

دراسة مخططات الأنماط لليف ضوئي ليزري درجي ومقارنتها مع مخطط أنماط ليف متدرج من حيث تابع القطع (V)

الدكتور نظير ديوب *

(تاريخ الإيداع 28 / 10 / 2018. قُبل للنشر في 10 / 2 / 2019)

□ ملخص □

من المعروف جيداً أن عمل الليف الضوئي يعتمد بشكل أساسي على مبدأ من مبادئ الضوء الهندسي وهو الانعكاس الداخلي الكلي الذي يتطلب أن تكون قرينة انكسار الوسط الذي يرد منه الضوء (اللب) n_1 أكبر من قرينة انكسار الوسط الثاني (الغلاف الزجاجي) n_2 وبالتالي n_1 يمكن أن تتغير بطرق مختلفة منها أن تكون ثابتة في كامل الوسط الأول وبالتالي نحصل على ليف يدعى ليف ذو قفزة في القرينة أو أن تكون متغيرة بشكل متدرج مع بعد النقطة في الوسط الأول عن مركز الليف وعندئذ يدعى الليف بالليف المتدرج قرينة الانكسار ومن المعروف أن شكل أنماط الليف تعتمد بشكل كبير على قرائن انكسار الوسطين لذا سندرس في هذا البحث أثر آلية تغير قرينة الانكسار على أنماط الليف من ثم إجراء مقارنة بين أنماط الليفين المذكورين أعلاه، وذلك بتابعة تابع القطع (V) .

الكلمات المفتاحية: ليف ضوئي - أنماط الليف الضوئي - ليف درجي (SI) - ليف متدرج (Grin) تابع القطع.

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

Studying the pattern modes of the optical fiber of the laser and comparing it with pattern modes of Graded fiber in terms of the ellipse function (V)

Dr. Nazir Dayoub *

(Received 28 / 10 / 2018. Accepted 10 / 2 / 2019)

□ ABSTRACT □

It is well known that the work of optical fiber depends, mainly, on a principle of light engineering which is the total internal reflection, which requires that the refraction index of the medium from which the light (pulp) n_1 is greater than the refraction index of the second medium (glass cover) n_2 and thus n_1 can be Changed in different ways, such as being fixed in all the first medium and thus we get a fiber called a leap in the index fiber, or to be changeable gradually after the point in the first medium of the center of the fiber so the fiber is called then:the fiber with a gradual refraction index. It is well known that the form of the fiber patterns depends Largely on the refraction index of the both mediums. we are going to examine the impact of refraction mechanism changing mechanism on the patterns of the fiber, then to compare between the patterns of the two mentioned above, in terms of the cutting function(V).

Keywords: Optical fiber - optical fiber patterns– step-index (SI) – Graded-index (Grin)-cutting function.

* Associate Professor - Physics Department - Faculty of Science - Tishreen University - Lattakia – Syria.

مقدمة:

تستخدم أسلاك النحاس في جمل الاتصالات الحالية لنقل المعلومات عند الأطوال الموجية الميكروية، لكن محدودية هذه الجمل من حيث كمية المعلومات المرسله وكذلك التكلفة الاقتصادية العالية وبعض العيوب في جودة نقل الإشارات جعل العلماء يبحثون عن إمكانية الحصول على جمل اتصالات في المجال الضوئي باستخدام الألياف الضوئية فهي أقل كلفة اقتصادية حيث تصنع هذه الألياف من الزجاج الذي يصنع بدوره من الرمل.

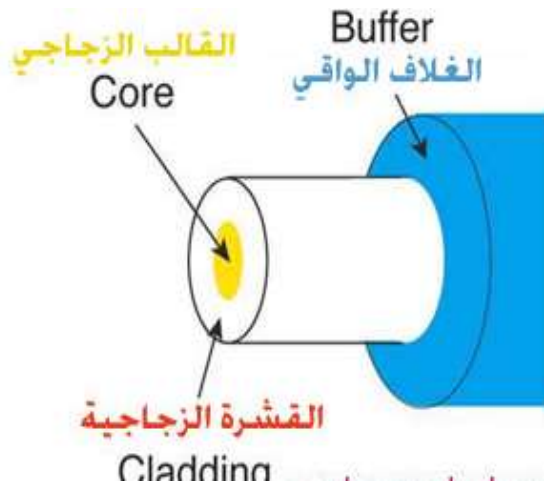
يرافق ذلك العديد من المشاكل سواء من حيث بنية الليف البصري بحد ذاته وكيفية انعكاس هذه البنية على الأطوال الموجية للضوء الذي ينتشر عبره، بالإضافة إلى مشاكل تبدد الأمواج الضوئية وكيفية الحد من آثاره. لذا فإن أي جهد علمي في هذا المجال يعتبر عامل مساعد لتطوير هذه الجمل من الاتصالات، ويأتي بحثنا ضمن هذا المجال، حيث يبحث عن أثر آلية تغير قرائن الانكسار في مكونات الليف البصري على عملية انتشار الأمواج الضوئية ضمن الليف.

