قلب الليف البلوري الفوتوني ستكون له شدة عالية وبالنتيجة فإن هذه الألياف تعمل على تقليل عتبة التأثيرات اللاخطية . ومن المعروف إن اللاخطية هي حركة لاتوافقية للالكترونات المقيدة في الذرة ، هذه الحركة لا يمكن انجازها إلا بتوفر قدرة عالية لنبضة الليزر والتي قد تصل إلى أكثر من 1MW وعادة هذه القدرات لا تتوفر إلا في الليزرز الحديثة ذات النبضات السريعة [8]. وبذلك فإن زيادة شدة نبضة ضوء الليزر يصبح معامل انكسار اللاخطية دالة للشدة ويعطى بالعلاقة الآتية[9]:-

$$n = n_0 + n_2 I + \dots \quad 1$$

حيث أن:

n_0 تمثل معامل الانكسار الخطي

$$n_2 \text{ تمثل معامل الانكسار اللاخطي وقيمتها للسليكا تساوي } 2.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$$

I تمثل شدة الضوء، وتقاس بوحدة Wm^{-2} وتعطى بالعلاقة الآتية:-

$$I = \frac{P}{A_{\text{eff}}} \quad \dots \quad 2$$

حيث أن P تمثل قدرة نبضة الليزر الذي طاقته عدد من n_j (1 nano joule = 10^{-9} j)

وأمد نبضة في حدود عشرات الـ fs ($1 \text{ femtosecond} = 10^{-15} \text{ s}$)

A_{eff} تمثل المساحة الفعالة وترتبط بالفتحة الـ عديدة ذلك حسب تقريبات Mortensen وجماعته

كما في العلاقة الآتية[10]:-

$$A_{eff} = \left(\frac{\lambda^2}{\pi}\right) \left(\frac{1}{NA^2} - 1\right) \quad \dots 3$$

حيث أن NA تمثل الفتحة العددية لليف.

كما يمكن حساب عامل اللاخطية عند موجة الإرسال وبالعلاقة الآتية [11]:-

$$\gamma = \frac{2\pi n_2^1}{\lambda A_{eff}} \quad \dots 4$$

٣ - ليزر (تيتانيوم-ياقوت أزرق):

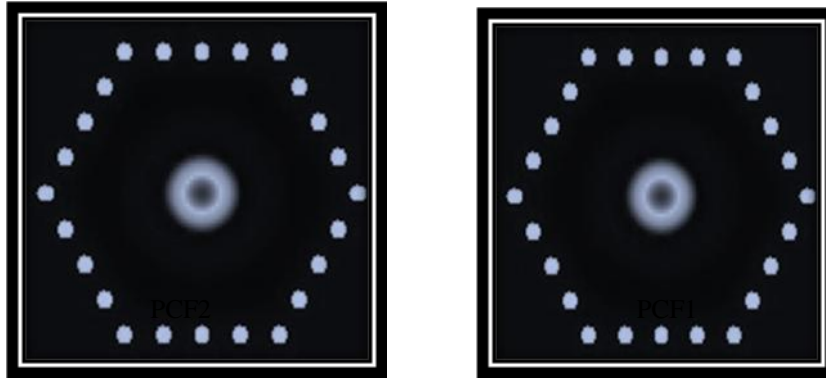
من المهم جدا في مجال الاتصالات الضوئية ان تتوفر لدى المهتمين في هذا المجال ليزرات ينتج عنها انبعاث لمدى واسع من الأطوال الموجية ذلك من خلال تنعيمها، وتوفير فرص واسعة لمختلف الاستخدامات والتطبيقات العملية، لذلك استخدمت تقنية ليزرات الفيمتوثانية (femtosecond). ومن أهم الليزرات التي تعمل بهذه التقنية هو ليزر (تيتانيوم-ياقوت أزرق) (Titanium - Sapphire) ومختصره (Ti:Sapphire) و هو من ليزرات الحالة الصلبة العنصر الفعال فيه عبارة عن بلورة ياقوت (اوأكسيد الألمنيوم) مطعمة بنسبة 0.1% من التيتانيوم من وزن البلورة، فائدة هذه البلورات هو لتكبير الضوء باستخدام الضخ الضوئي عند الطول الموجي 500nm وهو من الليزرات ذات المستويات الأربعة . إن ليزر (Ti:Sapphire) له القدرة على توليد نبضات ضوئية ذات قدرة عالية وبفترات زمنية قصيرة حوالي (10fs) أو أكثر وذات طاقة تتراوح ما بين (0.1j-100j) وان الأشعة المتولدة تكون أحادية الطول الموجي ولها اتساع طيفي (Spectral Width) اكبر بكثير من الاتساع الطيفي الناتج عن ليزرات اخرى و قد يصل إلى مدى (660-1180 nm) وذروة عند الطول الموجي (800 nm)، كما إن له عرض واسع للامتصاص من (400 nm) إلى (600 nm) [2,12].

٤ - التصميم المقترح وتحويل العلاقات المستخدمة

إن الليف المقترح (التصميم الأول PCF1) في هذه الدراسة هو ليف بلوري فوتوني ذو القلب الصلب من مادة السليكا معامل الانكسار (n=1.4632264867) عند طول ألموجي (0.5 μm). يتكون من أربع طبقات أي أربع حلقات من الفجوات الهوائية (Nr=4)، قلب الليف يشغل ثلاث حلقات من الفجوات الهوائية مفقودة (أي مملوءة بالسليكا) اضافة الى الفجوة الهوائية المركزية وبالنتيجة فان التصميم يمتلك أربع حلقات مفقودة (MNr=4) وحلقة واحدة من الفجوات الهوائية والتي تضم ٢٤ فجوة. نصف قطر قلب الليف يمكن حسابه بدلالة قطر الفجوة الهوائية d ومسافة الخطوة Λ وبالعلاقة الآتية:-

