الألياف الضوئية

The optical fibers

إعداد الطالبة: رهام سلمان
بإشراف المدرّس :غسان حايك

الصف الثالث الثانوي
للعام الدراسي ٢٠١٥ -٢٠١٦م

الفهرس:

فهرس الأشكال ٣

جدول المصطلحات..... ٤

أهداف البحث..... ٥

المقدمة..... ٥

نظرة تاريخية..... ٦

الفصل الأول :تعريف الضوء..... ٧

مبادئ الضوء الهندسي..... ٩

انعكاس الضوء..... ٩

نظرية الشعاع الهندسي..... ١٠

القوانين التي تعتمد عليها الألياف الضوئية..... ١١

الفصل الثاني:مكونات الألياف الضوئية..... ١٤

آلية عمل الألياف الضوئية..... ١٥

ظاهرة امتصاص الضوء..... ١٧

التشتيت..... ١٨

الفصل الثالث:أنواع الألياف لضوئية..... ١٩

الفصل الرابع:كيفية صنع الألياف الضوئية..... ٢٥

الفصل الخامس: ميزات و مساوئ الألياف الضوئية..... ٢٦

استخدام الألياف الضوئية في الاتصالات..... ٢٧

تطبيقات الألياف الضوئية..... ٢٨

الخاتمة..... ٢٩

المصادر والمراجع ٣٠

فهرس الأشكال:

الشكل	رقم الصفحة	التوضيح
الشكل-١-	٨	**يمثل موجة كهرومغناطيسية**
الشكل-٢-	٩	**يمثل حزمة منعكسة من الضوء**
الشكل-٣-	١٠	**يمثل ظاهرة انتشار الضوء**
الشكل-٤-	١١	**يوضح قانون سنل**
الشكل-٥-	١١	**يوضح قانون سنل**
الشكل-٦-	١٢	**يوضح مفهوم الزاوية الحرجة**
الشكل-٧-	١٣	يمثل مقطع لليف البصري مع الطبقات المكونة له.
الشكل-٨-	١٤	**يوضح عملية انتشار الضوء في الليف الضوئي**
الشكل-٩-	١٤	**أقسام الليف الضوئي**
الشكل-١٠-	١٥	**يوضح زاوية القبول**
الشكل-١١-	١٨	**تمثيل لتأثير التشتيت**
الشكل-١٢-	١٩	**يوضح التوسع في عرض النبضة أثناء انتشارها**
الشكل-١٣-	٢٠	**يوضح تغير معامل الانكسار في الليف العتبويّ**
الشكل-١٤-	٢١	**يوضح اختلاف في أطوال المسارات للحزم الضوئية**
الشكل-١٥-	٢٣	**يوضح رسم لدالة التي تمثل تغير معامل الانكسار**
الشكل-١٦-	٢٣	**يوضح تمثيل أحادي النمط**
الشكل-١٧-	٢٣	**يوضح انتقال الضوء في كل من أنواع الألياف الثلاثة**
الشكل-١٨-	٢٤	**يوضح الفرق بين أنواع الألياف**
الشكل-١٩-	٢٤	**يوضح الفرق بين أنواع الألياف**

فهرس المصطلحات:

العربية	الأجنبية
زاوية القبول	Acceptance angle
مخروط القبول	Acceptance Cone
الامتصاص	Absorption
الغطاء الواقي	buffer coating
القلب أو اللب	Core
المحيط أو	Cladding
تشتيت اللون	Chromatic Dispersion
الزاوية الحرجة	Critical Angle
تشويه	Distortion
الشعاع الساقط	Incident Beam
زاوية الورود	Incident Angle
الألياف متعدّدة النمط	Multi-Mode Fiber
ألياف متعدّدة النمط و بمعامل انكسار متدرّج	Multimode graded Index Fibers
ألياف متعدّدة النمط و بمعامل انكسار عتبي	Multimode Step Index Fibers
مسافة الإرسال القصوى	Maximum Transmission Distance
سرعة الإرسال القصوى	Maximum Bit Rate
تشتيت المادة	Material Dispersion
الشعاع المنعكس	Reflected Beam
الشعاع المنكسر	Refracted Beam
زاوية الانكسار	Refracted Angle
زاوية الانعكاس	Reflected Angle
ألياف أحاديّة النمط	Single Mode Fibers
الانعكاس الكلي الداخلي	Total Internet Reflection

أهداف البحث:

التعرف على:

١- الألياف الضوئية و آلية عملها.

٢- أنواع الألياف الضوئية.

٣- كيفية صنع الألياف الضوئية.

٣- فوائد و استخدامات الألياف الضوئية في حياتنا.

٤- الإيجابيات والسلبيات أثناء استخدام الليف الضوئي.

المقدمة:

في زمن القرن الحادي والعشرين قرن الإبداعات العلمية والاكتشافات الغريبة ، يتسابق الناس مع الزمن للوصول إلى اختراعات بإمكانها تغيير مجرى الأحداث في العالم ، ومن أهم الصناعات التي كان لها الأثر الكبير في ظهور التكنولوجيا المتطورة هي صناعة الألياف الضوئية . فمنذ أكثر من ٢٥ عام بدأ استخدام و تطبيق هذه الألياف كخطوط اتصال ، ممّا مهّد لحدوث ثورة في عالم الاتصالات من حيث الكم الهائل للمعلومات التي أصبح بالإمكان نقلها مسافات طويلة أو قصيرة و بنوعية عالية الجودة ، إضافة إلى أهميتها الكبيرة في تسهيل حياة الإنسان و تطويرها ضمن مجالات مختلفة.