كما هو معروف يتكون الليف البصري من ثلاثة أجزاء رئيسية وهي:

1- اللب (core): وهو منطقة داخلية تتكون عادة من الزجاج أو البلاستيك وتتميز خلالها الإشارة الضوئية وتتميز بمعامل انكسار n_1 محدد.

2- الغلاف العاكس (cladding): وهو مادة تحيط باللب وتكون ذات معامل انكسار أصغر من معامل انكسار اللب وبالتالي تعمل على انعكاس الموجة الضوئية انعكاساً كلياً لتبقى داخل اللب.

3- الغلاف الواقي (buffer coating): وهو غلاف خارجي يحمي باقي الأجزاء من التلف والكسر والرطوبة كما يبين ذلك الشكل (1) [1].



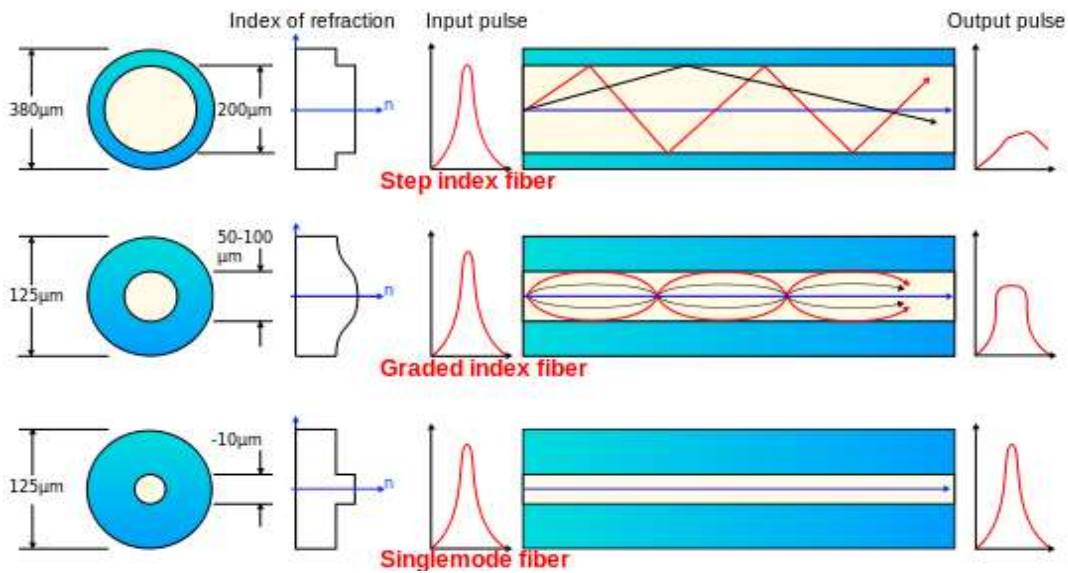
الشكل (1): يوضح مكونات الليف الضوئي.

أهمية البحث وأهدافه:

يتكون اللب عادة من $\text{GeO}:\text{SiO}_2$ واللبوس من SiO_2 أو أن يكون اللب مؤلفاً من SiO_2 واللبوس من SiO_2 : B_2O_5 وعادة يشاب السلكون بأي من مادتي (GeO_2 , P_2O_3) اللتين لهما قرينة انكسار اصغر من قرينة انكسار السليكا ([13]

نأخذ ليف، اللب فيه مكون من مادة قرينة انكسارها $n_1=1,48$ وقطره $2a$. الألياف الزجاجية رقيقة جداً وتختلف أبعادها من ليف لآخر، الليف أحادي النمط (النسق) قطر لبه $(8-12\mu\text{m})$ وفقاً للطول الموجي المستخدم، وقطر لبوسه بحدود $(125\mu\text{m})$ ، أما الليف متعدد الأنماط فإن قطر لبوسه بحدود $(125-400\mu\text{m})$ وقطر لبه بحدود $(50-200\mu\text{m})$.

يحيط باللب جزء خارجي قرينة انكساره $n_2=1,46$ حيث $(n_2 < n_1)$ شرط حدوث الانعكاس الداخلي الكلي لكي يشكل الليف موجه موجة. ومهما يكن نوع الليف فإن اللبوس سيحاط بطبقة بلاستيكية عازلة (Jacket) للحماية قطرها $2,2\text{mm}$ تقريباً، كما أن هناك عدد آخر من الألياف التي تصنع بطريقة هندسية مختلفة. الشكل (2) المرفق يبين نوعين من الألياف البصرية، الليف ذو القفزة في القرينة (Step-Index, SIF) القسم العلوي، وليف ذو قرينة انكسار متدرجة (Graded-Index, Grin) الشكل في الوسط، بالإضافة إلى الليف أحادي النمط (Single mode fiber, SMF). [4.5]