$$R_o = \Lambda * MNr - d \quad \dots 5$$

إن العلاقة (٥) تم إيجادها اعتماداً على التصميم الذي يمتلك حلقة مفقودة واحدة ($MNr=1$) للألياف البلورية الفوتونية حيث تم استبدال قطر القلب (a) بمسافة الخطوة (Λ) لهذه، أما بالنسبة إلى التصاميم المقترحة فإنها تمتلك أربع حلقات مفقودة ففي هذه الحالة يمكننا حساب قطر الفجوة الهوائية باستخدام العلاقة (٥) على اعتبار $R_0 \cong 4\Lambda$ قلب الليف محاط بغلاف ذو تركيب مايكروي، هذا الغلاف يتكون من حلقة واحدة من الفجوات الهوائية (٢٤ فجوة هوائية) مرتبة بشكل سداسي (Hexagonal) والموضحة في الشكل (٢). قطر الفجوة الهوائية يساوي ($d=0.4 \mu m$) والمسافة بين مركزي أي فجوتين متجاورتين والذي يطلق عليه مسافة الخطوة تساوي ($\Lambda=1 \mu m$). تم اختيار قيم كل من d و Λ بحيث يعطي قيمة الجزء الهوائي ($d/\Lambda=0.4$).



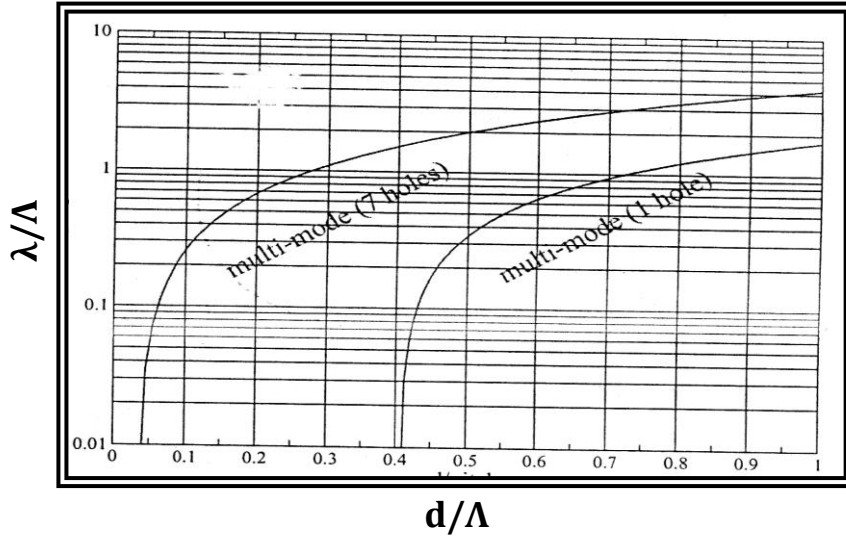
الشكل رقم (2): يمثل التصميمين PCF1 و PCF2 المستخدمين في الدراسة

أن وجود الفجوات الهوائية حول القلب والتي تباعد عن بعضها البعض بجسر (Bridge) سمكه يصل إلى (600 nm) تعمل على تقليل مادة السليكا حول القلب لتشكل عند ذلك بالغلاف (clad)، لذلك فإن معامل انكسار غلاف الليف بالتأكيد يكون أقل من معامل انكسار قلب الليف وكما في العلاقة التالية:-

$$n_{\text{clad}} = n_{\text{eff}}(\lambda) < n_{\text{core}} \quad \dots 6$$

أما التصميم الثاني المقترح في هذه الدراسة PCF2 فهو يمتلك نفس مواصفات التصميم الأول مع اختلاف بسيط في قيمة الجزء الهوائي والتي تساوي ($d/\Lambda=0.45$) وذلك بسبب الزيادة المقترحة على قطر الفجوة الهوائية وقيمتها ($0.05 \mu m$) لتصبح ($d=0.45 \mu m$) مع الإبقاء على قيمة مسافة الخطوة كما هي في التصميم الأول ($\Lambda=1$). ومن الجدير بالذكر إن التصاميم التي لها جزء هوائي مساوي أو أقل من ($d/\Lambda \leq 0.4$) تعمل بنمط منفرد على شرط هناك حلقة مفقودة واحدة في قلب الليف، أما إذا كان عدد الحلقات المفقودة في قلب الليف أكثر كما في دراستنا هذه فإنها تعمل بنظام متعدد الأنماط . فعليه فان التصميمين، (PCF1&PCF2) تحت

الدراسة، يعملان بنمط متعدد كما موضح في الشكل (3). إن طاقة ضوء ليزر (Ti-Sapphire) ذو الطول الموجي ($\lambda=0.8 \mu\text{m}$) هي (5 nj) لذا فقد تم استخدام أمد نبضة الليزر وهي fs (0.2,0.12,0.04)، للحصول على قدرة نبضة بمقدار (1000, 600, 200) kW على التوالي. وعند حساب قدرة نبضة الليزر يلزم ذلك قيم المساحة الفعالة لليف وذلك اعتمادا على العلاقة (3).



الشكل رقم(3): يمثل العلاقة بين الطول الموجي المعياري والجزء الهوائي ولعدد من الحلقات المفقودة من 1 إلى 7 [13]

واستنادا إلى التصميم المقترح فإن العلاقات الرياضية التي تستخدم في الحسابات سيتم تحويلها تبعا للمقترح وبالاعتماد على العلاقات الرياضية المعمول بها خاصة تلك المتعلقة بمساحة قلب الليف البلوري الفوتوني مثل التردد المعياري وما يتعلق به لاحقا مثل عدد الأنماط المنتقلة في الليف.