- **نظرة تاريخية :**

استخدم الضوء في مجال الاتصالات منذ فترة طويلة جدّاً ، واستخدمت الإشارات والمرايا العاكسة و المصابيح لنقل المعلومات ، لكن مقدار المعلومات المنقولة كان محدود علاوة على الظروف البيئيّة كما يمكن للآخرين الاطّلاع عليها . أوّل محاولة فعلية مدوّنة لاستخدام الإشارات كانت عام ١٧٩١ من قبل كلود شابي في فرنسا ، حيث استخدم مجموعة من الأبراج تحتوي على عدّة أذرع لنقل المعلومات مسافة ٢٠٠ كم و كان إرسال المعلومة الواحدة يستغرق حوالي ١٥ دقيقة تقريباً . في عام ١٨٥٤ م أجرى جون تايندل تجربة بسيطة بيّن أن الضوء يمكن ثنيه إذا وجد الوسط الملائم ، و في عام ١٨٨٠ م قام الكسندر جراهام بل بنقل الصوت عبر حزمة ضوئية و قد أجريت محاولات عديدة لاستخدام الاتصالات البصريّة في تلك الفترة و لكنّها لم تلق النجاح لعدم توفر المنابع المناسبة إضافة إلى الاضطرابات الجويّة (كالمطر و الثلج و الغبار و الضباب) ممّا حد من إمكانية استخدامها . أدّى اكتشاف الليزر عام ١٩٦٠ م من قبل ثيودور ميمان إلى تجدّد الاهتمام بالاتصالات البصريّة و في عام ١٩٦٦ م اقترح كل من تشاوس كاو و جورج هوكام تصنيع ألياف زجاجية قليلة الفقد و في عام ١٩٧٠ م تمّ تصنيع ألياف بصرية مصنّعة من مادة السليكا[١] و بفقد ٢٠ ديسيبل لكل كيلومتر بدلاً من ١٠٠٠ ديسيبل لكل كيلومتر قبل ذلك الوقت . و في غضون عشر سنوات ، تمّ تصنيع ألياف بفقد يصل إلى ٢٠ ديسيبل لكل كيلومتر عند الطول الموجي ١٥٥٠ نانومتر .

(١)السيليكا (silica) : ثنائي أكسيد السيليكون المعروف بقساوته ، توجد السيليكا في الطبيعة في الرمل و الكوارتز و في جدران خلايا الدياتوم ، و هي مكوّن أساسي في معظم أنواع الزجاج و المواد مثل الخرسانة ، و تعتبر السيليكا من أكثر المعادن وفرة على الأرض.

الفصل الأول: الإطار النظري و القوانين التي يتم الاعتماد عليها في الألياف البصرية:

١. تعريف الضوء[٢]:

بعد سلسلة من الاختبارات التي أجراها العالم ابن الهيثم، تبيّن أنّ الشعاع الضوئي ينتشر في خط مستقيم ضمن وسط متجانس كما تم اكتشاف ظاهرة انعكاس الضوء و انكساره.

وبعد ذلك وعلى مدى عدّة قرون كان هناك تنافس بين نموذجين للضوء ، الأول وهو النموذج الجسيمي للضوء الذي وضعه نيوتن ، و الثاني هو النموذج الموجي للضوء الذي وضعه الهولندي كريستيان هايغنز في البداية و أيّده مجموعة من العلماء.

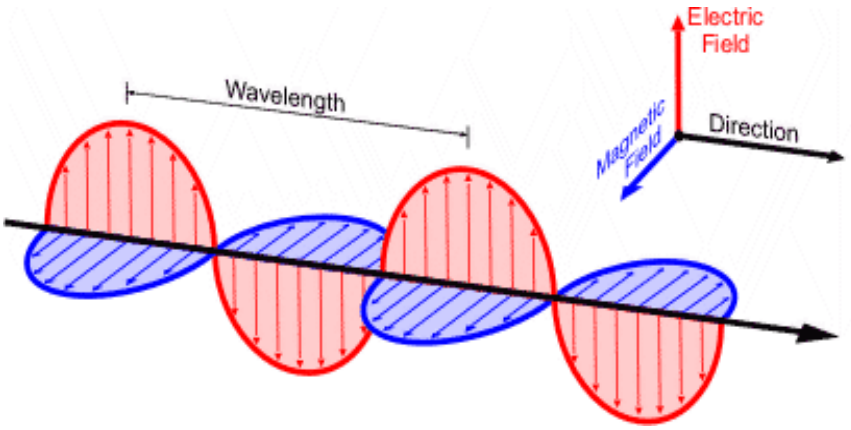
فحسب نيوتن [٢]: يتكون الضوء من جسيمات لها كتل مختلفة و تأثر على العين بإحساسات مختلفة (الألوان) ، و الانتشار المستقيم للضوء والانعكاس يستنتجان منطقياً من هذا المفهوم ، أمّا الانكسار تفسيره معقد يأخذ بعين الاعتبار كتل الجسيمات و الجذب الذي يطبق من طرف جسم شفاف على الجسيمات التي تخترقه .

أمّا بالنسبة للنموذج الثاني : اتّجهت مجموعة أخرى من العلماء نحو النظرية الموجية و كانوا معارضين لفكرة نيوتن التي تزعم أن للضوء طبيعة جسمية ، و أول هؤلاء العلماء هايغنز الذي كان يتصور الضوء عبارة عن اهتزازات ، وكان هذا التصور يسمح بتفسير ظاهرة انعراج الضوء .وقد دعم كل من يونغ و فرينل فكرة هايغنز .

اكتشف يونغ ظاهرة التداخل الضوئي (تجربة شقي يونغ) و قياس أطوال الأمواج للضوء أمّا فرينل فقد اكتشف الأمواج العرضية و فسّر بطريقة مقنعة كل ظواهر الاستقطاب ، كما قام فيزو بعد ذلك بقياس سرعة الضوء($3 * 10^{8}\ m.s^{-1}$) و دعمه فوكو و تبيّن من خلال أعمالهما أنّ سرعة الضوء في الماء أقل من سرعته في الهواء .

كل هذه الأعمال جاءت لتدعم النظرية الموجية للضوء كما دعم ماكسويل هذه النظرية باكتشافه أن الضوء موجة كهرومغناطيسية تتألف من حقلين الأول كهربائي و الثاني مغناطيسي يترددان بحيث أن كل منهما معامد للأخر و معامد لاتجاه تقدم الموجة و استطاع ماكسويل أن يبرهن أن سرعة تقدم هذه الأمواج هي نفس سرعة الضوء ، أي أن الضوء ما هو إلّا عبارة عن أمواج كهرومغناطيسية . إن النموذج الموجي للضوء و المتمثّل بمعادلات ماكسويل لأمواج الضوء استطاع تفسير كافة الظواهر المعروفة حينها و المتعلّقة بالضوء .

(٢)طبيعة الضوء–محاضرة من معهد للتعليم والتكوين عن بعد



الشكل –١– يمثل موجة كهرومغناطيسية

فيما بعد اكتشف العالم هرتز الأثر الكهرضوئي[3] ثم اقترح العالم أينشتاين تفسير هذه الظاهرة ، حيث قال : باعتبار الضوء الوارد يتكون من حبيبات تدعى "فوتونات " يمكن الوصول إلى تفسير إصدار الالكترونات من المعدن بالطريقة الآتية : تدخل الفوتونات في السطح الخارجي من المعدن و تتحول طاقتها بالأقل إلى طاقة حركية للإلكترونات ، والحالة الأبسط هي عندما يتخلّى الفوتون عن كل طاقته لإلكترون واحد .

