

دراسة وتصميم ليف ضوئي أحادي النمط (SMF)

* الدكتور نظير ديوب

** الدكتور عفيف صقور

*** علي حسن

(تاريخ الإيداع 18 / 7 / 2016 . قُبِلَ للنشر في 27 / 10 / 2016)

□ ملخص □

يهدف البحث إلى دراسة وتصميم ليف ضوئي أحادي النمط (SMF) بنواة وغلاف من الزجاج عن طريق المحاكاة، ويساهم أيضاً في إثبات فعالية استخدام الليف الضوئي المصمم ضمن النافذة الموسعة C-band، حيث تسعى الأبحاث والدراسات حالياً إلى استخدام هذه النافذة. أيضاً يساهم البحث في تسليط الضوء على برامج النمذجة والمحاكاة المستخدمة حديثاً في دراسة وتصميم الألياف الضوئية. قمنا بداية باستخدام برنامج OptiFiber للتوصل إلى ثوابت معادلة سيلمير لنواة الليف. وتم باستخدام طريقة العناصر المنتهية حل معادلة انتشار الحقل الكهربائي وإيجاد توزيعه ثلاثي الأبعاد مستخدمين المحاكى الشهير COMSOL Multiphysics، وتم وضع برنامج ماتلاب للتوصل إلى معادلتى التبدد والتخميد الكليين للليف الضوئي المصمم.

الكلمات المفتاحية: ليف ضوئي أحادي النمط (SMF) - التبدد اللوني (CD) - التخميد - معادلة سيلمير - المحاكاة .

* أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

** أستاذ مساعد - قسم الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

Study and Design of a Single-Mode Optical Fiber (SMF)

Dr. Nazir Dayoub^{*}
Dr. Afif Sakkour^{**}
Ali Hasn^{***}

(Received 18 / 7 / 2016. Accepted 27 / 10 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research aims to study and design a single mode optical fiber using simulation, with a core and glass cladding, and also helps in ensuring the efficiency to use the optical fiber designed within the broadening window C-Band, and that these researches and studies tries to use this window. This research also shares to set the light on the Numerical Programmes and Simulation used now in studying and designing these optical fibers. At first we used the program Optifiber to reach the confidence of Sellmeier equation for the fiber core, and this completed by using the finite element method solving the equation of propagation the electric field and finding its 3-D distribution, using the famous simulating COMSOL Multiphysics. This completed by putting the program MATLAB to reach the two equation: the total dispersion and attenuation for the designed optical fiber.

Key words: Single Mode Fiber (SMF) - Chromatic Dispersion (CD) - Attenuation - Sellmeier Equation - Simulation.

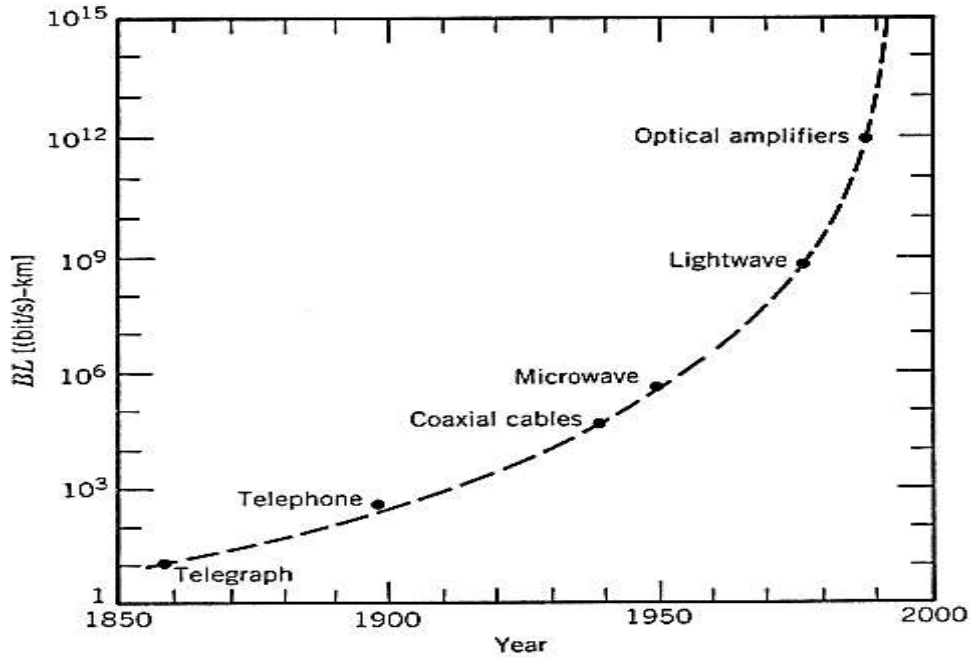
* Associate Professor-Department of physics-Faculty Sciences-Tishreen University-Lattakia-Syria.

**Associate Professor-Department of Communications-Faculty of Mechanical and Electrical Engineering-Tishreen University-Lattakia-Syria.

*** Postgraduate Student-Department of physics-Faculty Sciences-Tishreen University-Lattakia-Syria.

مقدمة:

تعد خطوط النقل عناصر أساسية في نظم الاتصالات السلكية، فهي الجزء الأعلى كلفة ولا سيما في الأنظمة بعيدة المدى. لذلك كان التركيز منذ البداية على تصميم خطوط اتصال جديدة وتصنيعها بكفاءة عالية وبكلفة منخفضة [1]. وفي الحديث عن كفاءة خطوط النقل وجب التركيز على أمرين اثنين. الأول: هو عرض النطاق الترددي للخط الذي يحدد سعة الإرسال، والثاني: هو مقدار الفقد للخط الذي يحدد المسافة بين مكررات الإرسال. فقد ظهرت أشكال جديدة لأنظمة الاتصالات عبر السنوات الماضية حيث يبين الشكل (1) تطور هذه الأنظمة. إذ يمثل المحور الشاقولي جداء معدل البت B بالمسافة L (bit rate-distance product (BL))، بينما يمثل المحور الأفقي العام الميلادي .



الشكل (1) : ارتفاع معدل البت بالمسافة خلال الفترة الزمنية (1850 - 2000) وتطور أنظمة الاتصالات خلال هذه الفترة [2].