٤-١ التردد المعياري

تعتمد الأنماط المنتشرة، داخل الليف التقليدي (SIF) Step Index Fiber على التردد المعياري (V) والذي يحدد بدوره عدد الأنماط بالاعتماد على نصف قطر قلب الليف والفتحة العددية ويعطي بالعلاقة الآتية [14]:-

$$V_{SIF} = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad \dots 7$$

إذ أن (a) تمثل نصف قطر قلب الليف. أما عدد الأنماط (N) المنتشرة داخل الليف الضوئي يمكن حسابها من العلاقة الآتية:-

$$N \sim V^2/2 \quad \dots 8$$

والواضح من العلاقتين السابقتين إن عدد الأنماط يزداد كلما كانت مساحة القلب كبيرة وكلما زاد الاختلاف النسبي بمعاملات الانكسار (Δ) الذي يعطى بالعلاقة الآتية:-

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \quad \dots 9$$

وفي حالة التوجيه الضعيف Weakly Guiding فان $n_1 \cong n_2$ اذن تصبح العلاقة بالشكل الآتي:-

$$\Delta \cong (n_1 - n_2) / n_1 \quad \dots 10$$

لذلك تصنع هذه الألياف باختلاف جزئي قليل جدا ($\Delta \ll 1$) لتسمح للنمط الأساسي فقط بالانتشار خلالها، هذا وان الشرط الذي يعمل به الليف بنمط منفرد هو ان تكون قيمة التردد المعياري:-

$$V < 2.405 \quad \dots 11$$

أما في الألياف البلورية الفوتونية فيعطى التردد المعياري بالعلاقة الآتية [15]:-

$$V_{PCF} = \frac{2\pi a}{\lambda} [n_{core}^2(\lambda) - n_{eff}^2(\lambda)]^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad \dots 12$$

حيث تم استبدال نصف قطر القلب (a) للألياف التقليدية بمسافة الخطوة (Λ) للألياف البلورية الفوتونية ذات الفجوة الهوائية المفقودة الواحدة ($MNr=1$). كما تم استبدال معامل انكسار الغلاف (n_2) بمعامل الانكسار الفعال (n_{eff}) للألياف البلورية الفوتونية. ولقيم أدق في الحسابات خاصة وما يتعلق بالتصاميم تحت الدراسة، ومن الضروري إعطاء قيمة دقيقة لنصف قطر قلب الليف طالما أن عدد الأنماط حساس لها. كما ذكرنا سابقا إن التصميمين PCF1 و PCF2 يمتلكان أربع حلقات مفقودة ($MNr=4$) لذلك يمكن تقرب نصف قطر الليف وجعله مساوي إلى أربع أمثال مسافة الخطوة أي أن:-

$$(a = 4\Lambda) \quad \dots 13$$

هذا وبشكل أدق يمكن حساب نصف قطر قلب الليف من العلاقة (٥) لكي تعطينا قيم دقيقة للتردد المعياري عندها تصبح العلاقة بالشكل الآتي:-

$$V_{PCF} = \frac{2\pi(4\Lambda - d)}{\lambda} [n_{core}^2(\lambda) - n_{eff}^2(\lambda)]^{1/2} = \frac{2\pi R_0}{\lambda} NA \quad \dots 14$$

٥ - البرنامج المستخدم:

إن الاهتمام الواسع من قبل الباحثين في تصميم الألياف البلورية الفوتونية خلال العقد الماضي، وفر العديد من الخوارزميات والطرق العددية المختلفة والتي أدت إلى تصميم ألياف بشكل دقيق، فضلا عن ذلك ونتيجة للاهتمام المتزايد في هذا المجال وكسبا للوقت اخذ عدد من الباحثين الى وضع علاقات تجريبية وبرامجيات خاصة لحساب خصائص الانتشار لألياف أل PCF. تم في هذا البحث استخدام برنامج (CUDOS) وهو برنامج تم تصميمه من قبل العالم Kuhlmeier B.T, يقوم هذا البرنامج بإيجاد معامل الانكسار الفعال لهذه الألياف وجزئيه

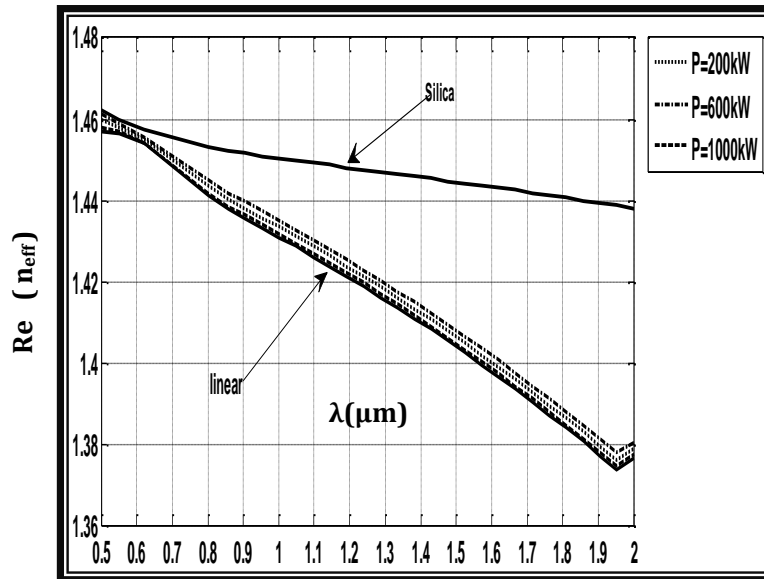
الحقيقي والخيالي ، إذ يعطي دقة عالية في حساب الجزء الخيالي لمعامل الانكسار الفعال التي تكون ضرورية في حساب خسائر الحصر للألياف البلورية الفوتونية . كذلك يعطي هذا البرنامج الدقة في معالجة الأنظمة وبشكل سريع [17,16]. بالاعتماد على هذه القيم وباستخدام برامج معدة من قبل الباحثين يتم حساب خصائص الانتشار للتصاميم المقترحة.