الأثر الكهرضوئي : ظاهرة تلاحظ تجريبيا : نضيء سطح معدن معين بإشعاع ضوئي فنلاحظ إصدار الكترونات من طرف هذا المعدن.

إذاً نلاحظ أن هناك ثلاث مداخل واعتبارات لتوضيح و فهم آلية عمل الضوء :

١. اعتبار أن الضوء كخط أو شعاع و ذلك باستخدام علم البصريات .

٢. اعتبار أن الضوء موجة كهرومغناطيسية و ذلك باستخدام نظريّة الأمواج .

٣. اعتبار أنّ الضوء كحزمة من الفوتونات باستخدام نظريّة الكم .

و حتّى نفهم مبدأ و آليّة عمل الليف الضوئي سوف نقوم بدراسة الضوء كشعاع يتحرّك باتجاه و زاوية معيّنة و بذلك سينطبق عليه القوانين الأساسيّة في علم البصريات الضوئيّة (سنل ، الانكسار ....) .

(٣) طبيعة الضوء–محاضرة من معهد للتعليم والتكوين عن بعد

٢. مبادئ الضوء الهندسي[٤] :

- المبدأ الأول (مبدأ الانتشار المستقيم للضوء) : ينتشر الضوء في خط مستقيم في وسط شفّاف و متجانس .
- المبدأ الثاني : لا يمكن الحصول عملياً على شعاع ضوئي واحد ، ممّا يعني أنّ الضوء الهندسي هو نموذج نظري فقط ليساعد على فهم الظواهر الضوئية و تفسيرها .

فالضوء ينتشر بشكل مجموعات تسمّى الحزم الضوئية و لها ثلاثة أنواع :

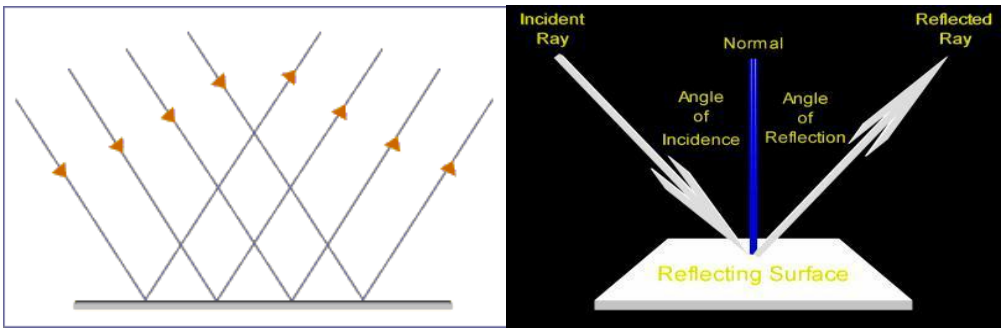
١- المتوازية : هي الأشعّة التي لا تتسع و لا تضيق عند ابتعادها عن مصدر انبعاثها و هي عبارة عن أشعّة ضوئية متوازية (كالأشعة المنبعثة عن جهاز الليزر) .

٢- المتقاربة : هي الأشعة التي تضيق عند ابتعادها عن مصدر انبعاثها (كالحزمة الضوئية التي تنطلق من عدسة محدّبة موجهة نحو الشّمس و التي يمكن أن تحرق ورقة) .

٣- المتباعدة : هي الأشعة التي تتّسع كلّما ابتعدت عن مصدر انبعاثها (كالحزم الضوئية التي تنطلق من أضواء السيارات في اللّيل) .

٤. انعكاس الضوء[٥] :

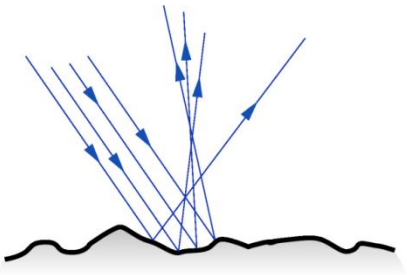
- **الانعكاس المنتظم** : عندما تسقط حزمة أشعة ضوئية متوازية على سطح أملس (مصقول) فإن زوايا السقوط للأشعة تكون متساوية و تنعكس حزمة الأشعة الضوئية بزوايا انعكاس متساوية فتبقى متوازية بعد انعكاسها و مساوية لزوايا السقوط كما هو موضح في الشكل -٢-.



الشكل -٢- يمثل حزمة منعكسة من الضوء

(٤) و(٥)الضوء الهندسي ،د. رزق محمد فرفول وسلمان عبود دلا، جامعة تشرين ،كلية العلوم ص١١٤

الانعكاس غير المنتظم (انتشار الضوء) : عندما تسقط حزمة أشعّة ضوئية متوازية على سطح خشن فإنّ زوايا السقوط للأشعّة تكون غير متساوية و بالتالي تنعكس بزوايا انعكاس مختلفة و هكذا تتشتّت الأشعة الضوئية في اتجاهات مختلفة .



الشكل –٣–يمثل ظاهرة انتشار الضوء

٤. قانونا الانعكاس [٦]:

١.عندما نسقط على المرآة المستوية حزمة ضيّقة تكون زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس.

٢.الشعاع الوارد والشعاع المنعكس والناظم على السطح العاكس جميعها تقع في مستو واحد عمودي على السطح العاكس .

٥. نظرية الشعاع الضوئي Ray Theory Transmission :

كما هو معلوم، فإن الضوء ينتشر كشعاع باتجاه و سرعة معينة تعتمد قيمتها على نوع الوسط الذي يتم فيه الانتشار، بمعنى آخر فإن كل وسط يعيق انتشار الضوء خلاله بنسب متفاوتة مما يعني أن سرعة انتشار الضوء عبر أي وسط أقل منها في الفراغ. إن هذه الخاصية للمواد والوسائط المختلفة تسمى معامل الانكسار للمادة أو الوسط المعني و يرمز له (n). يمكننا حساب معامل الانكسار لمادة معينة باستخدام العلاقة البسيطة التالية:

$$n = c_0/c_n$$

حيث أن c_n ترمز إلى سرعة انتشار الضوء عبر المادة المعينة، و c_0 ترمز إلى سرعة انتشار الضوء في الفراغ ($c_0 = 3 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$)

.