وقد لوحظ خلال النصف الثاني من القرن العشرين أنه يمكن زيادة جداء معدلات البت بالمسافة باستخدام الأمواج الضوئية كحامل للمعلومات، إذ أن تردد الأمواج الضوئية المستخدمة 200THz تقريباً، مما زاد كمية المعلومات المرسلة بشكل كبير. فقد سهل اختراع الليزر عام 1960 عملية إنشاء نظام جديد للاتصالات عبر الألياف الضوئية، ففي البدايات كان أول نظام اتصالات بالألياف الضوئية يعاني من التخميد العالي جداً، حوالي 1000 dB/km ، ثم تطورت هذه الأنظمة وانخفض فيها التخميد في العام 1970 إلى 20 dB/km بالقرب من الطول الموجي $1 \mu\text{m}$ ، ثم بدأ العمل بنظام الاتصالات بالألياف الضوئية عند النافذة الأولى $0.8 \mu\text{m}$ في العام 1980 وكان معدل البت 45 Mb/s والمسافة بين المكررات 10 km . ثم في النافذة الثانية عند الطول الموجي $1.3 \mu\text{m}$ ، ووصل التخميد فيها إلى أقل من 1 dB/km وكان معدل البت محددًا بالقيمة 100 Mb/s بسبب التبدد متعدد النمط الذي أستبعد باستخدام الألياف وحيدة النمط فوصل معدل البت فيها إلى 2 Gb/s ، ولمسافة تصل إلى 44 km . وعند الانتقال للعمل في النافذة الثالثة ذات الطول الموجي $1.55 \mu\text{m}$ وصل التخميد فيها إلى 0.2 dB/km ولكنها بالمقابل كانت تعاني من التبدد الكبير وتم حل هذه المشكلة باستخدام الألياف ذات التبدد المزاحوب هذا وصل معدل البت إلى 4 Gb/s لمسافة

تتجاوز 100 km، وفي بدايات القرن الحادي والعشرين استخدم التتضيد بتقسيم طول الموجة ذلك من أجل زيادة معدلات البت، فقد وصلت عام 2001 إلى 10 Tb/s، ويبين الجدول (1) أجيال الألياف الضوئية [3,4,5].

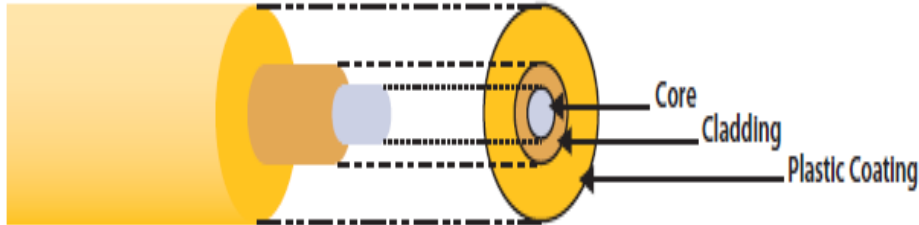
الجدول (1) : أجيال الألياف الضوئية .

ألياف متدرجة القرنية (Graded Index Fibers)	(1980)	0.8- μm systems
ألياف وحيدة النمط (Single Mode Fibers)	(1985)	1.3- μm systems
ليزرات وحيدة النمط (Single Mode Lasers)	(1990)	1.55- μm systems
المضخمات الضوئية (Optical Amplifiers)	(1996)	WDM systems
تضخيم رامان (Raman Amplification)	(2002)	L and S bands

الألياف الضوئية :

1 - البنية ، المبادئ ومميزات الألياف الضوئية أحادية النمط :

يبين الشكل (2) البنية الهندسية للألياف الضوئية التي هي عبارة عن أسطوانات من الزجاج متحدة المركز، وتتكون من جزء مركزي (اللب - النواة) له قرينة انكسار n_1 وغلاف يحيط به قرينة انكساره n_2 حيث $n_1 > n_2$ ، وتشكل هاتان الطبقتان دليل الموجة الذي يوجه الضوء وفق محوره . تغطي هذه المنطقة التي تلعب دوراً أساسياً في توجيه الضوء بطبقة واقية للحماية [3,6].



الشكل (2) : بنية الليف الضوئي .

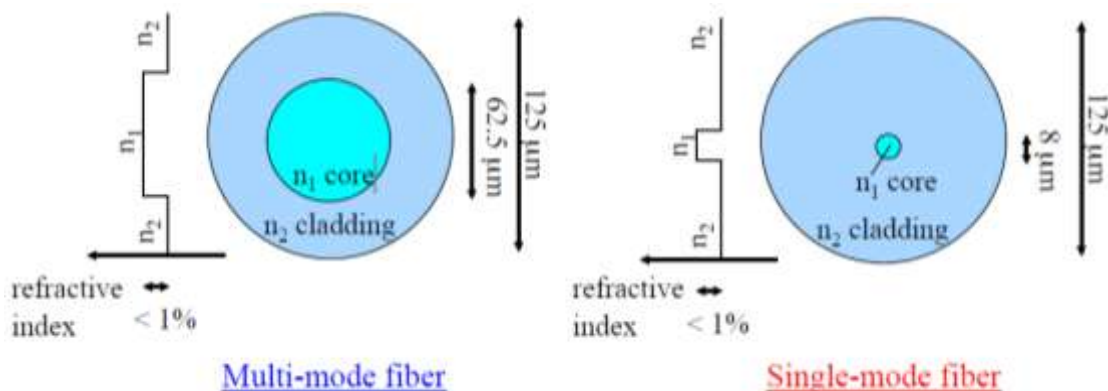
تصنع الألياف الضوئية عادة من السيليكا فهي مادة شبيهة بالزجاج وتتكون من السيليكون والأكسجين ولها الصيغة الكيميائية SiO_2 ، ويتواجد هذا المركب في الطبيعة على شكل بلورات مثل الكوارتز. حالياً ويفضل التقنيات المتطورة يمكن للمرء أن يمد كبل ضوئي قطره 10cm بطول 150 km. فعندما يدخل الضوء إلى الليف بزوايا محددة فإنه يخضع لانعكاس داخلي كلي متكرر وينتشر ضمنه وفق مسار متعرج ليصل إلى نهايته دون خسارة . يبين الشكل (3) فتحة النفوذ العددية N_A (Numerical aperture)، والتي تعرف بأنها أقصى زاوية دخول للضوء إلى الليف، θ_a كحد أقصى، حيث يتم قياسها بالنسبة لمحور الليف، وبذلك يمكن للضوء أن يوجه دون خسارة [7,8]. ولها الصيغة الآتية:

$$N_A = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$



الشكل (3): فتحة النفوذ العددية وزاوية القبول والزاوية الحرجة في الليف الضوئي .

لذلك فإن أي ضوء يرد ضمن دائرة نصف قطرها يقع خارج مخروط القبول سوف ينكسر على السطح البيني فيمر عبر الغلاف ويضيع. فالأشعة الضوئية التي تدخل إلى اللب بزاوية أكبر أو تساوي الزاوية الحرجة θ_c هي التي تنعكس انعكاساً كلياً ويتم توجيهها ضمن الليف. يبين الشكل (4) نوعي الألياف الضوئية، فإذا كان قطر اللب كبير نسبياً ($50 - 85 \mu\text{m}$) يمكن أن ينتشر ضمن الليف أكثر من نمط فنحصل على ليف متعدد الأنماط (Multi-Mode Fiber, MMF). يستخدم هذا النوع من الألياف في الشبكات المحلية التي تمتد لبضعة كيلومترات فقط، وتنتقل هذه الألياف البيانات باستخدام الضوء الصادر عن الديود الضوئي (LED) ضمن المجال ($850 - 1300 \text{ nm}$). وعلى العكس من ذلك إذا كان قطر اللب صغير مقارنة بالطول الموجي فإنه يسمح بانتشار نمط واحد فقط ويكون في هذه الحالة ليف ضوئي أحادي النمط (SMF) ذي قطر لب صغير بحدود $9 \mu\text{m}$ ، ويتم توفير نقل البيانات عن طريق الليزر التي تصدر الأطوال الموجية 1300 nm و 1550 nm ، والمضخمات الضوئية التي توضع على مسافات منتظمة من الليف [1,3,9].