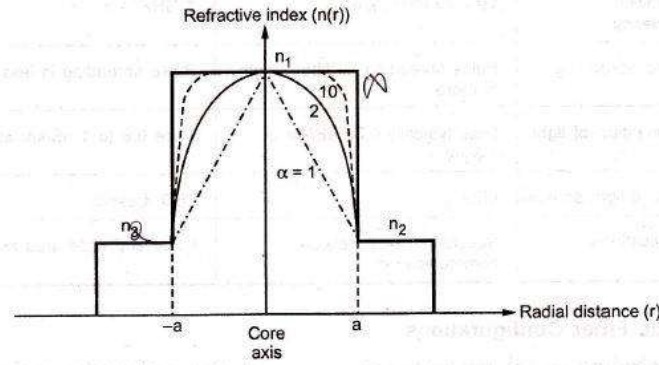
الشكل (2): يمثل الأنواع الثلاثة من الألياف الضوئية، في الأعلى ليف ذو قرينة انكسار خطوية، في الوسط ليف ذو قرينة انكسار متدرجة و في الأسفل ليف أحادي النمط.

بالإضافة إلى الشكلين السابقين في تغيير قرينة انكسار اللب هناك أشكال أخرى يمكن إيجازها بالعلاقة التالية:

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - \frac{2r}{a} \Delta}^\alpha \quad r \leq a$$

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 \quad r > a$$

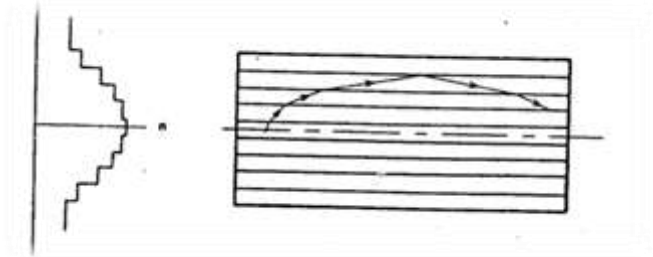
حيث أن: α متحول يأخذ عدة قيم تحدد الشكل العام فيما إذا كان مثلثياً $\alpha=1$ أو على شكل قطع مكافئ $\alpha=2$ أو ليف عتبي $\alpha=\infty$ ، نصف قطر اللب، d قطر اللب، $\Delta \approx 0,013$ مقدار صغير يحدد الخطوة وعادةً يكون أصغر بكثير من الواحد. الشكل (3) يوضح قرينة انكسار اللب بتابعية البعد عن مركز الليف [9.10].



الشكل(3): يوضح تغير قرينة انكسار اللب بتابعة r ومن أجل قيم محددة ل α .

طرائق البحث ومواده:

تنتشر الأشعة الضوئية في الليف الضوئي بطريقة التذبذب الشكل (4) التالي، ويسبب دليل الانكسار المتغير أن تتوجه الأشعة من جديد وباستمرار نحو محور الليف، ويمكن أن نوضح هذا التوجيه الجديد بتمثيل التغير المتواصل في دليل الانكسار بسلسلة من التغيرات الدرجية الصغيرة، حيث يمكن التحكم بالدقة من خلال زيادة عدد الدرجات. إن العدد من ألياف Grin تشبه هذا النموذج الدرجي وذلك لأنها صنعت على شكل طبقات. حيث تنتشر الأشعة الضوئية ضمن منطقة لب الليف وتكون مساراتها على شكل خطوط منحنية وليست مستقيمة كما هو الحال في الليف ذو القفزة في



القرينة SI.

الشكل(4): نموذج درجي لليف GRIN

من أجل إتمام هذه الدراسة سنقوم بتعريف أهم المعاملات الفيزيائية ومن ثم استنباط نموذج علاقات رياضية تصف ظواهر انتشار الأمواج الضوئية ضمن الألياف البصرية والقيام بدراسة مخططات الأنماط من خلال هذا النموذج وبالتالي إجراء مقارنة بين هذه المخططات في كلا النمطين من تغير قرائن الانكسار. يرمز أحياناً لقرينة انكسار اللب $n_c = n_1$ وقرينة اللبوس $n_g = n_2$ حيث $(n_c > n_g)$. إن جميع زوايا الشعاع للأموال المنتشرة تقع بين 0° و 90° حيث θ_c الزاوية الحرجة للانعكاس الداخلي الكلي والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

وتقع أدلة الانكسار الفعالة المطبقة في المجال التالي [6.7.8]:

$$n_2 \leq n_{eff} \leq n_1$$

1- شرط النمط (الأسلوب):

لا يُسمح لجميع أشعة الموجة المنتشرة ضمن الليف التي تقع بين الزاوية الحرجة θ_c والزاوية 90° بالانتشار خلال البنية، وإنما يسمح لبعض هذه الاتجاهات فقط والتي تتسجم مع أنماط دليل الموجة المستخدم، ونعلم أننا نحصل على أنماط تداخل مستقرة فقط عندما يساوي انزياح الطور لدورة كاملة متكررة عدداً صحيحاً لأمثال (راديان 2π) ويتسمية $\Delta\Phi$ انزياح الطور للدورة الكاملة يمكن أن نكتب شرط طنين التجويف كما يلي:

$$\Delta\Phi = m2\pi \quad \text{حيث } m \text{ عدد صحيح} \quad (2)$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{K} \quad \text{حيث } K = \frac{\omega}{C}, \quad \omega = 2\pi\nu \quad \text{من جهة ثانية:}$$