المادة	معامل الانكسار
هواء	1
ماء	1.33
زجاج	1.5
سيليكون	3.5
جرمانيوم	4
كحول	1.36
بوليسترين	1.59

يقدم الجدول (١) أمثلة لمعامل الانكسار لبعض المواد

(6)انعكاس الضوء–محاضرة من معهد التعليم والتكوين عن بعد

- القوانين التي يتم الاعتماد عليها في الألياف البصرية:

i. قانون سنل:

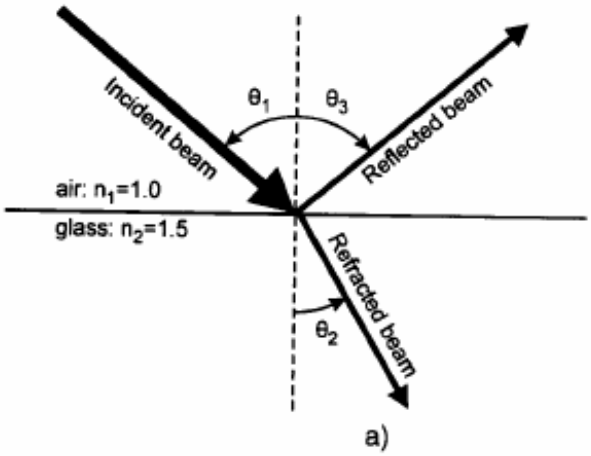
يعتبر من القوانين الأساسيّة في علم البصريّات و هو يعطي العلاقة بين الشعاع الوارد و الشعاع المنكسر و الزوايا المرافقة لذلك ، و يمكن كتابته على النحو التالي :[٧]

حيثما يكون $(n_1 > n_2)$ فإن$(\theta_1 < \theta_2)$.

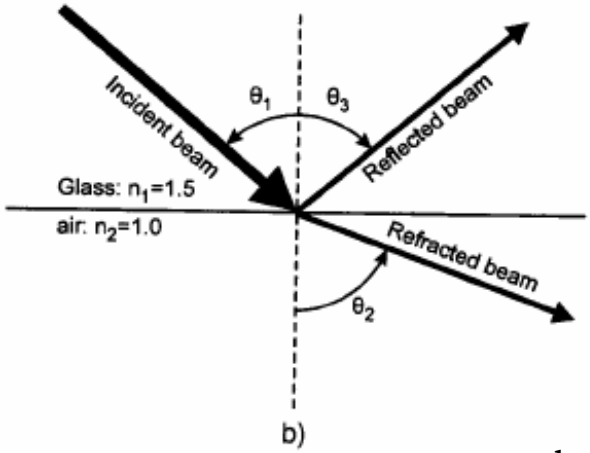
$$n_1 . sin\,\theta_1 = n_2 . sin\,\theta_2 \Rightarrow \frac{sin\,\theta_1}{sin\,\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

حيث n_1 معامل انكسار المادة الأولى (الزجاج) و n_2 معامل انكسار المادة الثانية (الهواء) .

و يوضح الشكل –٥– فكرة قانون سنل:



(a) الضوء الساقط من الهواء إلى الزجاج



(b)الضوء الساقط من الزجاج إلى الهواء

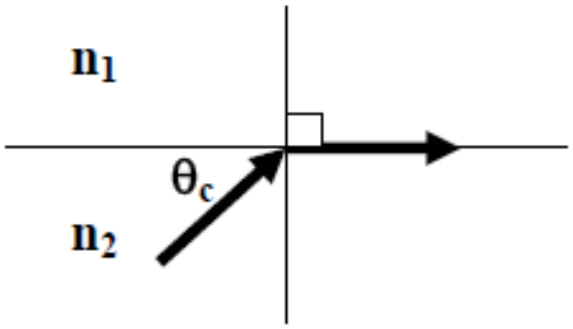
الشكلان–٤–و–٥– يوضحان قانون سنل

(7)الضوء الهندسي ،د. رزق محمد فرفول وسلمان عبود دلا، جامعة تشرين ،كلية العلوم ص١١١

ii. الزاوية الحرجة [٨] Critical Angle :

يتحدد مفهوم الزاوية الحرجة على الشكل التالي:

هي عبارة عن الحالة الخاصة لقيمة زاوية ورود الشعاع عندما تكون زاوية الانكسار له تساوي ٩٠° (انظر الشكل ٦)، في هذه الحالة ينتشر الشعاع المنكسر بشكل أفقي موازيا للحد الفاصل بين الوسطين الأول والثاني.



الشكل -٦-

بالرجوع إلى قانون سنل ، يمكننا الحصول على العلاقة التالية لحساب الزاوية الحرجة (θ_c):

$$n_1 . \sin\theta_1 = n_2 . \sin\theta_2$$
$$n_1 . \sin\theta_c = n_2 . \sin 90^\circ$$
$$n_1 . \sin\theta_c = n_2$$
$$\sin\theta_c = n_2/n_1$$
$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

لأن جيب أي زاوية لا يمكن أن يكون أكبر من ١ فإن (n_2/n_1) دائما أصغر أو تساوي ١ وبالتالي فإن n_2 يجب أن تكون أصغر من n_1 .

(٨)المرجع السابق نفسه ،ص ١٢١

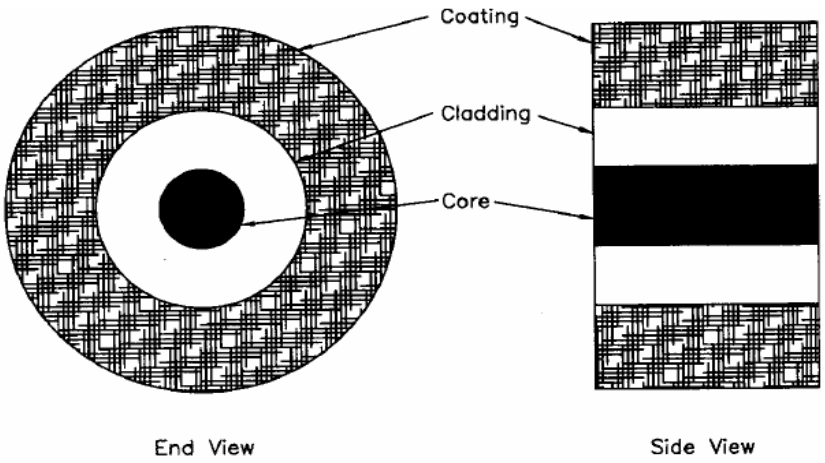
iii. الانعكاس الكلي الداخلي Total Internet Reflection:

كما اتضح لنا من قانون سنل، فإنه كلما تغيرت زاوية الورود كلما رافقها تغير في زاوية الانكسار. وفي حالة كون زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة ($\theta_1 > \theta_c$) فإن الضوء ينعكس بالكامل (لا يحدث انكسار)، حيث تسمى هذه الظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي. يجب التأكيد هنا على الشرط التالي:

يجب أن ينتقل الضوء من الوسط ذي معامل الانكسار الأعلى (n_1) إلى الوسط ذي معامل الانكسار الأقل (n_2) حتى نحصل على الانعكاس الكلي الداخلي.