٦ - النتائج

٦-١: الجزء الحقيقي لمعامل الانكسار الفعال $Re(n_{eff})$

إن انتقال الضوء داخل الألياف الضوئية بشكل عام يكون بسبب الاختلاف النسبي لمعاملات انكسار كل من القلب والغلاف . أما بالنسبة للألياف البلورية الفوتونية ذات القلب الصلب ينشأ معامل الانكسار الفعال بسبب التصميم الهندسي المميز لهذه الألياف، إذ أن وجود الفجوات الهوائية والمرتبطة بشكل هندسي على طول الليف ، والتي تمثل الغلاف (clad)، تعمل على تقليل معامل الانكسار الفعال للغلاف مقارنة بمعامل انكسار القلب المملوء بمادة السليكا لذلك فأن الضوء سوف ينتقل إلى داخل القلب طبقاً لآلية الانعكاس الداخلي الكلي [18]. كما أصبح بالإمكان التحكم بمعامل الانكسار الفعال للألياف البلورية الفوتونية وذلك من خلال تغيير واحد أو أكثر من معالم هذه الألياف والمتمثلة بقطر الفجوة الهوائية والمسافة بين مركزي فجوتين متجاورتين أو ما يسمى بمسافة الخطوة أو الجزء الهوائي [19]. تم حساب معامل الانكسار الفعال ولمدى من الأطوال الموجية $(0.5-2) \mu m$ باستخدام برنامج {CUDOS} ولكلا التصميمين PCF1 و PCF2 والموضح في الشكل رقم (٤ و ٥) على التوالي.

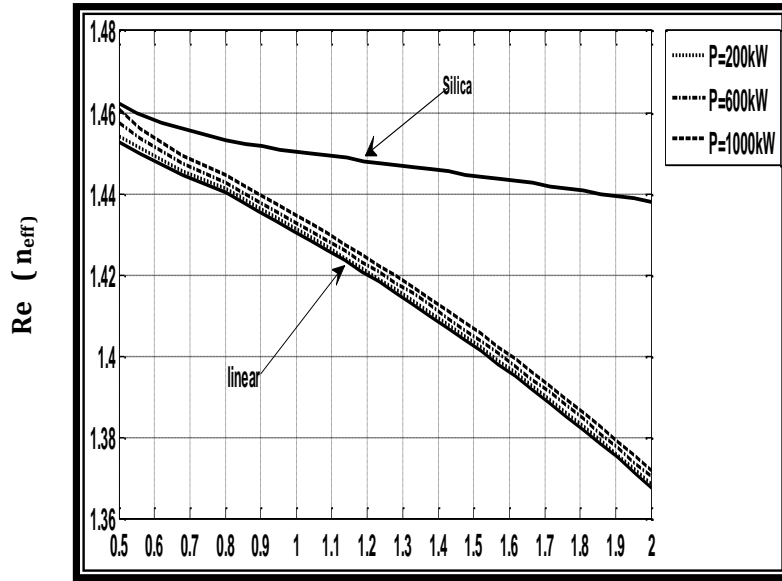
$$\Lambda=1, d/\Lambda=0.4, N_r=4, MNr=4$$



الشكل رقم (4): يمثل الجزء الحقيقي لمعامل الانكسار الفعال للنموذج PCF1

دالة للطول الموجي ولقدرات مختلفة من نبضات ضوء الليزر

$$\Lambda=1, d/\Lambda=0.45, N_r=4, MNr=4$$



الشكل رقم (5): يمثل الجزء الحقيقي لمعامل الانكسار الفعال للنموذج PCF2 دالة للطول الموجي ولقدرات مختلفة من نبضات ضوء الليزر

يبين كل من الشكل رقم (٤) والشكل رقم (٥) تغير الجزء الحقيقي لمعامل الانكسار الفعال دالة للطول الموجي للتصميمين PCF1 و PCF2 على التوالي و إن الشكلين يوضحان تغير معامل الانكسار دالة للطول الموجي للسليكا (معادلة سيلمير) وكذلك تغير معامل الانكسار اللاخطي. وواضح من العلاقة (١) إن زيادة قدرة نبضة الليزر من 200kW إلى 1000kW تؤدي إلى زيادة في معامل الانكسار الفعال للليف ولكلا التصميمين وعلى مدى لاطوال الموجية. وان معامل الانكسار يتناقص مع زيادة الطول الموجي. إن الزيادة في الجزء الحقيقي لمعامل الانكسار لا بد من أن تؤثر في شكل التشتت كون تشتت نبضة الليزر في قلب الليف حساس جدا لمعامل انكسار مادة الليف. هذا ما سيتم ملاحظته في الشكل (٦ و ٧). من جهة أخرى نلاحظ في الشكلين (٤ و ٥) إن الفرق بين معامل الانكسار الفعال ومعامل انكسار السليكا يزداد بزيادة الفرق في الطول الموجي، فضلا من إن معامل الانكسار الفعال الخطي واللاخطي للليف PCF2 يكون بشكل اجمالي اقل من معامل الانكسار الفعال الخطي اللاخطي للليف PCF1 ولجميع قيم الطاقة والأطوال الموجية ويعزى سبب ذلك إلى أن الزيادة في قطر الفجوة الهوائية (بمعنى زيادة الجزء الهوائي) في التصميم الثاني قلل من نسبة السليكا بالتالي أدى ذلك إلى تقليل معامل الانكسار الفعال.