حيث β تمثل عامل الانتشار الطولي وتعطى بالعلاقة التالية $\beta = K_0 n_1 \sin \theta$ (K_0 هي عامل الانتشار في الفراغ الحر)

يعرف أيضاً المقدار $V = Ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ بأنه التردد المنظم أو تابع القطع ويعطى كذلك بالعلاقة

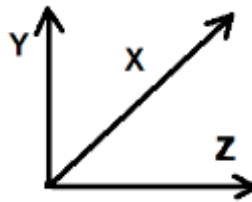
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

وعادةً ترسم مخططات الأنماط من خلال العلاقة $n_{\text{eff}} = f(V)$

2 الاستقطاب (polarization) TE و TM :

يمكن إعطاء فكرة أولية عن الاستقطاب من خلال الانعكاس عند حد فاصل مستو، هناك نوعين رئيسيين من الاستقطاب: عمودي على مستوى الورد وموازي له، بفرض أن المستوى YZ في الشكل (5) مثلاً هو مستوى الورد فإن حقلاً كهربائياً موجهاً في الاتجاه X يطابق الاستقطاب العمودي أو الاستقطاب S. وتسمى الأمواج التي بهذا الاستقطاب الحقول الكهربائية العرضية TE وذلك لأن متجهة الحقل الكهربائي تقع كلياً في المستوي XY، متعارض مع اتجاه المسير النهائي (الاتجاه Z). أما الاستقطاب الموازي أو الاستقطاب P، في هذه الحالة لا يكون الحقل الكهربائي عرضياً تماماً حيث يملك مركبة على طول الاتجاه Z. وعلى أي حال إن الحقل المغناطيسي الذي يتجه في الاتجاه X من أجل هذا الاستقطاب يكون عرضياً تماماً. ويسمى هذا الاستقطاب P بالاستقطاب المغناطيسي العرضي TM.

[2.3]



الشكل (5): يوضح آلية انتشار الاستقطابين العرضيين الكهربائي والمغناطيسي (TE, TM) بالنسبة لمنحى الانتشار.

بالإضافة لهذين النوعين من الاستقطاب توجد أنواع أخرى منها مثلاً الاستقطاب الهجين (أنماط هجينة Hybrid Modes)، حيث يكون مسار الأشعة حلزوني حول محور الليف ونحصل على مجموعة الأنماط HE و EH التي لا تتعدم فيها المركبة الطولية للحقل $H_z \neq 0$ و $E_z \neq 0$ ، فإذا كان H_z مسيطراً نحصل على m نمط هجين من النوع HE، وعندما يكون E_z مسيطراً نحصل على m نمط هجين من النوع HE.

النتائج والمناقشة:**1- ليف درجي (SI):**

سنحاول رسم أنماط ليف درجي TE و TM، سنأخذ حالة ليف ضوئي ذومعاملات: $n_1=1,48$ و $n_2=1,46$ وبالتالي يكون لدينا الزاوية الحرجة $\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 80,5^\circ$ وحدي الزوايا من أجل أشعة محصورة $80,5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ،

$$. n_{eff}=n_1 \sin \theta \quad \text{ولدينا} \quad 1,46 \leq n_{eff} \leq 1,48$$

وسوف نوضح كيفية إيجاد الأنماط في المثال الآتي:

أولاً نحسب $\tan(hd/2)$ بالعلاقة التالية:

$$\tan(hd/2) = \frac{1}{n_1 \cos \theta} \sqrt{n_1^2 (\sin \theta)^2 - n_2^2}$$

التي نستنتج منها قيمة hd وبعد إيجاد مجموعة من القيم الموضحة بالجدول التالي نوجد قيمة λ من أجل الأنماط TE وفق العلاقة التالية [11]:

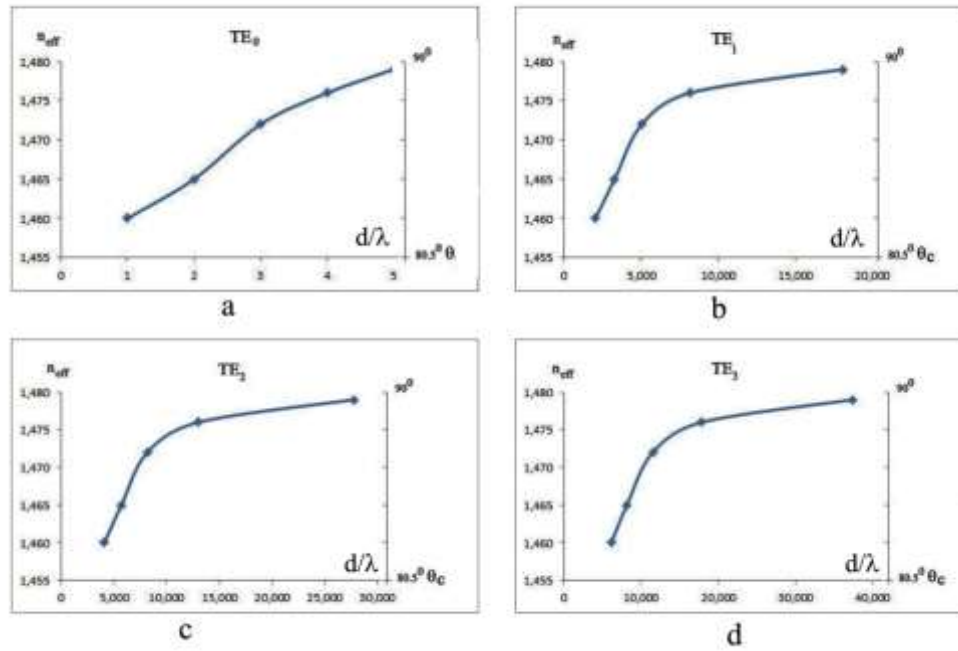
$$(d/\lambda)_0 = \frac{hd}{2\pi n_1 \cos \theta}$$

ثم نوجد الأنماط TE وفق العلاقة التالية:

$$TE_m = (d/\lambda)_0 + \frac{m}{2 n_1 \cos \theta}$$

جدول 1: يمثل الأنماط TE بتابعية (d/λ) :

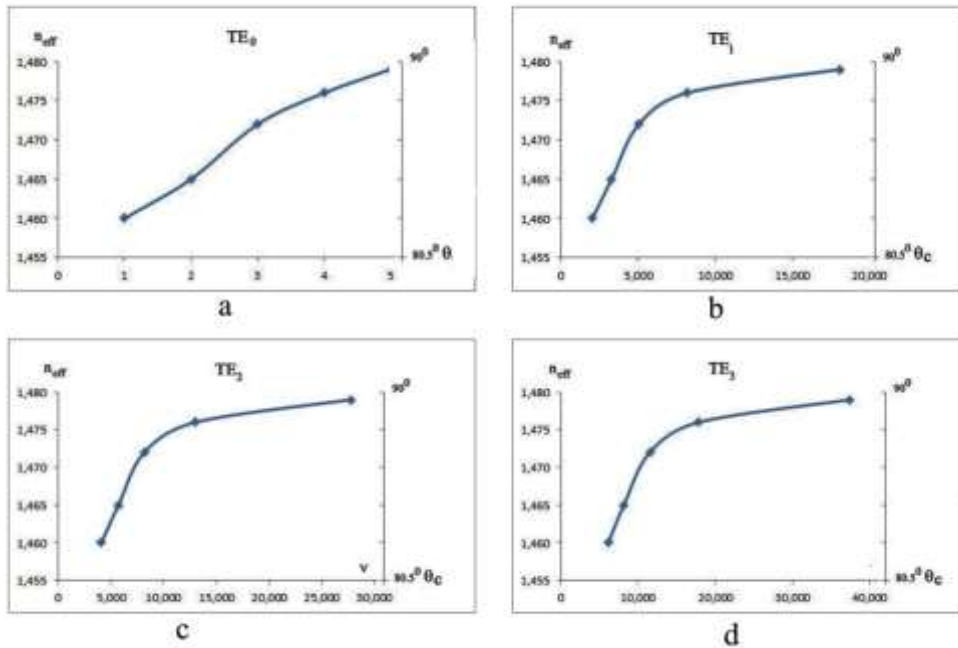
θ	n_{eff}	$TE_0(d/\lambda)_0$	$\Delta(d/\lambda)$	$TE_1(d/\lambda)_1$	$TE_2(d/\lambda)_2$	$TE_3(d/\lambda)_3$
$80,5^\circ$	1,460	0	2,047	2,047	4,094	6,141
82	1,465	0,857	2,427	3,284	5,712	8,139
84°	1,472	1,809	3,232	5,041	8,171	11,505
86°	1,476	3,328	4,843	8,171	13,014	17,857
88°	1,479	8,361	9,680	18,041	27,722	37,402
90°	1,480	α	α	α	α	α



الشكل (6): مخطط أنماط لألياف ذات دليل درجي واستقطابية عرضية كهربائية بتابعة (d/λ) ، حيث تمثل الأشكال الأربعة a, b, c, d الأنماط الكهربائية ذات المراتب $m=\{0,1,2,3\}$

جدول 2: يمثل الأنماط TE بتابعة (v):

θ	n_{eff}	$TE_0(v)_0$	$\Delta(v)$	$TE_1(v)_1$	$TE_2(v)_2$	$TE_3(v)_3$
$80,5^{\circ}$	1,460	0	3.12	3.12	6.24	9.36
82	1,465	1.31	3.69	5	8.71	10.4
84°	1,472	2.76	4.93	7.68	12.61	12.53
86°	1,476	5.07	7.38	12.45	19.83	27.21
88°	1,479	12.74	14.75	27.49	42.25	57
90°	1,480	α	α	α	α	α



الشكل (7): مخطط أنماط لألياف ذات دليل درجي واستقطابية عرضية كهربية بتابعة تابع القطع (v)، حيث تمثل الأشكال الأربعة a,b,c,d الأنماط الكهربية ذات المراتب $m=\{0,1,2,3\}$.