الشكل (4) : مقارنة بين الليف أحادي النمط والليف متعدد الأنماط .

وتتميز الألياف الضوئية باثنتين من المعلمات (parameters)، [7,8]:

• الفرق في قرينتي الانكسار (refractive index difference) Δ : له قيمة نموذجية $\Delta = 3 \times 10^{-3}$ ويعطى

بالعلاقة:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

• التردد المنظم V (normalized frequency):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

حيث: a : نصف قطر اللب، λ_0 الطول الموجي في الخلاء، n_1 قرينة انكسار اللب، n_2 قرينة انكسار الغلاف .

2 - الأنماط في الألياف الضوئية [4-5]:

ينتشر الضوء في الليف وفق أنماط انتشار محددة. فمن أجل تحديد بنية الحقول الكهرومغناطيسية داخل الليف نستخدم معادلات مكسويل مع الأخذ بالحسبان المعلمات: a, λ_0, N_A .

هذه المعادلات لا يمكن أن تحل تماما لكن يمكن أن تصف سلوك الضوء في اللب بشكل جيد جدا ، و يوجد أنواع مختلفة من الأنماط: أنماط يتم توجيهها ضمن اللب وأنماط غير موجهة سريعة الزوال تنتشر في الغلاف. لذلك نكتب المعادلة التي تصف انتشار النمط بشكلها العام التالي :

$$\vec{\psi}(r, \varphi, z, t) = \vec{\psi}(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (4)$$

حيث: ψ مركبة الحقل المغناطيسي أو الكهربائي ، β ثابت الانتشار الطولي للنمط وفق المحور Z . وتكتب سرعة الطور للنمط :

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (5)$$

تنتشر الموجة الكهرومغناطيسية في وسط موحد الخواص بقرينة انكسار فعالة n_{eff} ، فنعتبر عن سرعة الطور لهذه الموجة بالعلاقة :

$$v_p = \frac{c}{n_{eff}} \quad (6)$$

من المعادلتين (5) و (6) نحصل على ثابت الانتشار الطولي للنمط:

$$\beta = \frac{\omega}{c} n_{eff} = k_0 n_{eff} \quad (7)$$

حيث: $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ثابت الانتشار في الخلاء ، n_{eff} قرينة الانكسار الفعالة للنمط . فنحصل على مجموعة

الأنماط المقادة التي تتحقق العلاقة :

$$n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0 \quad (8)$$

وفق هذا الشرط يتم توجيه الأشعة التي تقع ضمن فتحة النفوذ العددية.

ومن المعادلة (3) التي تحدد عدد الأنماط المنشرة في الليف نكتب: يكون الليف أحادي النمط فقط عندما يتحقق الشرط $V_c \leq 2.405$ ، يدعى التردد عند هذه القيمة بتردد القطع V_c ، حيث عند هذه القيمة يحدث انقطاع للأنماط ذات المراتب العليا وينتشر نمط وحيد فقط . فمن الشرط $V_c \leq 2.405$ ومن العلاقة (1) و (3) نستنتج مجال الأطوال الموجية التي يكون عندها الليف أحادي النمط (SMF) وفق العلاقة:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a N_A}{2.405} \quad (9)$$

حيث λ_c طول موجة القطع . وبالتالي ينتشر في الليف فقط الأطوال الموجية التي تحقق العلاقة : $\lambda_0 \geq \lambda_c$. تنتشر الأمواج الكهرومغناطيسية في الليف الأسطواني وفق الإحداثيات الأسطوانية (r, φ, z) . لذلك ولفهم آلية توزع الحقل داخل الليف يجب حل معادلة الموجة الجيبية وفق اتجاه الانتشار Oz . من أجل ذلك نكتب معادلات الحقل الكهربائي والمغناطيسي لمكسويل للأمواج المنتشرة في الألياف على شكل أمواج مستوية وفق العلاقة :

$$\vec{E}(r, \varphi, z, t) = \vec{E}(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (10 - a)$$

$$\vec{H}(r, \varphi, z, t) = \vec{H}(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (10 - b)$$

ما يهمنا هو مركبة الحقل الكهربائي فقط كون الليف مصنوع من مواد عازلة، لذلك نهمل مركبة الحقل المغناطيسي، فمن المعادلة (10 - a) نحصل على المعادلة الموجية للحقل E_z باستخدام اللابلاسيان Δ في الإحداثيات الأسطوانية:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + q^2 E_z = 0 \quad (11)$$

حيث : $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$; $q^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2$. بحل هذه المعادلة مع الأخذ بعين الاعتبار الشروط الحدية يمكن أن نحصل على أنماط الانتشار في الليف الضوئي ، والتي هي:

- $E_z = 0$ ، نحصل على نمط كهربائي عرضي TE .
- $H_z = 0$ ، نحصل على نمط مغناطيسي عرضي TM .

• $E_z \neq 0, H_z \approx 0$ ، نحصل على نمط هجين من النوع HE. أيضا $H_z \neq 0, E_z \approx 0$ ، فنحصل على نمط هجين من النوع EH. وهذه موجودة فقط في الألياف الضوئية الأسطوانية وغير موجودة في وسائط النقل المعدنية الشائع استخدامها.

3 - التخميد (Attenuation) في الليف الضوئي :

يعرف التخميد بأنه مقدار الخسارة في الطاقة الضوئية عند مرور الضوء في الألياف، ويعبر عنه بالديسبل (dB) الذي يستخدم لمقارنة مستويين من الطاقة [10]. يصل التخميد في الألياف اللدنة إلى القيمة 200 dB/km ، بينما لا يزيد في الليف الزجاجي عن القيمة 0.5 dB/km عند الطول الموجي $1.55 \mu\text{m}$ ، ويقسم إلى قسمين رئيسيين [11,12]:

- خارجي : ناتج عن الاقتران مع المنبع، ومع ليف آخر ، الانحناء ، وسوء التصنيع.
- داخلي : ناتج عن مادة اللب والمكون من الامتصاص والتبعثر.