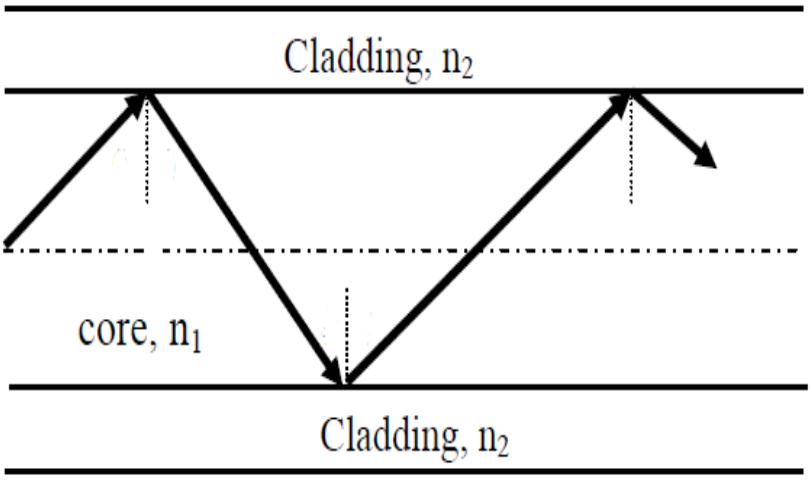
يعتمد انتشار الضوء عبر الألياف البصرية على مبدأ الانعكاس الكلي الداخلي، حيث يمكننا اعتبار الليف البصري كأنبوب زجاجي بقطر حوالي($125\mu m$) مكون من طبقتين: الطبقة الداخلية و تسمى اللب (Core) ولها معامل انكسار n_1 وطبقة محيطة تسمى المحيط (Cladding) ولها معامل انكسار n_2وحتى نعطي الليف المتانة و درجة التحمل اللازمة نقوم بإضافة طبقة غلاف أولي (Coating) بلاستيكية لتغطية محيط الليف.

إذا سقط الضوء بزاوية أقل من الزاوية الحرجة θ_c فإن جزءاً من الضوء ينعكس داخل لب الليف(انعكاس جزئي داخلي) وجزء آخر سوف ينكسر عبر محيط الليف مما يؤدي إلى خروجه من الليف وبالتالي يؤدي إلى زيادة الفقد.



الشكل –٧– يمثل المقطع العرضي والجانبي لليف البصري مع تبيان الطبقات الرئيسية المكونة له.

ولتوضيح عملية انتشار الضوء في الليف الضوئي يمثل الشكل رقم (٨) انتقال الشعاع الضوئي بزاوية ورود حيث يكون الانتشار خلال لب الليف بالكامل و ذلك طبقا لمبدأ الانعكاس الكلي الداخلي.

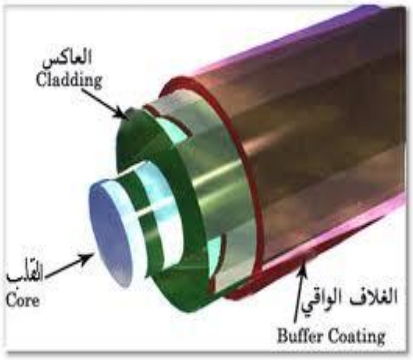


الشكل –٨–

فكما نلاحظ أنه لا يوجد أي فقد وذلك لأن الشعاع الوارد انعكس كليا دون أي انكسار إلى خارج اللب.

الفصل الثاني: مكونات الألياف الضوئية وآلية عملها:

١) مكونات الليف الضوئي:



الشكل –٩–يمثل أقسام الليف الضوئي

تتركب الألياف الضوئية من جدائل طويلة و رقيقة من زجاج عالي الشفافيّة بقطر الشعرة و هي مرتّبة على هيئة حزم تسمّى الكوابل الضوئية و تستخدم لإرسال إشارات ضوئية عبر مسافات شاسعة ، يتكون كل كابل منها أي الليف الضوئي من ثلاثة أجزاء رئيسية و هي :

١– القلب أو اللب (core): و هو عبارة عن زجاج رفيع ينتقل فيه الضوء .

٢– العاكس أو الكسوة (cladding): مادة تحيط باللب الزجاجي و تعمل على عكس الضوء مرة أخرى إلى مركز الليف الضوئي .

٣– الغطاء الواقي (buffer coating): غلاف بلاستيكي يحمي الليف الضوئي من الرطوبة أو الضرر و الكسر .

يتم ترتيب آلاف من هذه الألياف على شكل كوابل مجدولة محمية بالطبقة الواقية التي تسمى " المعطف" .

٢) كيف تنقل الألياف البصرية الضوء ؟

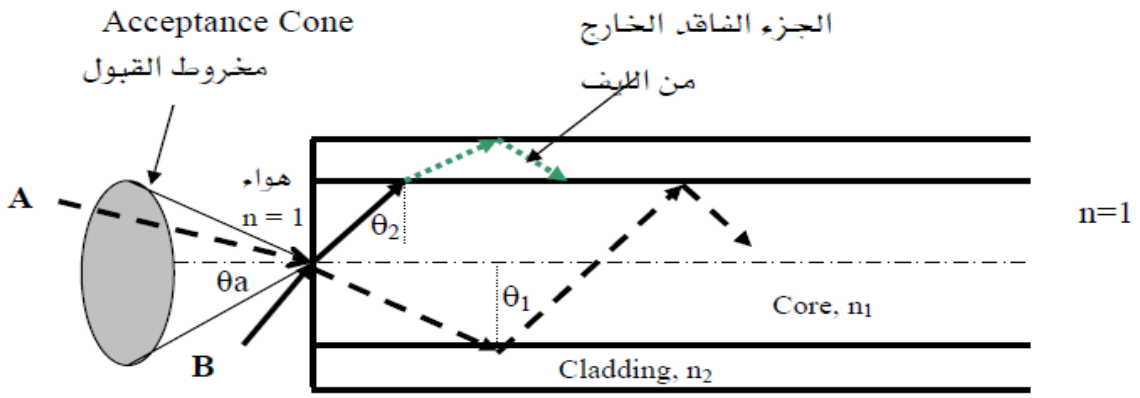
لنفترض أنّنا نريد أن نرسل حزم من الأشعة الضوئية عبر مسار ما ، يمكننا ذلك بأن نوجّه الضوء عبر هذا المسار بما أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة ، لكن إذا كان المسار يحتوي على نقطة انعطاف نقوم بوضع مرآة عند هذه النقطة لكي تعكس الضوء عند هذه الزاوية و تعيده إلى المسار ، و إذا احتوى المسار على العديد من نقاط الانعطاف نقوم بوضع مرآة عند كل انعطاف ، و توضع المرآة بزاوية معيّنة لكي تسمح بإعادة الضوء إلى القلب عند كل زاوية على طول المسار .