٦-٢: التشتت

يعد التشتت من أهم العوامل الرئيسية والأساسية التي تؤثر في نقل المعلومات باستخدام الألياف الضوئية، حيث يؤثر التشتت في عرض النطاق ومسافة الإرسال الذي يمكن تحقيقه

باستخدام ليف ضوئي معين، الحد الذي لا يمكن بعده التمييز بين المعلومات المنقولة خلاله [20]. الأمر الذي أدى إلى اهتمام العلماء في الحصول على قيم قلبية أو مسطحة أو صفرية للتشتت وقد تم هذا فعلا عن طريق الألياف البلورية الفوتونية المايكروية التركيب . فقد تم الحصول على أشكال متعددة للتشتت منها التشتت الصفري أو القريب من الصفر و التشتت المسطح أو فائق التسطح و التشتت الزاحف . يتم كل هذا من خلال المعالجة الدقية للمعلمات الهندسية للليف البلوري الفوتوني. كما يمكن حساب التشتت من العلاقة الآتية [22,21,13]:-

$$D(\lambda) = - \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(neff)}{\partial \lambda^2} \quad 15$$

حيث أن: - λ تمثل الطول الموجي بوحدات المايكرومتر
 c تمثل سرعة الضوء في الفراغ وقيمتها $3 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$
 وبالعودة إلى هدف الدراسة، نؤكد في حساباتنا على قيم تشتت نبضة ليزر أل (تيتانيوم- ياقوت أزرق) والمنبعثة عند الطول الموجي $0.8 \mu\text{m}$. إذ يبين الشكلين (٦ و ٧) قيم التشتت ولمدى معين من الأطوال الموجية والذي يتضمن نافذة الاتصالات $0.8 \mu\text{m}$. الشكلان يبينان كيف يتأثر شكل التشتت للتصميم PCF1 و PCF2 على التوالي وذلك بزيادة قدرة نبضة الليزر . وأول نتيجة يمكن ملاحظتها هو أن الطول الموجي عند التشتت الصفري قد اندفع نحو المنطقة المرئية وفي كلا التصميمين بعيدا عن موقع التشتت الصفري في ألياف السليكا التقليدية والتي كانت قيمتها ($\lambda = 1.27 \mu\text{m}$) والموضح في الشكل ٧ (داخل). نلاحظ في التصميم PCF1 إن زيادة قدرة نبضة الليزر فإن الطول الموجي عند التشتت الصفري λ_{ZD} يزحف نحو الأطوال الموجية الأقصر Blue Shift مما يتيح فرص لاستخدام الليزر التي تعمل في المنطقة المرئية في مجال الاتصالات الضوئية وكما موضح في الشكل (8) حيث يبين هذا الشكل إلى إن الطول الموجي عند التشتت الصفري يتحسس لقدرات نبضة الليزر بمقدار 0.03 nm/kW والذي يمثل ميل المنحني، هذا ومن جهة أخرى إن زيادة قدرة نبضة الليزر زادت من قيم التشتت السالب عند النافذة $0.8 \mu\text{m}$ قد يعتبر هذا الأمر مهما وذلك لإمكانية توليد نبضة السوليتون عند الطول الموجي $0.8 \mu\text{m}$ عند توفر التشتت السالب كشرط أساسي في توليد نبضة السوليتون .

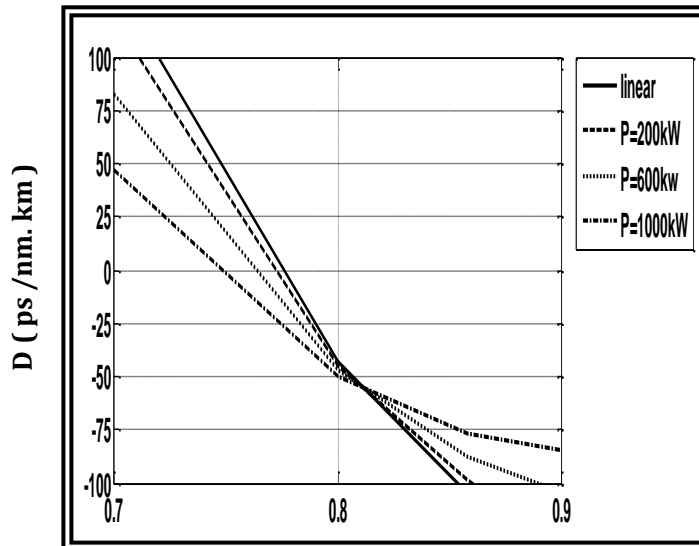
أما التصميم PCF2 والذي تضمن زيادة طفيفة $0.05 \mu\text{m}$ في قيمة نصف قطر الفجوة الهوائية بمعنى أصبحت قيمة الجزء الهوائي لهذا التصميم 0.45 بدلا من 0.4 ، فإن الشكل (٧) يبين إن زيادة قدرة نبضة ضوئية الليزر دفعت مواقع التشتت الصفري نحو الأطوال الموجية الأطول Red Shift والموضحة في الشكل (9). إذ يبين الشكل (9) حساسية هذا التصميم لقدرات نبضة الليزر والتي وصلت إلى 0.3 nm/kW والتي تعتبر ١٠ أضعاف أكثر قياسا لحساسية التصميم PCF1. ومن جانب آخر وتحديدًا عند ال نافذة $0.8 \mu\text{m}$ وللتصميم PCF1، يبين الشكلين (٦ و ١٠) إن زيادة قدرة نبضة الليزر غيرت قيم التشتت للنبضة المذكورة (زيادة

التشتت السالب) من -43ps/nm/km العمل الخطي إلى $(-44.81 - \text{ثم } -47.37 - \text{ثم } -49.91)$ العمل اللاخطي وبيوحات ps/nm/km . في حين إن الشكلين (٧ و ١١) يوضحان تأثير القدرة في قيم التشتت للتصميم PCF2 وعند النافذة $0.8\mu\text{m}$ إذ تتغير قيم التشتت من قيم موجبة إلى قيم سالبة وتكون اقل ما يمكن عند القدرة 600kW حيث تكون قريبة من الصفر وهذه نقطة مهمة كونها تسمح لنا باستخدام هذا التصميم للتطبيقات التي يتطلب فيها أن يكون التشتت صفري أو قريب من الصفر (Zero or near zero dispersion NZD) [23].