ما يهمنا بشكل خاص هو التخميد الداخلي الناتج عن تبعثر رايلي α_R والذي يحدث بسبب وجود جسيمات نائفة صغيرة مطمورة في مادة متجانسة أصلا ، هذه الجسيمات ناتجة عن تغيرات موضعية في الكثافة أثناء عملية التصنيع وعن التراوح في تركيز الأكاسيد المؤسسة للمادة الليفية [4]. أيضا التخميد الناتج عن الامتصاص في المجال فوق البنفسجي α_{UV} ، وفي المجال تحت الأحمر α_{IR} ، والامتصاص الناتج عن شوارد الهيدروكسيل α_{OH} . بناءً على ذلك نكتب معامل التخميد الكلي [12] :

$$\alpha_{total} = \alpha_R + \alpha_{OH} + \alpha_{IR} + \alpha_{UV} \quad (12)$$

4 - التبدد اللوني (Chromatic Dispersion-CD) في الليف الضوئي:

تُرسل المعلومات في شبكات الاتصال على شكل معطيات رقمية آخذة شكل النبضات الضوئية . فالتبدد هو تعبير عام يشير إلى جميع الظواهر التي تؤدي إلى انبساط النبضات وتداخلها وتشوه المعلومة. فعند مرور النبضة الضوئية عبر الليف ، تصل إلى نهايته بعد زمن [2]:

$$T = \frac{L}{v_g} \quad (13)$$

حيث: T زمن الوصول ، v_g سرعة المجموعة لمكونات النبضة. فإذا كان $\Delta\lambda$ عرض المنبع الطيفي ، فإن التعرض الزمني للنبضة بعد قطعها مسافة L يعطى بالعلاقة التالية[2]:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\lambda} \Delta\lambda = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\lambda = L \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) \Delta\lambda = LD\Delta\lambda \quad (14)$$

حيث: D معامل التبدد ويقاس بـ $ps/nm.km$.

يتضمن بحثنا دراسة التبدد اللوني (CD) الذي هو عبارة عن مجموع كل من [13]:

- التبدد المادي: يصنع لب الليف من الزجاج . لذلك ويسبب تابعة الطول الموجي للوسط الذي ينتشر فيه سنستعين بمعادلة سيلمير [14](Sellmeier) ، التي تصف تابعة قرينة انكسار مادة لب الليف الطول الموجة المارة خلاله. فنعتبر عن التبدد المادي بدلالة المشتق الثاني لقرينة الانكسار التابعة للطول الموجي وفق العلاقة التالية[2,5]:

$$D_M = \frac{\lambda_0}{c} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (15)$$

حيث: D_M معامل التبدد المادي.

- تبدد الدليل الموجي: المرتبط بشكل أساسي بتصميم الليف ونعبر عنه بالعلاقة التالية [6] :

$$D_{wg} = \frac{-n_2 \Delta}{3\lambda_0} \times 10^7 [0.080 + 0.549(2.834 - V)^2] \quad (16)$$

حيث: D_{wg} معامل تبدد الدليل الموجي.

فيكون معامل التبدد اللوني الكلي:

$$D_{total} = D_M + D_{wg} \quad (17)$$

أهمية البحث وأهدافه :

* أهمية البحث :

وجدنا من خلال دراسة مرجعية معمقة لأبحاث و دراسات تتضمن تصميم الليف الضوئي أن جميع هذه الأبحاث تقتصر على دراسة مشكلة محددة للليف كالتخميد أو التبدد كونهما يضعان حدود على سعة الإرسال [1,11,15] ذلك بغية الحصول على ليف ضوئي جيد الإرسال. يقدم هذا البحث دراسة متكاملة لتصميم ليف ضوئي أحادي النمط يمكن استخدامه كقناة اتصال في الشبكات الضوئية ، وبالتالي تكمن أهمية البحث في كونه :

- يقترح البحث وبخطوات محددة آلية تصميم ليف ضوئي كقناة اتصال ضوئية .
- يقترح أيضا أهم البرمجيات الحديثة المستخدمة كأداة لتصميم ودراسة الليف .
- يحدد العلاقة التفاعلية بين البرمجيات المستخدمة في عملية التصميم .

* أهداف البحث:

- دراسة وتصميم ليف ضوئي يعمل ضمن النافذة الموسعة (C-band) $(1.5 - 2.4 \mu m)$.
- تسليط الضوء على أهم برامج المحاكاة المستخدمة في حساب معاملات الليف وإيجاد العلاقة التفاعلية بينها .
- فرز معاملات الليف وتحديد البرنامج أو المحاكى المناسب .

طرائق البحث ومواده :

- 1-دراسة نظرية معمقة للألياف الضوئية متعددة ووحيدة النمط ، ودراسة انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية فيها.
- 2-حساب ثوابت سيلمير باستخدام المحاكى OptiFiber ، واستخدام برنامج الماتلاب لإيجاد علاقة قرينة انكسار اللب كتابع لطول الموجة الضوئية .
- 3-تصميم الليف الضوئي بمجرد الحصول على $n(r)$ وحساب شدة الحقل $E(r, \varphi, z)$ ثلاثي الأبعاد وقرينة الانكسار الفعالة n_{eff} باستخدام COMSOL Multiphysics، ومن ثم في عملية محاكاة مساعدة تم استخدام الماتلاب لحساب التبدد الناتج عن بنية المادة ، وتحديد تخامد الليف أيضا باستخدام الماتلاب.

النتائج والمناقشة:

1 إيجاد ثوابت معادلة سيلمير:

بسبب تابعة قرينة انكسار المادة للطول الموجي المنتشر ضمنها، قمنا بإيجاد قرينة انكسار مادة اللب من معادلة سيلمير باستخدام برنامج OptiFiber الذي يعطينا ثوابت سيلمير لمادة السيليكا النقية المكونة لللب الليفي وفق مايلي:

- 1 تقوم بتشغيل برنامج المحاكاة.
- 2 تختار من القائمة Design Fiber من أجل تحديد شكل دليل الموجة لللب والغلاف.
- 3 تختار Refractive Index Distribution لتحديد قرينتي انكسار منطقتي اللب والغلاف.
- 4 تختار Add لإضافة منطقتي اللب (Region0) والغلاف (Region1).
- 5 تضغط على Region0 ثم نختار Define.
- 6 تختار Host ثم Define لتحديد نوع مادة اللب ثم نختار PureSilica فتظهر لنا نافذة تحوي معادلة سيلمير وفيها ثوابت سيلمير الخاصة بمادة السيليكا النقية كما في الشكل(5):

Parameters of Material

$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}$$

Definition

Name: Pure silica

Sellmeier Coefficients

A_1 : 0.6961663 A_2 : 0.4079426 A_3 : 0.897479

λ_1 [μm]: 0.0684043 λ_2 [μm]: 0.1162414 λ_3 [μm]: 9.896161

NonLinear refractive Index: 4e-016 [cm²/W]

Library

1.0% fluorine-doped silica
3.0% B2O3-doped silica
3.1% germania-doped silica
9.1% P2O5-doped silica
Pure fused GeO2
Pure P2O5
Pure silica
ZBLAN

<< Add Get >>
Delete
Cancel OK

الشكل (5) : معادلة سيلميروثوابتها الخاصة بمادة السيليكا النقية .

وعلية ننظم جدولاً بثوابت سيلميروثوابتها الليفي:

الجدول (2) : معادلة سيلميروثوابتها التي تم التوصل إليها.