ومن أجل الأنماط TM نحسب $\tan(hd/2)$ وفق العلاقة التالية :

$$\tan(hd/2) = \frac{n_1}{n_2^2 \cos \theta} \sqrt{n_1^2 (\sin \theta)^2 - n_2^2}$$

ثم نوجد الأنماط TM وفق العلاقة التالية :

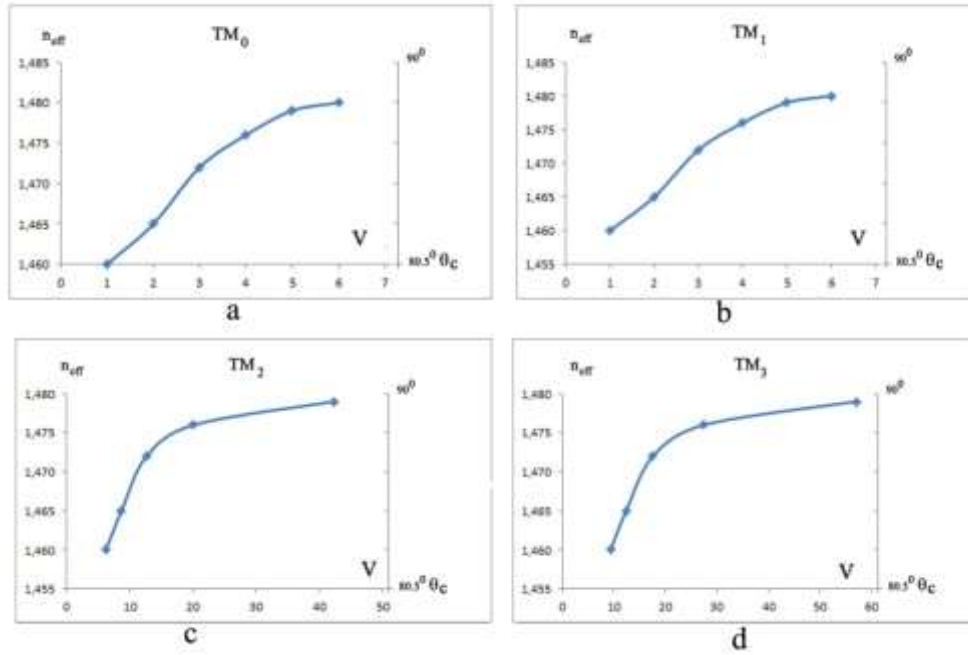
$$TM_m = (d/\lambda)_0 + \frac{m}{2 n_1 \cos \theta}$$

جدول 3: يمثل الأنماط TM بتابعة (d/λ) :

Θ	n_{eff}	$TM_0(d/\lambda)_0$	$\Delta(d/\lambda)$	$TM_1(d/\lambda)_1$	$TM_2(d/\lambda)_2$	$TM_3(d/\lambda)_3$
$80,5^0$	1,460	0	2,047	2,047	4,094	6,141
82^0	1,465	0,853	2,427	3,28	5,708	8,135
84^0	1,472	1,842	3,232	5,074	8,306	11,538
86^0	1,476	3,515	4,843	8,358	13,201	18,044
88^0	1,479	8,404	9,68	18,084	27,765	37,445
90^0	1,480	α	α	α	α	α

جدول 4: يمثل الأنماط TM بتابعة (v):

Θ	n_{eff}	$TM_0(v)_0$	$\Delta(v)$	$TM_1(v)_1$	$TM_2(v)_2$	$TM_3(v)_3$
$80,5^0$	1,460	0	3.12	3.12	6.24	9.36
82^0	1,465	1.23	3.7	5	8.7	12.40
84^0	1,472	2.81	4.93	7.73	12.66	17.58
86^0	1,476	5.36	7.38	12.74	20.12	27.5
88^0	1,479	12.81	14.75	27.56	42.31	57.1
90^0	1,480	α	α	α	α	α



الشكل (8): مخطط أنماط لألياف ذات دليل درجي واستقطابية عرضية مغناطيسية بدلالة تابع القطع (V)، حيث تمثل الأشكال الأربعة a,b,c,d الأنماط المغناطيسية ذات المراتب $m=\{0,1,2,3\}$.