إن تغيير مواقع λ_{ZD} وقيم التشتت غالبا ما تكون مهمة ويجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار في تطبيقات الألياف البلورية الفوتونية كونها تتيح فرصة مناسبة لاختيار الليف المناسب في التطبيق والإرسال المطلوبين.

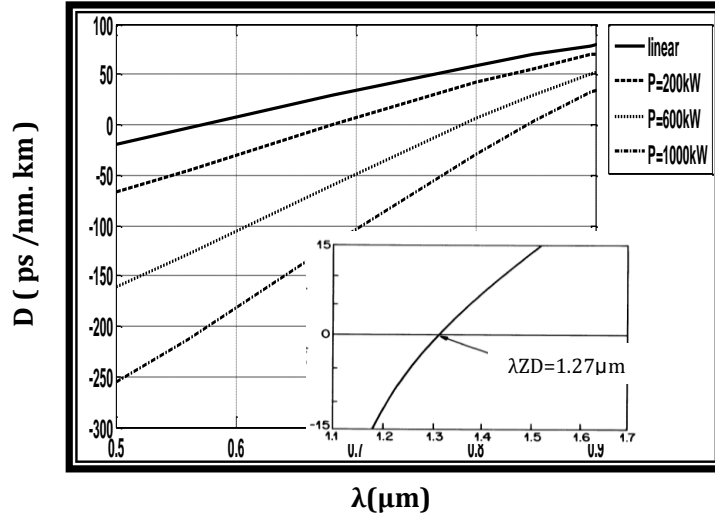
هذا وان التغيير الحاصل في قيم التشتت الكلي والموضح في الشكلين (٦ و ٧) هو ناتج بسبب التغيير الحاصل في قيمة الجزء الهوائي والتي تساوي $(d/\Lambda=0.05)$ وهذا يعمل بدوره على تغيير معامل الانكسار الفعال والذي يكون حساس جدا لمثل هذه التغيرات والذي يؤدي إلى تغيير شكل التشتت كون التشتت يمثل المشتقة الثانية لمعامل الانكسار المعطاة في العلاقة (١٥). وأخيرا فان الجدول (١) يبين خلاصة نتائج دراستنا في هذا البحث للتصميمين PCF1 و PCF2 عند نافذة الاتصال 0.8nm والتي يبين فيها اهم الصفات (مثل عامل اللاخطية والتشتت الصفري والمساحة الفعالة وغيرها) والتي يمكن استخدامها في بناء منظومة اتصالات ضوئية وللتطبيقات اللاخطية عند الارسال في النافذة الخاصة لليزر أل Ti:Sapphir عند الطول الموجي 0.8nm .

$$\Lambda=1\mu\text{m} , d/\Lambda =0.4 , N_r=4 , MNr=4$$

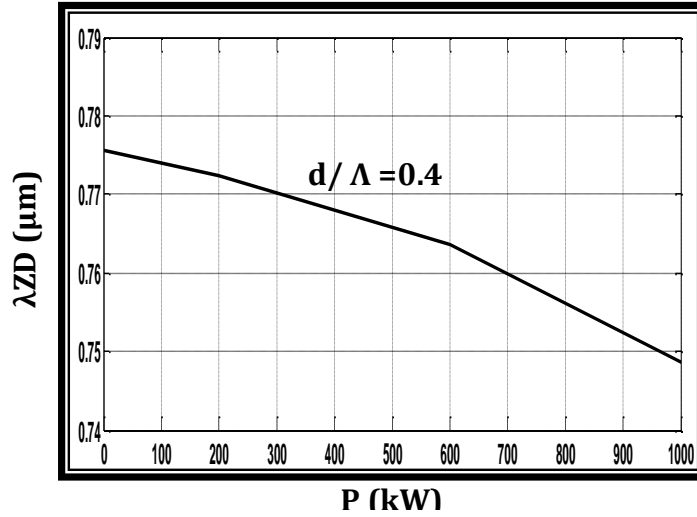


الشكل رقم (6): يمثل تشتت ضوء الليزر دالة للطول الموجي في الليف PCF1 ولقيم مختلفة من قدرات نبضة ضوء الليزر

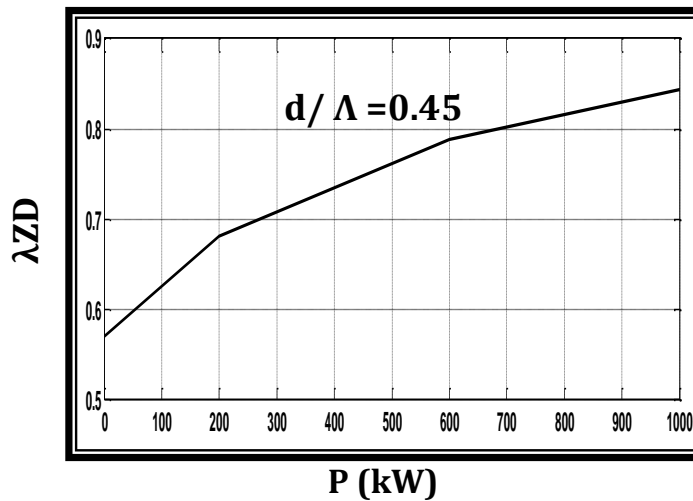
$$\Lambda=1\mu\text{m} , d/\Lambda =0.45 , N_r=4 , MNr=4$$



الشكل رقم (٧): يمثل تشتت ضوء الليزر دالة للطول الموجي في الليف PCF2 ولقيم مختلفة من قدرات نبضة ضوء الليزر