$n_{(\lambda)}^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}$		
$A_1 = 0.6961663$	$A_2 = 0.4079426$	$A_3 = 0.897479$
$\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$	$\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$	$\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$

تم كتابة برنامج ماتلاب لمعادلة سيلميروثوابتها، ويبين المقطع أدناه نص البرنامج المكتوب لحساب $n_{(\lambda)}$:

% n relation by Lambda

p1=(0.6961663*lambda^2)/((lambda^2)-0.0684043^2);

p2=(0.4079426*lambda^2)/((lambda^2)-0.1162414^2);

p3=(0.8974794*lambda^2)/((lambda^2)-9.896161^2);

t=p1+p2+p3;

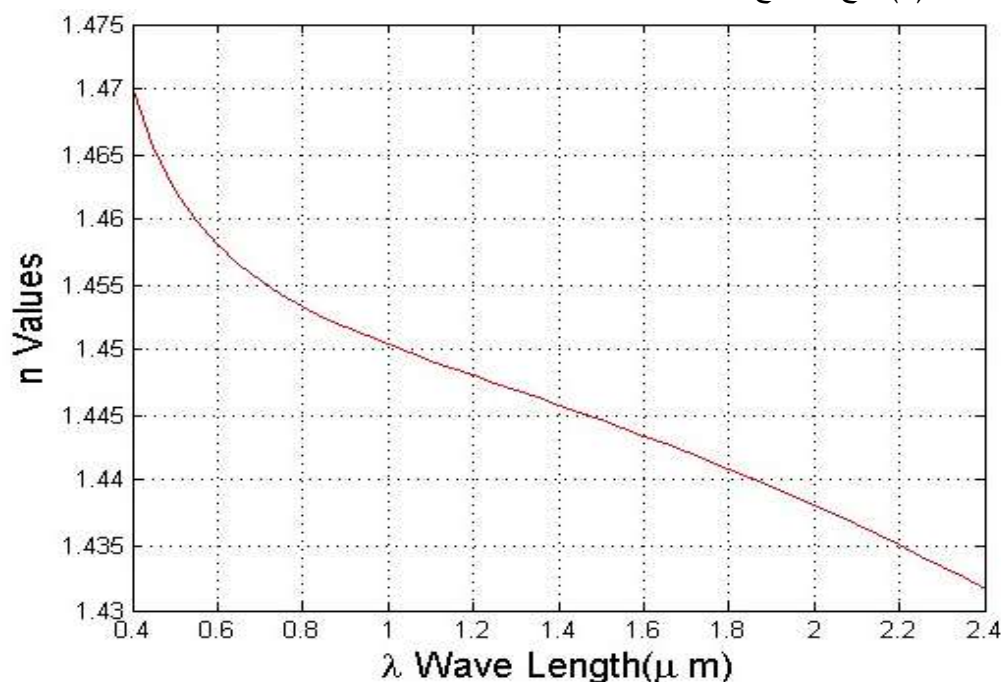
n=(t+1)^(1/2);

```

plot(y_vector,n_vector,'r');
title('n');
xlabel('\lambda Wave Length(\mu m)');
ylabel('n Values');
%legend('\lambda / n Line');
datacursormode on;
grid on;

```

ويبين الشكل (6) نتائج البرنامج :



الشكل (6) : تغير قرينة الانكسار بتابعة الطول الموجي.

ويبين الجدول (3) نتائج $n(\lambda)$ التي تم الحصول عليها من برنامج الماتلاب :

الجدول (3) : قيم قرانن الانكسار الموافقة لكل طول موجي .

Lambda (μm)	$n(\lambda)$
1.2	1.448050161
1.25	1.447483120
1.3	1.446917529
1.35	1.446350452
1.4	1.445779440

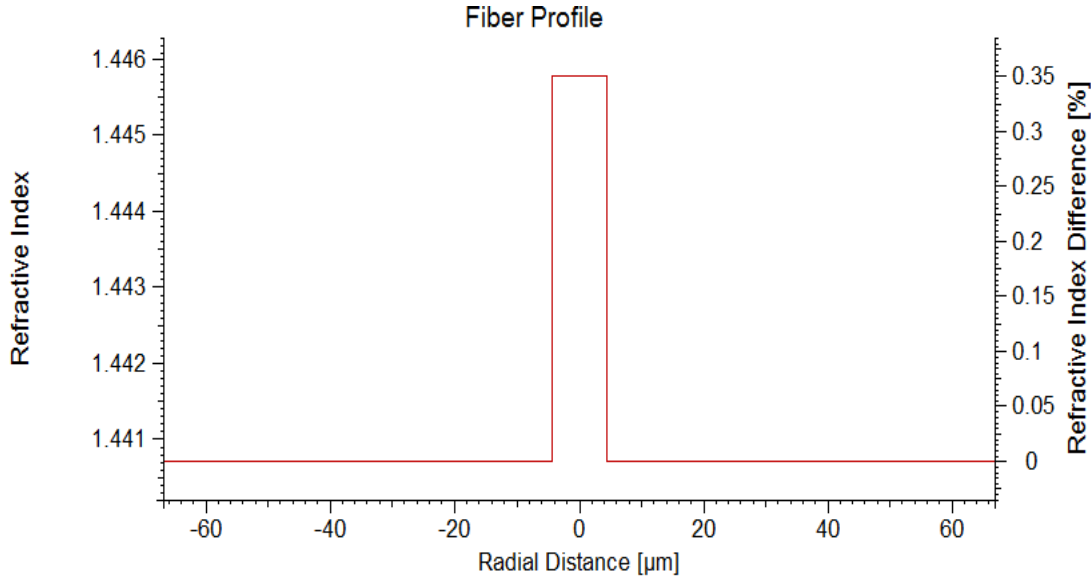
1.45	1.445202428
1.5	1.444617659
1.55	1.444023621
1.6	1.443419001
1.65	1.442802648
1.7	1.442173542
1.75	1.441530770
1.8	1.440873508
1.85	1.440201004
1.9	1.439512566
1.95	1.438807550
2.0	1.438085352
2.1	1.436587154
2.15	1.435810084
2.2	1.435013685
2.25	1.434197460
2.3	1.433360926
2.35	1.432503601
2.4	1.431625010

وعليه تم تصميم الليف ليكون أحادي النمط وفق المعلمات المبينة في الجدول (4) :

الجدول (4) : معلمات الليف المستخدمة في عملية التصميم .

طول الموجة في الخلاء	نصف قطر الغلاف	نصف قطر اللب	الفرق في قرينتي الانكسار	فتحة النفوذ العدية	قرينة انكسار الغلاف	قرينة انكسار اللب
$\lambda_0 \geq$	a_{cl}	a_{co}	Δ	N_A	n_2	$n_1 = n(\lambda)$
$1.4 \mu m$	$65 \mu m$	$4.428 \mu m$	3.5×10^{-3}	0.121008	1.440706	1.445779

فحصل على ليف أحادي النمط ذي قرينة انكسار درجية كما في الشكل (7) :



الشكل (7): قرينة انكسار اللب والغلاف للليف المصموم فوق المعطيات الموضحة في الجدول (4).