2- الأنماط في الألياف ذات الدليل المتدرج (Graded-Index Fibers):

أهم ميزات الليف المتدرج قرينة الانكسار متغيرة بالتدرج حيث تكون قرينة انكسار اللب كبيرة على سبيل المثال $n_1 = 1.48$ أما قرينة انكسار الطبقات الخارجية $n_2 = 1.46$ ، أما قطر اللب يكون بحدود $14 \mu m$ [14]. يعطى دليل الانكسار الفعال للنمط الموصوف بالأعداد الصحيحة p و q كما يلي:

$$n_{eff} = \frac{\beta_{pa}}{K_0} = n_1 - (P + q + 1) \frac{\sqrt{(2\Delta)}}{K_0 a}$$

في النمط الأدنى يكون لدينا $p=q=0$. تتزايد الأعداد الصحيحة p و q بشكل منفصل لكل أسلوب جديد. إن للعوامل K_0 و β المعنى السابق نفسه وهي على التوالي عامل الانتشار الطولي و عامل الانتشار الحر. إذا أخذنا نفس المعطيات بالنسبة لليف المدروس أي $n_1=1.48$ و $n_2=1.46$ و $\lambda=0.82 \mu m$ يمكن حساب معاملات القطع للألياف المدروسة سابقاً في ليف SI وإجراء مقارنة بين هذه المعاملات في الحالتين SI و متدرج القرينة (GRIN) ثم رسم الشكل العام لهذه الأنماط ومقارنتها بالأنماط في ليف SI حيث يحدث قطع أي نمط عندما يساوي دليل انكساره الفعال n_2 وفق العلاقة التالية: $n_2 \leq n_{eff} \leq n_1$ سنأخذ بعض الأنماط المدروسة في الحالة الأولى ونحسب معاملات القطع لهذه الأنماط انطلاقاً من العلاقة السابقة.....

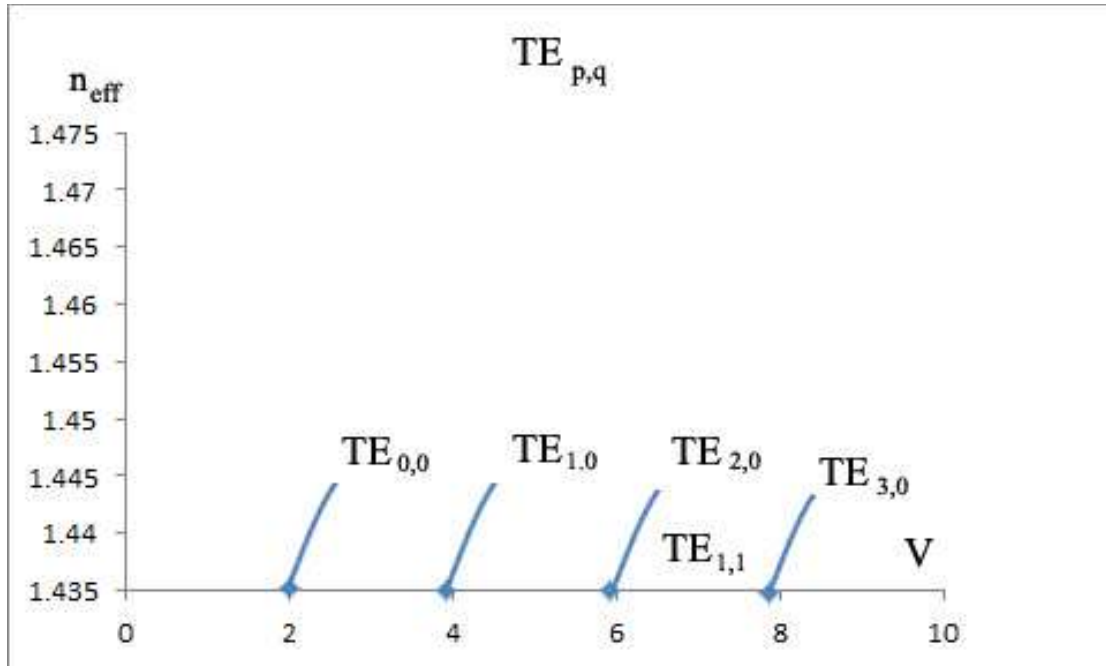
حيث قمنا بإجراء الحسابات المطلوبة لهذه الأنماط ودونا النتائج في الجدول التالي من أجل قيم مختلفة ل p و q. [12]

بالإضافة إلى أهميته في رسم مخطط الأنماط للليف ضوئي متدرج القرينة فإنه يحدد بشكل تقريبي - عدد الأنماط التي يمكن أن تنتشر في الليف وفق العلاقة التالية: $N = \frac{V^2}{4}$ وذلك عندما تكون $V > 10$ هذا من جهة ومن جهة أخرى

$$\text{فإن } V \text{ يرتبط مع } \frac{a}{\lambda} \text{ بالعلاقة التالية: } V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

جدول 5: جدول يمثل الأنماط TE بالنسبة للليف متدرج بتابعية (V):

(P,q)	TE _{p,q}	n _{eff}	a/λ	V
(0,0)	TE _{0,0}	1.47	1.305	1.99
(1,0)	TE _{1,0}	1.459	2.615	3.98
(2,0)	TE _{2,0}	1.449	3.922	5.92
(3,0)	TE _{3,0}	1.439	5.228	7.96
(1,1)	TE _{1,1}	1.449	3.922	5.92



الشكل (9): مخطط أنماط لألياف ذات دليل متدرج من حيث تابع القطع، حيث تمثل القرائن المرافقة (0,0 و 1,0...) الأعداد الصحيحة p و q للأنماط المختلفة المنتشرة ضمن الليف البصري.