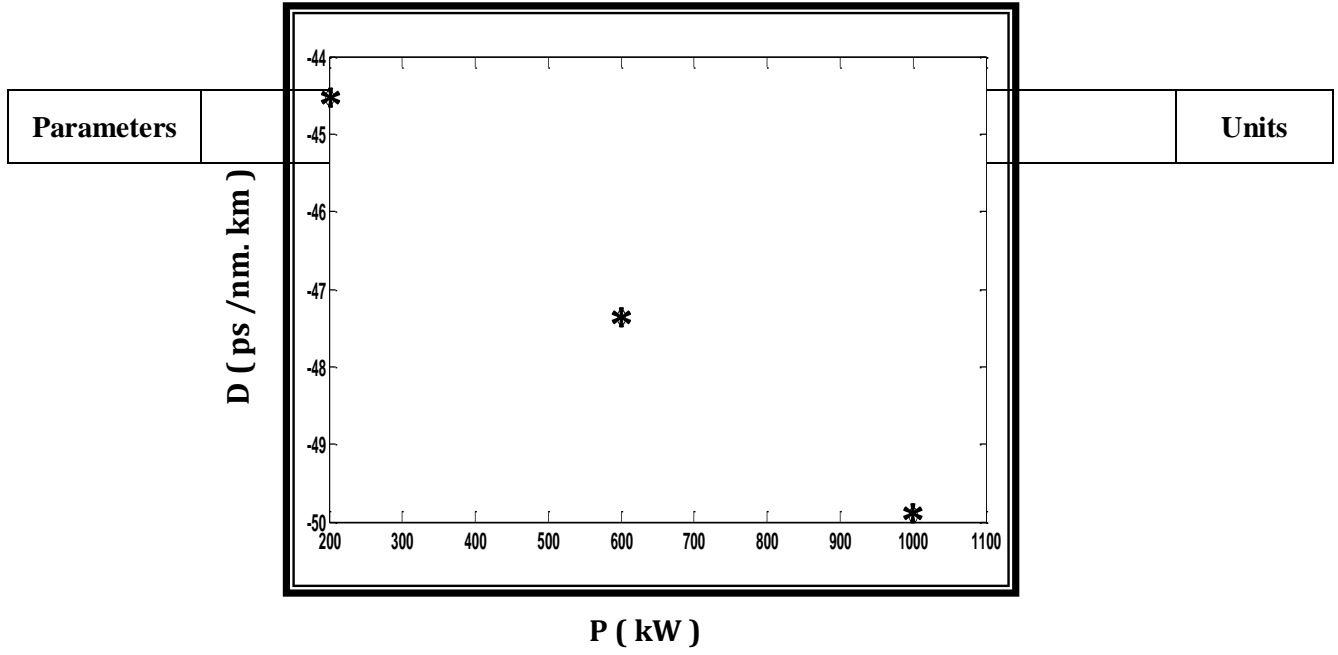


الشكل رقم (٨): يمثل الطول الموجي عند التشتت الصفري دالة لقدرة نبضة ضوء الليزر في الليف PCF1

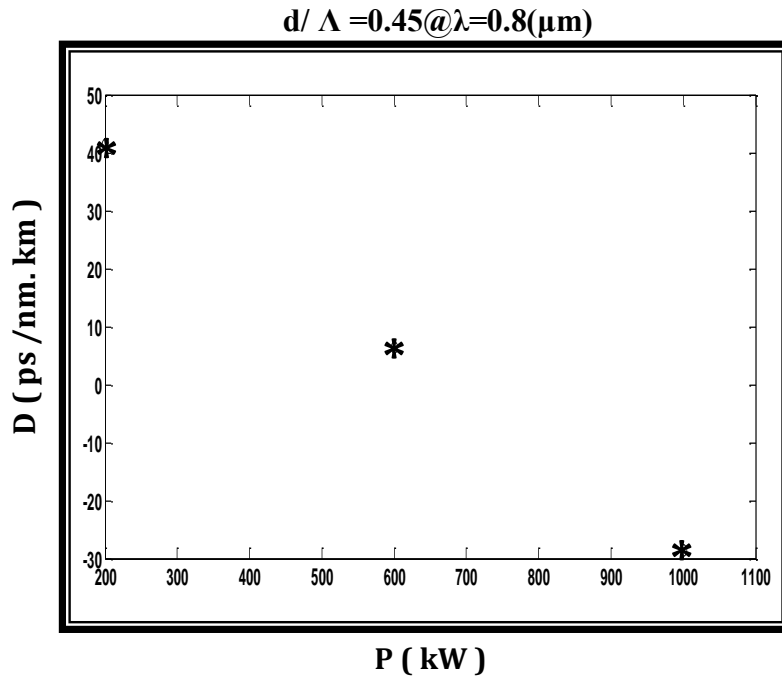


الشكل رقم (9): يمثل الطول الموجي عند التشتت الصفري دالة لقدرة نبضة ضوء الليزر في الليف PCF2
 $d/\Lambda = 0.4 @ \lambda = 0.8(\mu\text{m})$

تأثير قدرة نبضة ليزر (تيتانيوم-ياقوت ازرق) على خصائص الانتشار في الألياف البلورية الفوتونية.