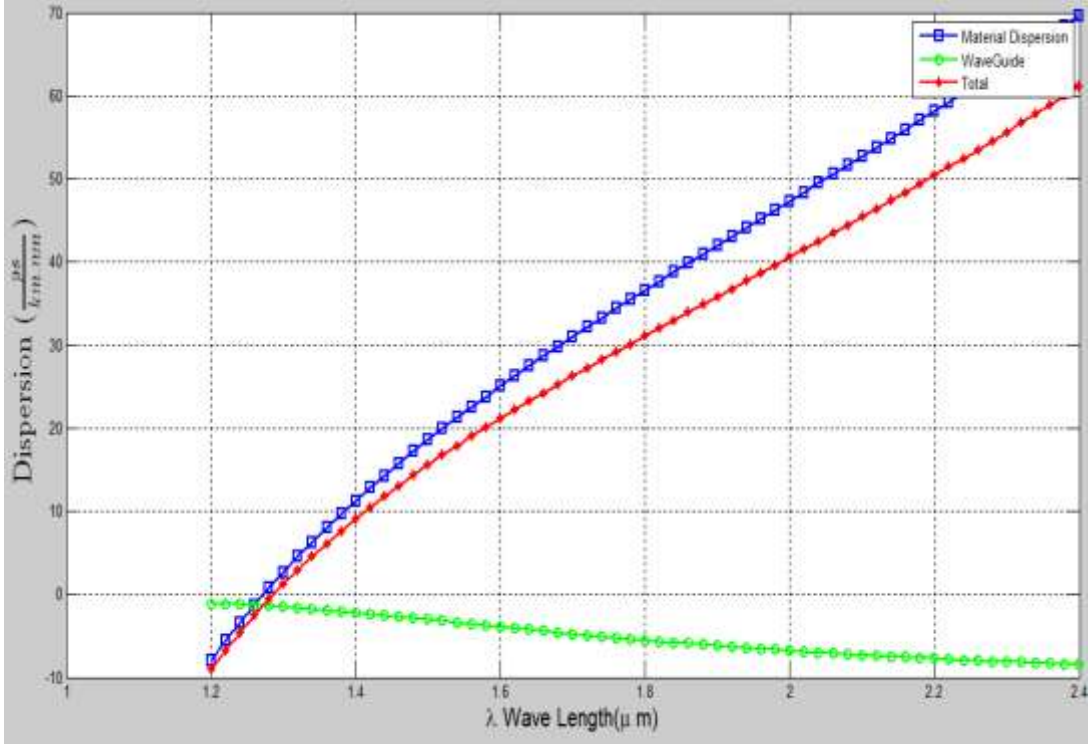
2 - حساب التبدد اللوني في الليف المصمم :

بالاستفادة من قرائن الانكسار الفعالة التي حصلنا عليها عند عدة قيم لأطوال موجية ضوئية باستخدام المحاكى COMSOL تم كتابة برنامج ماتلاب بالاستفادة من نتائج COMSOL لحساب التبدد المادي D_M والاستفادة من العلاقة (16) لحساب تبدد الدليل الموجي D_{wg} . ويبين المقطع أدناه نص البرنامج المكتوب لحساب التبدد الكلي:

```
%Evulate n relation with Lambda Values
n_vector=subs(n,lambda,y_vector);
%-----
%Derivatingn by lambda twice
n_der_function=diff(n,lambda,2);
%Calcualte derivation values
n_derivatives=vpa(subs(n_der_function,lambda,y_vector));
%-----
%calcualte Material Dispersion Values
for i=1:c
material_dispersion(i)=vpa((y_vector(i)*(1)*n_derivatives(i))/(3*power(10,8)));
end
%-----
%=====
%Plotting the results
% figure
% subplot(2,2,1)
% plot(y_vector,n_vector,'r');
% title('n');
% xlabel('\lambda Wave Length(\mu m)');
% ylabel('n Values');
% legend('\lambda / n Line');
% datacursormode on;
```

% grid on;
figure

وبين الشكل (8) نتائج البرنامج:



الشكل (8) : منحنيات التبدد D_{total} , D_M , D_{Wg} حيث بلغت قيمة التشتت اللوني 18.9822 ps/nm.km عند الطول الموجي $1.56 \mu\text{m}$ ، و 21.1479 ps/nm.km عند $1.6 \mu\text{m}$ ، و 26.2523 ps/nm.km عند $1.7 \mu\text{m}$.

ونبين في الجدول (5) نتائج التبدد اللوني التي تم الحصول عليها من برنامج الماتلاب :

الجدول (5) : قيم التبدد D_{total} , D_M , D_{Wg} الموافقة لكل طول موجي.

Sr. No:	Wavelength (μm)	Dispersion of SMF ps/nm.km		
		Material Dispersion	Waveguide Dispersion	Total Dispersion
1	1.2	-7.9023	-1.1264	-9.0286
2	1.26	-1.2919	-1.2573	-2.5493
3	1.3	2.6451	-1.4548	1.1903
4	1.36	7.9901	-1.8567	6.1334
5	1.4	11.2465	-2.1703	9.0762
6	1.46	15.7625	-2.6782	13.0843
7	1.5	18.5708	-3.0291	15.5417

8	1.56	22.5405	-3.5583	18.9822
9	1.6	25.0543	-3.9064	21.1479
10	1.66	28.6677	-4.4141	24.2536
11	1.7	30.9922	-4.7399	26.2523
12	1.76	34.3822	-5.2063	29.1759
13	1.8	36.5923	-5.5011	31.0912
14	1.86	39.8547	-5.9185	33.9363
15	1.90	42.0056	-6.1798	35.8258
16	1.96	45.2127	-6.5468	38.6658
17	2	47.3465	-6.7752	40.5714
18	2.06	50.5545	-7.0940	43.4605
19	2.1	52.7049	-7.2913	45.4137
20	2.16	55.9595	-7.5655	48.3940
21	2.2	58.1544	-7.7345	50.4199
22	2.26	61.4942	-7.9684	53.5258
23	2.3	63.7577	-8.1119	55.6457
24	2.36	67.2169	-8.3099	58.9071
25	2.4	69.5707	-8.4309	61.1398

3 - حساب التخميد في الليف الضوئي المصمم :

بما أن اللب مصنوع من السيليكا النقية فإننا نهمل الامتصاص في المجال فوق البنفسجي α_{UV} . حيث تم الحصول على معادلات التخميد وثوابتها من برنامج OptiFiber وتم تنظيمها في الجدول (6) :

الجدول (6) : معادلات التخميد وثوابتها.