هذا بالضبط ما يحدث داخل الألياف الضوئية ، فالضوء يسافر خلال اللب (المسار) مع قفزات منتظمة من الغلاف (المرآة) عند نقاط الانعطاف ، و هذا الانعكاس يمكن تفسيره وفق نظرية الإشعاع و قانون سنل عند زاوية سقوط معيّنة هي الزاوية الحرجة حيث يحدث الانعكاس الكلّي الداخلي ، يمكن للإشارات الضوئية أن تنتقل مسافات بعيدة لأن الغلاف لا يمتص أيّاً منها ، لكن بعض هذه الإشارات تضعف داخل الألياف بسبب عدم نقاوة الزجاج و تلوّثه مثلاً و المدى الذي يمكن أن تضعف فيه الإشارات يعتمد على درجة نقاوة الزجاج الذي تصنع منه الألياف و يعتمد أيضاً على الطول الموجي المرسل خلاله (مثلاً 850 نانومتر يضعف بمقدار يتراوح بين 60% إلى 75% لكل كيلومتر) و بعض الألياف تضعف فيها الإشارة بمقدار أقل (10% لكل كيلومتر عند الطول الموجي 1550نانومتر) .

وهناك قيم عدديّة يجب معرفتها عن الليف البصري لتوضيح عملية انتشار الضوء خلاله و هي :

- **زاوية القبول Acceptance angle:**

تعبر زاوية القبول(θ_a) من القيم العددية التي يتوجب معرفتها عن الليف البصري كما في الشكل(١٠).



الشكل –١٠–

كما يتضح من الشكل السابق فإن الشعاع A يدخل إلى الليف بزاوية أقل من الزاوية θ_a ويصل إلى الحد الفاصل بين اللب و المحيط بزاوية θ_1 تكون أكبر من الزاوية الحرجة θ_c وبذلك يتابع مساره عبر الليف بشكل صحيح (يحقق الانعكاس الكلي الداخلي) ويكون الفقد في هذه الحالة أقل ما يمكن. يدخل الشعاع B إلى الليف البصري بزاوية أكبر من زاوية القبول θ_a حيث يصل إلى الحد الفاصل بين اللب و المحيط بزاوية أقل من θ_a و بذلك فإن جزءاً منه ينكسر باتجاه المحيط و يخرج خارج الليف مما يتسبب في فقد جزء من الضوء المنتشر و بذلك لا يمكن له أن يحقق الانعكاس الكلي الداخلي. من هنا يتضح معنى ومفهوم زاوية القبول بأنها الزاوية التي يجب على الشعاع الداخل أن يدخل بزاوية تساويها وأقل منها حتى يحقق الانعكاس الكلي الداخلي و بالتالي ينتشر عبر الليف بشكل صحيح وبأقل فقد ممكن، وفي نفس الوقت، فإن الشعاع الداخل لليف بزاوية أكبر من زاوية القبول فإن الانعكاس سيكون جزئياً.

لذلك حتى يتم إرسال الضوء لأطول مسافة ممكنة يجب مراعاة إدخال الضوء لليف بزاوية لا تتجاوز قيمة θ_a فراغياً وحسب قيمةθ_a فإنه يتشكل ما يشبه المخروط عند مقاومة الليف و الذي يسمى مخروط القبول (Acceptance Cone).

- **فتحة النفوذ العددية:**

هنالك قيمة عددية أكثر شمولا من زاوية القبول θ_a والتي تمثل أو تعبر عن العلاقة ما بين إمكانية إدخال الضوء لليف بشكل صحيح و معامل الانكسار لكل من لب الليف n_1 ومحيطه n_2 . تسمى هذه القيمة أو العلاقة فتحة النفوذ العددية (NA) والتي يمكن إيجادها من خلال العلاقة البسيطة التالية:

$$NA = n_0 . \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

حيث إن n_0 ترمز إلى معامل الانكسار للوسط الفاصل (عادة ما يكون الهواء $n_0 = 1$) بين المصدر الضوئي و مقدمة الليف ومنها:

$$\theta_a = \sin^{-1}(NA)$$

يمكننا أيضا التعبير عن NA بدلالة الفرق النسبي (Δ) بين n_1 و n_2 :

$$NA \approx n_1\sqrt{2\,\Delta}$$

حيث إن Δ تحسب وفقا للعلاقة التالية:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

θ_a تأخذ قيم بين الصفر و ٩٠°

NA تأخذ قيم بين الصفر والواحد

Δ تكون عادة أقل بكثير من الواحد ($\Delta << 1$)

- **ظاهرة امتصاص الضوء:**

كما هو معروف فإن غالبية الألياف البصرية تصنع من مادة السيليكا (Silica)(ثاني أكسيد السيليكون Sio_2)وهي المادة التي يصنع منها الزجاج حيث تتم إضافة مواد معينة (مثل الجرمانيوم) وبنسب معينة إلى الزجاج للحصول على معاملات انكسار مختلفة. عادة ما يمتص الزجاج الضوء الساقط عليه و تسمى هذه العملية الامتصاص الضمني أو الداخل (Intrinsic Absorption) وبالتالي يتسبب في زيادة الفقد على أطوال موجات معينة ويظهر ذلك على شكل انبعاث حراري حيث نجد أن أعلى مستويات الامتصاص على الأمواج الفوق بنفسجية وتحت الحمراء، ولحسن الحظ فإن قيمة الامتصاص في منطقة الأمواج المرئية تكون بين (0.8µm و µm 106) التي تعمل عليها الألياف البصرية قليلة جداً.

علاوة على ما سبق تتواجد الشوائب (مثل أيونات الهيدروكسيل) في مادة السيليكا والتي تمتص الضوء عند أطوال الموجات التي تعمل عليها الألياف البصرية مما يؤدي إلى زيادة الفقد. لهذا السبب يجب أن يكون الزجاج عالي النقاوة وشبه خال من الشوائب. كذلك فإن وصول الماء أو الرطوبة إلى الألياف يؤدي إلى زيادة امتصاص هذه الأيونات للضوء.