الاستنتاجات والتوصيات:

- فيما يخص الليف الدرجي قمنا باستنباط النموذج الرياضي المستخدم لحساب القيم العددية لتحولات الأنماط في الليف البصري ودوننا نتائج هذه الحسابات في جداول مناسبة من جدول (1) حتى الجدول (5).

- رسمنا هذه الأنماط بدراسة تحولات n_{eff} بتابعية (d/λ) ومن ثم بتابعية تابع القطع V ، وذلك من أجل عدة مراتب تبدأ من المرتبة صفر حيث أخذنا عدة أنماط ذات استقطابية عرضية كهربائية كما هو الحال في الشكلين (6) و(7) وأخرى ذات استقطابية مغناطيسية كما هو الحال في الشكل (8).
- أما فيما يتعلق بالليف المتدرج قمنا بحساب تابع القطع لعدة أنماط بمراتب مختلفة كما هو موضح في الجدول (5) والشكل (9).
- لاحظنا أن هذه الأنماط تأخذ شكل عام واحد تقريباً بالنسبة للييف الدرجي ولكن تابع القطع يزداد مع ازدياد المرتبة في كلتا حالتَي الاستقطابية الكهربائية والمغناطيسية العرضية.
- كما لاحظنا من خلال المقارنة بين اللييف الدرجي والمتدرج أن قيمة تابع القطع في اللييف المتدرج كانت أصغر مما هي عليه في اللييف الدرجي.
- لاحظنا أيضاً ندرة في المنشورات المتعلقة بهذا الموضوع وخاصة بالنسبة للييف المتدرج وقد يكون السبب عائد إلى السرية التي تحاول الشركات المصنعة إحاطتها بها بهدف المنافسة الاقتصادية فيما بينها.

التوصيات:

- 1- نوصي بالتعمق أكثر في الدراسة من خلال برمجة هذا النموذج الرياضي ورسم الأنماط من أجل معاملات التدرج.
- 2- يمكن التوسع في الدراسة بشكل أكبر من خلال التطرق لدراسة انتشار الأمواج الضوئية الليزرية في هذه الألياف وحل معادلة الانتشار في الأبعاد الثلاثة للفراغ مع رسم الأشكال البيانية للأنماط في حالة ألياف أحادية النمط ومتعددة الأنماط.

المراجع:

1. Senior, John, *optical fibre communications : Principals and Practice*, 3rded. England : Pearson Education Limited,2009,1128 .
2. Kliger, David; Lewis, James; and randall, Cora. *Polarized Light in Optics and Spectroscopy*. USA : Academic press,Inc,1990.
3. Saurabh; and Kumar. *Power Communication Using Optical-Fiber* IPASJ, International Journal of Electrical Engineering, V (2015) 3 (12) ,11-15.
4. Dubey, P. K; and shukla. *Dispersion in optical Fiber Communication*, International Journal of science and Research (IJSR), V(2014), 3(10), 236-239.
5. Agrawal, Govind. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rded. New York, John Wiley & Sons, Inc, (2002).
6. Rodc. AlfeRness , *Guided_wave Devices For optical Communication* ,IEEE, Quantum Election 17,no.6(june 1981), 946_959.

7. W.S.C chang, M.W. Muller, and F.J.Rusenbaum , Integlated optics ,In Laser Applications, edited by Montc Ross, New York: ACADEMIC PRESS, Inc,269_289.
8. Johnson, Malcolom, *Optical Fiber, Cables and systems*, Switzerland: ItU, 2010.
9. Laferriere, J; Lietaert, G;Taws, R,; and Wolszczak, S. *Referance Guide to Fiber Optic Testing*, vol 1,USA: JDSU,2007.
10. Nechibvuate, Action; and Mudzingwa, *Cousage. Modelling of optical Waveguide using COMSOL multiphysics*. International Journal of Engineering Reasearch & Technology. 2013, 2(5), 1663_1667.
11. Dutta, Arpan. *Mode Analysis of Different Step Index optical Fibers at 1064 nm, for High Power Fiber Laser and Amplifier*, International Journal of Electronics and Comunication Technology. 6 (3), 74-77.
12. Gloge,*Multi-mode Theory of Gradeel-core *Filers*,PP,1565_1569
13. Thyagarajan, K; and Ghatak, Ajoy. (2007). *Fiber Optic Essentials*. New Jersy: john Wiley & Sons, Inc.
14. Hand Book, *Fiber optic communication*, by Joseph C.palais, 5th edition, ترجمة جورج صنيح,573.