الشكل رقم (١٠): يمثل تشتت ضوء الليزر (Ti:Spphir) في الليف PCF1 دالة لقدرة نبضة ضوء الليزر



الشكل رقم (١١): يمثل تشتت ضوء الليزر (Ti:Sapphir) في الليف PCF2 دالة لقدرة نبضة ضوء الليزر

| | Linear | 200kW | 600kW | 1000kW | Linear | 200kW | 600kW | 1000kW | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|
| NA | 0.186 | 0.178 | 0.168 | 0.1522 | 0.1941 | 0.1862 | 0.1783 | 0.1522 | Unit less |
| V | 5.548 | 5.309 | 5.011 | 4.540 | 5.790 | 5.554 | 5.283 | 4.540 | Unit less |
| A _{eff} | 5.687 | 6.229 | 6.987 | 8.594 | 5.025 | 5.675 | 6.201 | 8.618 | m ² μ |
| γ | 30.3 | 27.7 | 24.36 | 20.09 | 33.1 | 30.4 | 27.85 | 20.03 | W ⁻¹ km ⁻¹ |
| D | -43.54 | -44.81 | -47.36 | -49.9 | 59.09 | 41.49 | 6.33 | -28.83 | Ps/nm/km |
| λZD | 0.775 | 0.772 | 0.7635 | 0.748 | 0.571 | 0.680 | 0.7885 | 0.840 | μm |
| R ₀ | 3.8 | | | | 3.775 | | | | μm |

الجدول رقم ١: خلاصة النتائج المستحصلة من دراستنا للتصميمين PCF1 و PCF2 عند نافذة الاتصال 0.8nm

٧- الاستنتاجات

إن الاستنتاج الأكثر أهمية في هذه الدراسة هو أن الجزء الهوائي كان له دور مهم في التصميم. إذ أن أي زيادة في الجزء الهوائي (زيادة قطر الفجوة مع الإبقاء على مسافة الخطوة) وان كانت قليلة من ٠.٤ إلى ٠.٤٥ من شأنها تؤثر في أداء التصميم المقترح. حيث أن هذه الزيادة جعلت التصميم PCF2 يتميز بوجود تشتت صفري قريباً من نافذة الاتصال 0.8μm لضوء الليزر المنبعث عن ليزر (التيتانيوم-ياقوت أزرق) فضلاً عن أن حساسيته كانت أعلى في تغيير موقع الطول الموجي عند التشتت الصفري تحت تأثير قدرة نبضة ضوء الليزر.

المراجع:

- 1) Djafar K., Lowell L., "Fiber Optic Communications Technology", Prentice Hall, (2001).
- 2) Alzacko, H. M., "Dispersion minimization in Photonic Crystal Fibers for Ti: Sapphire Laser", M.Sc. Thesis, College of Education, Mosul University, (2008).
- 3) Wang J. Y., Jiang C., & Gao W. H. M., "Modified design Photonic Crystal Fibers with flattened dispersion", Optics & Laser Technology 38, pp:129-172, (2006).
- 4) Ademgil H., Haxha S. & Senior M., "Ultra-high-Birefringent Bending Insensitive Nonlinear Photonic Crystal Fiber With Low Losses", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 45, NO. 4, April (2009).
- 5) Kuis R., Johnson A. & Trivedi S., "Measurement of g in Photonic Crystal Fibers by the Induced Grating Autocorrelation Technique", IEEE (2010).
- 6) Nihal F. F. Areeed and Hamdy Elmikati, "Ultra-Flattened Dispersion Photonic Crystal Fiber", Faculty of Engineering, Future Univ., Egypt, March 17-19, (2009).

- 7) Sutherland, Richard L. , "Optical engineering", Handbook of nonlinear optics" (1996).
- 8) Kinght J. C., Skryabin D.V., Department of Physics, United Kingdom, Vol.15 , No.23 , (2007).
- 9) Bjarklev A. & Theis P. Hansen, "Passive and active Photonic Crystal Fiber", (2005).
- 10) Mortensen N. A., Folkenberg J. R., Shovgaard P. M. W., & Broeng J. "Numerical aperture of single-mode fibers", IEEE, POH. Tech. Lett., (2002).
- 11) Nelson D. , "Nonlinear optics in crystal fiber", (2008).
- 12) Chong C. Y., "FEMTOSECOND FIBER LASERS AND AMPLIFIERS BASED ON THE PULSE PROPAGATION AT NORMAL DISPERSION", Ph.D Thesis, Cornell University (2008).
- 13) Blatting P., Romano V., Luthy W., & Feurer T., "Numerical analysis of hexagonal solid-cor photonic crystal fiber", IAP Technical Report(2006).
- 14) Buck J. A., "Fundamental Of Optical Fibres", 2nd Ed., John Wiley & Sons., Inc., Hobken New Jersey.
- 15) Mortensen N. A., Folkenberg J.R., Nielsen M. D., & Hansen K. P., "Model cut off and the V parameter in Photonic Crystal Fibers", Opt. Lett., Vol.28, No. 20 : 1879-1881(2003).
- 16) Faris, R. A., B., "The effect of the geometrical parameters on the dispersion profile of Photonic Crystal Fibers", M.Sc. Thesis, College of Education, Mosul University (2010).
- 17) CUDOS. MOFUTLLTES Software Common Wealth of Australia, <http://www.physics.usyd.edu.au/cudos/mofsoftware/>.
- 18) Abdelaziz, I., AbdelMalek F., Ademgil H. & Haxha S., "Enhanced Effective Area Photonic Crystal Fiber With Novel Air Hole Design", Senior Member, IEEE, T. Gorman, and H. Bouchriha., J. of Lightwave Technology, Vol. 28, No. 19, October 1, (2010).
- 19) Ferrando A., Silvester E., Miret J. J., Andres P., & Andres M.V., "Full-vector analysis of realistic photonic crystal fiber", Opt. Lett., Vol. 24, No. 5 pp: 276-278, (1999).
- 20) Chen J.S.Y., "Optical parametric amplification in photonic crystal fiber", (2006).
- 21) Huttunen A., "Analysis and optimization of Photonic Crystal components for optical telecommunications", Ph.D Thesis, Helsinki University Tecnology, Laboratory of Computational Engineering, (2005).
- 22) Iiyama K., Yamashita Z., and Takamiya S., "Design of dispersion flattened photonic crystal fiber with a large core and a concentric missing ring", Division of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, (2003).
- 23) Ferrando A., Silvester E., Miret J. J., and Adres P., "Nearly zero ultra flattened dispersion in photonic crystal fiber" Opt. Lett., Vol. 25, No.11: 790-792, (2000).