التشتيت[٩] Dispersion :

يعتبر التشتيت من المشاكل الرئيسية في أنظمة اتصالات الألياف البصرية والذي يحدد أهم عاملين:

سرعة الإرسال القصوى (Maximum Bit Rate) ومسافة الإرسال القصوى (Maximum Transmission Distance)، وبذلك يتسبب التشتيت في تشويه الإشارة (Signal Distortion) سواء في حالة الأنظمة التماثلية (Analog System) أ، الرقمية (Digital System). إن التأثير الأكبر للتشتيت يظهر في حالة الأنظمة الرقمية وذلك على شكل التوسع (Broadening) في عرض النبضات البصرية المرسلة عبر الليف والذي يزيد بزيادة المسافة المقطوعة . تؤدي هذه الظاهرة السلبية إلى حصول تداخل بين النبضات المرسلة (IntersymbolInterferencs) والتي تعرف اختصارا (ISI). إن زيادة هذه الظاهرة يؤدي إلى زيادة ظهور الأخطاء والتي تؤدي إلى زيادة معدل خطأ البتات (Bit Error Rate) والتي سوف نرمز لها اختصاراً (P_e).

يقاس التشتت بوحدة الزمن لكل وحدة طول معينة $[time/km]$ والتي تعطى في مواصفات الليف.

يمكننا تمثيل تأثير التشتت كما في الشكل المجاور:

الشكل -١١-

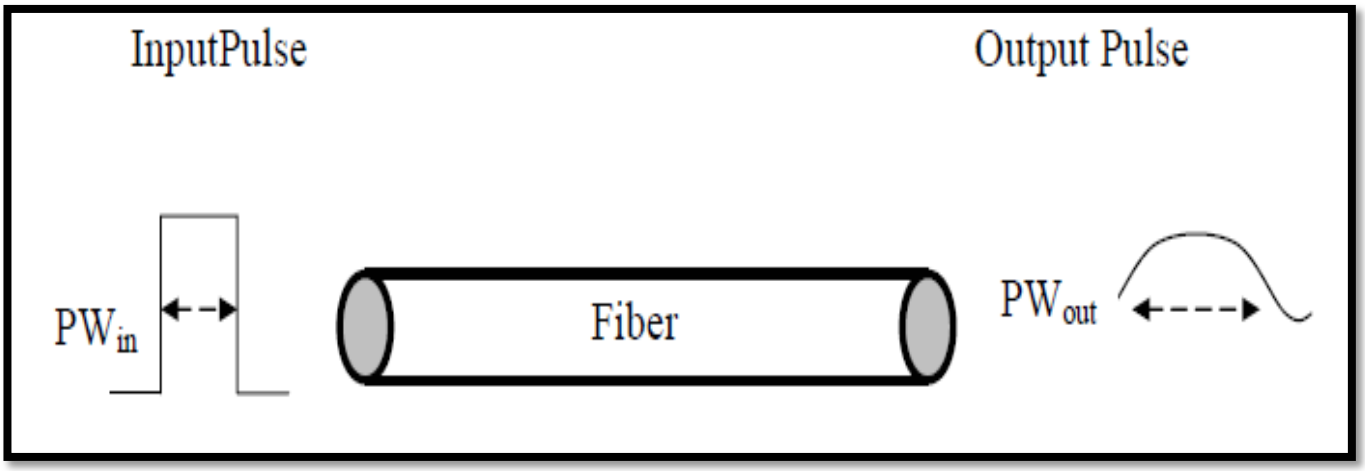
9-PHYSICS for Scientists and Engineers , SERWAY –JEWETT pa.1027

ينقسم التشتيت إلى:

٦- ١-تشتيت النمط (Modal Dispersion) أو (multimode Dispersion) حيث يظهر هذا النوع من التشتيت في الألياف متعددة النمط فقط.

٦-٢ تشتيت اللون(Chromatic Dispersion) حيث يظهر في جميع أنواع الألياف و ينقسم إلى نوعين:

- تشتيت المادة (Material Dispersion)
- تشتيت الدليل الموجي (Waveguide Dispersion)



شكل -١٢- يوضح التوسع في عرض النبضة أثناء انتشارها عبر الليف

الفصل الثالث: أنواع الألياف الضوئية :

تقسم الألياف الضوئية إلى نوعين:

٧-١- الألياف متعدّدة النمط Multi-Mode Fiber :

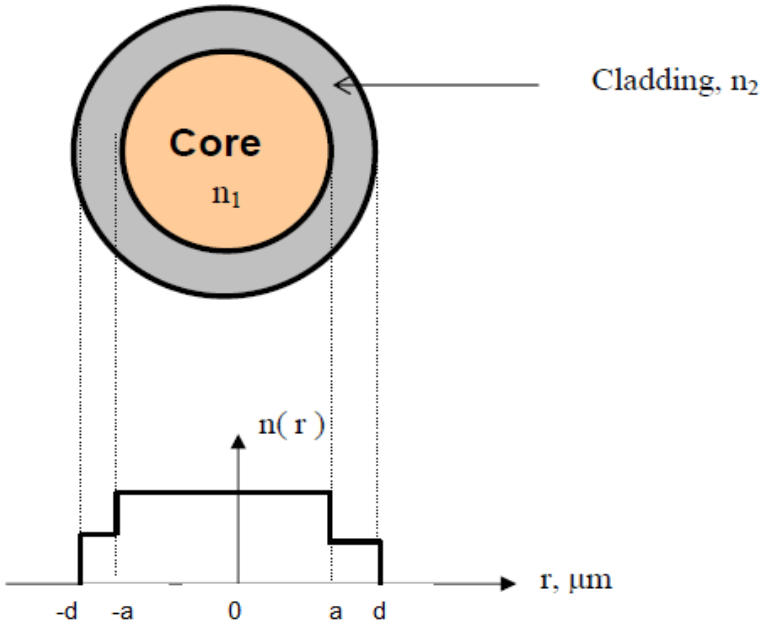
يستخدم هذا النوع في أنظمة الاتصالات الضوئية للشبكات المحلية لإرسال المعطيات والفيديو عليه و يتميز بأنه ذو مجال عريض و تخامد منخفض.