تبعثر رايلي	الامتصاص في المجال IR	الامتصاص OH
$\alpha_R = \frac{A}{\lambda_0^4}$	$\alpha_{IR} = A \exp\left(\frac{-B}{\lambda_0}\right)$	$\alpha_{OH} = \frac{A_i}{1 + \left(\frac{\lambda_0 - \lambda_i}{\sigma_i}\right)^2}$
$A = 0.9 \frac{dB}{km} \mu m^4$	$A = 4.5 \times 10^{11} dB/km$ $B = 47.5 \mu m$	$A_i = 0.2 dB/km$ $\lambda_i = 1.38 \mu m$ $\sigma_i = 0.0139 \mu m$

تم كتابة برنامج ماتلاب بالاستفادة من علاقات التخميد السابقة لحساب التخميد الكلي. ويبين المقطع أدناه نص

البرنامج المكتوب:

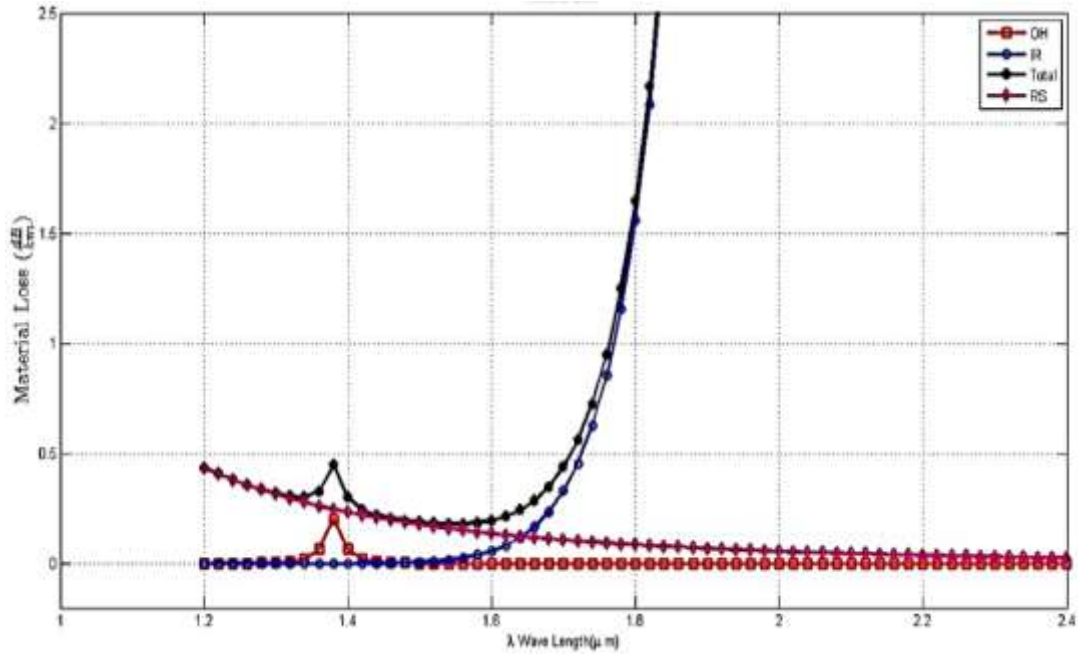
```
%OH
Ai=0.2;
yi=1.38;
segma=0.0139;
fl=lambda-yi;
```

```

f2=f1/segma;
f3=power(f2,2);
oh=Ai/(1+f3);
oh_values=sub(oh,lambda,y_vector);
%total
a_total=ar_values+a_ir_values+oh_values;
%plotting
plot(y_vector,oh_values,'r',y_vector,a_ir_values,'b','LineWidth', 2); hold on;
colour_teal = [220 8 138] ./ 255;
color_black= [0 0 0] ./ 255;
plot(y_vector,a_total,'color',color_black,'LineWidth', 2); hold on;
plot(y_vector,ar_values,'Color',colour_teal,'LineWidth', 2);
title('Material Loss');
xlabel('\lambda Wave Length(\mu m)');

```

ويبين الشكل (9) نتائج البرنامج :



الشكل (9) : منحنيات التخميد α_{total} ، α_{OH} ، α_{IR} ، α_R . حيث بلغت قيمة التخميد الكلي 0.180dB/km عند الطول الموجي 1.56μm، و 0.1957dB/km عند 1.6μm، و 0.4381dB/km عند 1.7μm.

ويبين الجدول (7) نتائج التخميد الكلي التي تم الحصول عليها من برنامج الماتلاب :

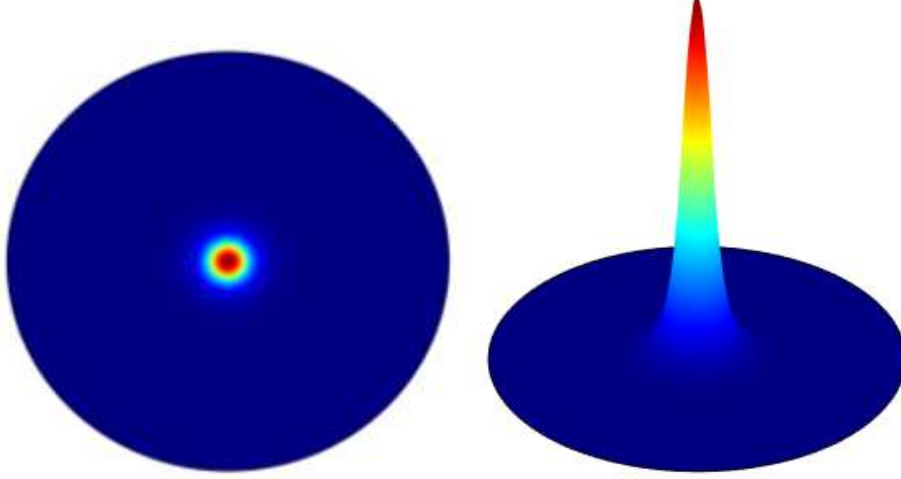
الجدول (7) : قيم التخميد $\alpha_{total}, \alpha_{OH}, \alpha_{IR}, \alpha_R$ الموافقة لكل طول موجي .

Sr. No:	Lambda (μm)	Loss (dB/km)			
		α_R	α_{IR}	α_{OH}	α_{total}
1	1.2	0.4340	2.8999e-06	0.0012	0.4352
2	1.26	0.3571	1.9099e-05	0.0026	0.3597
3	1.3	0.3151	6.0920e-05	0.0059	0.3210
4	1.36	0.2631	3.0538e-04	0.0651	0.3285
5	1.4	0.2343	8.2836e-04	0.0651	0.3002
6	1.46	0.1981	0.0033	0.0059	0.2073
7	1.5	0.1778	0.0080	0.0026	0.1884
8	1.56	0.1520	0.0269	0.0012	0.1800
9	1.6	0.1373	0.0576	7.9521e-04	0.1957
10	1.66	0.1185	0.1683	4.9167e-04	0.2873
11	1.7	0.1078	0.3300	3.7665e-04	0.4381
12	1.76	0.0938	0.8555	2.6725e-04	0.9495
13	1.8	0.0857	1.5583	2.1882e-04	1.6443
14	1.86	0.0752	3.6506	1.6758e-04	3.7259
15	1.9	0.0691	6.2496	1.4280e-04	6.3188
16	1.96	0.0610	13.4344	1.1480e-04	13.4955
17	2	0.0563	21.8132	1.0047e-04	21.8695
18	2.0600	0.0500	43.5653	8.3533e-05	43.6154
19	2.1000	0.0463	67.5904	7.4513e-05	67.6367
20	2.1600	0.0413	126.6937	6.3494e-05	126.7351
21	2.2000	0.0384	188.9730	5.7452e-05	189.0115
22	2.2600	0.0345	335.2291	4.9887e-05	335.2637
23	2.3000	0.0322	483.1560	4.5644e-05	483.1882
24	2.3600	0.0290	816.8004	4.0227e-05	816.8295
25	2.4000	0.0271	1.1424e+03	3.7135e-05	1.1424e+03

4 - حساب توزع الحقل الكهربائي للليف المصمم :

- بسبب صعوبة إيجاد حلول تحليلية (تفصيلية) للعلاقة (8)، فإنه من المناسب استخدام الطرائق العددية لإيجاد توزع الحقل الكهربائي ضمن الليف الضوئي. لذلك تم استخدام المحاكى الشهير COMSOL Multiphysics لحل المعادلة (11). ويمكن تلخيص كيفية حساب الحقل باستخدام المحاكى بالخطوات التالية :
- 1 إنشاء المشروع: نقوم بفتح البرنامج من قائمة Model Wizard، ومن ثم نختار الأبعاد الهندسية للتصميم ثلاثي البعد 3D .
 - 2 ضبط بارامترات الليف الضوئي للقلب والغلاف .
 - 3 ضبط قرينة الانكسار لمادة القلب والغلاف .
 - 4 مرحلة التشبيك: تنفيذ هذه العملية في تقطيع منطقة العمل إلى حيزات صغيرة جداً، ويستفاد من ذلك في تنفيذ المحاكاة لكل جزء من الليف. حيث يستخدم المحاكى طريقة العناصر المنتهية .

- 5 عملية التحليل: من أجل حساب توزيع الحقل الكهربائي من أجل كل طول موجي مرغوب (يزودنا المحاكي بقيمة قرينة الانكسار الفعالة n_{eff} لكل نمط مقاد لكل طول موجي).
- 6 تبين الأشكال الآتية نتائج المحاكاة عند الطول الموجي $\lambda_0 = 1.7\mu m$:



شكل (10-a): شكل (10-b) :

توزيع ثنائي البعد 2D للحقل في الليف المصمم من أجل النمط توزيع ثلاثي البعد 3D للحقل في الليف المصمم من أجل النمط LP_{01} حيث: $\lambda_0 = 1.7\mu m, n(\lambda) = 1.442173$ حيث: $\lambda_0 = 1.7\mu m, n(\lambda) = 1.442173$

نلاحظ من الشكل (10) أنه هناك عملية حصر للنمط الأساسي LP_{01} عند الأطوال الموجية المرغوبة .

الاستنتاجات والتوصيات:

* الاستنتاجات:

صمم البحث ودرس ليف ضوئي أحادي النمط بنواة وغلاف من الزجاج.
حدد البحث مواصفات الليف الضوئي عند الطول الموجي $\lambda_0 = 1.7\mu m$ ، وتشير النتائج التي حصلنا عليها إلى صلاحية استخدام الليف الضوئي المصمم كقناة اتصال.
عند هذا الطول الموجي نجد: من الجدول (5) نجد أن قيمة التبدد بلغت 26.252 ps/nm.km ، أيضا ومن الجدول (7) قيمة التخميد بلغت 0.4381 dB/km .
تم وضع برنامجين لدراسة تبدد وتخميد الألياف الضوئية باستخدام الطرق العددية الجديدة المتاحة في برنامج ماتلاب، وتم التحقق من صلاحية البرنامجين عدديا.

* التوصيات:

يوصي البحث بدراسة النقاط التالية :
لعمل على تخفيض قيمة التبدد للليف المصمم باستخدام تقنية الألياف الفوتونية.
تجربة أثر تغيير قطر الغلاف الخارجي على أداء الليف.
متابعة دراسة إمكانية ربط البرامج المكتوبة مع البرنامج COMSOL Multiphysics.

المراجع :

- [1] SAURABH; and KUMAR,V. *Power Communication using Optical-Fiber*. IPASJ International Journal of Electrical Engineering (IJEE), India, Vol. 3, No. 12, 2015, 11-15.
- [2] AGRAWAL,G.P.*Fiber-Optic Communication Systems*. 3nd. ed, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002, 546.
- [3] JOHNSON, M. *Optical Fiber, Cables and Systems*. ITU, Switzerland, 2010, 299.
- [4] KUMAR, S; and DEEN, M. J. *Fiber Optic Communications-Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd., UK, 2014, 553.
- [5] SENIOR, J. M. *Optical Fiber Communications-Principles and Practice*.3nd. ed, Pearson Education Limited, England, 2009, 1076.
- [6] THYAGARAJAN, K;and GHATAK, A. *Fiber Optic Essentials*.John Wiley & Sons, Inc., USA, 2007, 242.
- [7] DUTTA, A. *Mode Analysis of Different Step Index Optical Fibers at 1064nm for HighPower Fiber Laser and Amplifier*. International Journal of Electronics and Communication Technology (IJECT), India, Vol. 6, No. 3, 2015, 74-77.
- [8] NECHIBVUTE, A;and MUDZINGWA, C. *Modelling of Optical Waveguide using COMSOL Multiphysics*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Zimbabwe, Vol. 2, No. 5, 2013, 1663-1667.
- [9] DUBEY, P. K; and SHUKLA,V. *Dispersion in Optical Fiber Communication*. International Journal of Science & Research (IJSR), India, Vol. 3, No. 10, 2014,236-239.
- [10] SAEID, S. H. *Computer Simulation and Performance Evaluation of Single Mode Fiber Optics*. Proceedings of the World Congress on Engineering, UK, Vol. 2, 2012.
- [11] BASHER, M. K; KHAN, M. R. H; AKAND, M. A. R; HASAN, M. R; HOQ, M; and MAMUM, R. A. *Design and Simulation of a Low Loss Single Mode Optical Fiber*. International Journal of Integrated Sciences & Technology (IJIST), Bangladesh, Vol. 1,2015, 32-37.
- [12] ZHI, W; GUOBIN,R; SHUQIN, L; and SHUI SHENG, J. *Loss properties due to Rayleigh Scattering in Different Types of Fiber*. OPTICS EXPRESS, China, Vol. 11, No. 1, 2003, 39-47.
- [13] NAGARKAR, R. P. *Dispersion Analysis of Optical Fiber Using MATLAB*. International Journal of Advanced Engineering and Nano Technology (IJAENT), India, Vol. 2, No. 6, 2015, 19-20.
- [14] KITAMURA, R; PILON, L; and JONASZ, M. *Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature*. APPLIED OPTICS, USA, Vol. 46, No. 33, 2007, 8118-8133.
- [15] TAHA, S. A; SHELLAL, M. M; and KADHIM, A. C. *Simulation of Gaussian Pulses Propagation Through Single Mode Optical Fiber Using MATLAB*. Iraqi Journal of Science, Iraq, Vol. 54, No. 3, 2013, 601-606.