يكون القلب فيها ذو قطر كبير يصل إلى 62.5 ميكرون ، و تقوم بحمل و نقل الإشارات تحت الحمراء التي يتراوح قطرها ما بين 850 إلى 1300 نانومتر و الصادرة من الصمامات الالكترونية (LED) ، بعض الألياف يمكن أن تصنع من البلاستيك و لكن الجزء الأساسي فيها النواة ذو قطر كبير نسبيّاً (1mm) و تصلح لنقل الضوء الذي يمكن رؤيته فقط و

تعمل على الطول الموجي 650نانومتر و هو الضوء المنبعث من الصمّام الالكتروني و لا يصلح هذا النوع من الألياف لنقل الضوء الليزري ، كما تصنّف هذه الألياف إلى قسمين :

١-١- ألياف متعدّدة النمط و بمعامل انكسار عتبي (Multimode Step Index Fibers) :

يصنع هذا النوع من الألياف الضوئية من عناصر مختلفة من الزجاج و مركّباته أو من السيليكا المطعّمة ، و يتم تصنيع لب الليف من زجاج نقي له معامل انكسار ثابت بينما يصنع المحيط من الزجاج بمعامل انكسار ثابت لكن ذو قيمة أقل ، و يكون تغير معامل الانكسار له شكل العتبة و من هنا جاءت التسمية ، تتميّز هذه الألياف بكبر قطر اللب و كبر فتحة النفوذ العددية و التي تمكّن من دخول كمية كبيرة من الضوء لليف الضوئي ويتم بها نقل العديد من الإشارات الضوئية ، تعتمد خواص هذه الألياف على نوع الليف و المواد المصنّعة منها و طريقة التصنيع و تعتبر الألياف المصنّعة من السيليكا المطعّمة أفضل الألياف الضوئية و تستخدم لنقل المعلومات لمسافة قصيرة و عرض نطاق محدود و تكلفتها قليلة.

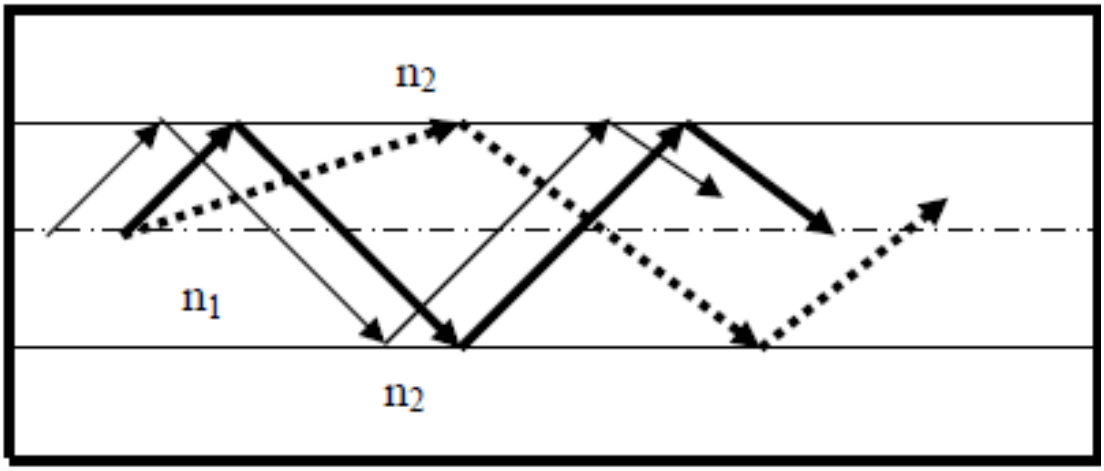


الشكل -١٣-

يمثل الرمز d نصف قطر المحيط والرمز a نصف قطر اللب حيث تعطى هذه القيم بوحدة الميكرو متر $[\mu m]$

إذا نظرنا إلى الشكل أعلاه نجد أن تغير معامل الانكسار من القيمة n_2 إلى القيمة n_1 أو العكس له شكل الدرجة أو العتبة و من هنا جاءت التسمية "الليف العتبي".

تتميز الألياف العتبية ببساطتها وبالتالي تدني سعرها و لكنها متواضعة في الخصائص والميزات و تكمن مشكلتها الرئيسية في التشتيت الباطني العالي نسبياً مما يؤدي إلى التأثير سلباً على مسافة الإرسال وسرعات البث المسموح بها. أما السبب في حصول التشتيت العالي فيعود إلى أن الحزم الضوئية المختلفة تسلك مسارات مختلفة في الطول كما في الشكل ١٤ و لكنها تنتشر بسرعات ثابتة مما يؤدي إلى وصولها في أزمان مختلفة و بالتالي تأخير زمني فيما بينها و الذي يتسبب في حصول مشكلة التشتت الباطني (الداخلي).



الشكل-١٤-يوضح اختلاف في أطوال المسارات للحزم الضوئية

١-٢-ألياف متعدّدة النمط و بمعامل انكسار متدرّج (Multimode graded Index Fibers):

إن ما يميز الألياف البصرية ذات معامل الانكسار التدريجي هو أن معامل الانكسار للب الليف البصري لا يكون ذا قيمة ثابتة و إنما يتغير وبشكل تدريجي بدءا من مركز اللب (أقصى قيمة) ولغاية الحد الفاصل بين اللب و المحيط (أدنى قيمة)، حيث يأخذ هذا التغير التدريجي أشكالا مختلفة: المثلثي (Triangular) و القطع المكافئ (Parabolic) أو أية أشكال أخرى تقع فيما بينهما. بينما يبقى معامل الانكسار ثابتا لمحيط الليف.

يتضح مما سبق أن معامل الانكسار لمنطقة لب الليف ذو قيمة متغيرة ويأخذ شكل دالة رياضية معينة n(r) وهي التي تحدد الأشكال سالفة الذكر. يمكننا التعبير رياضيا عن n(r) على الشكل التالي:

$$n(r) = \begin{cases} n_1(1-2\Delta)\sqrt{\left(\frac{r}{a}\right)^a} \\ n_2\sqrt{(1-2\Delta)} = n_2 \end{cases}$$

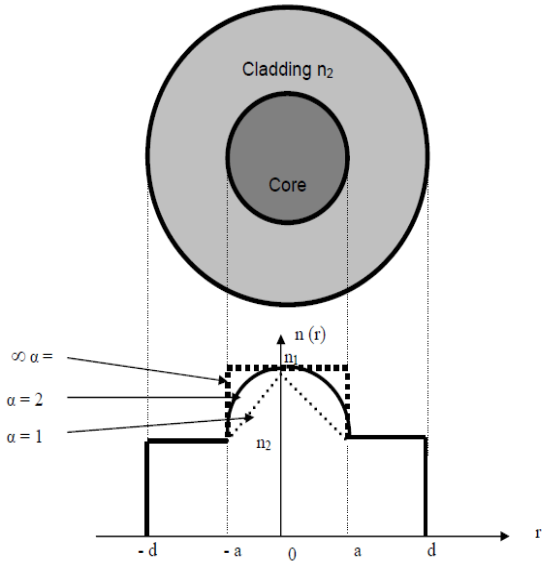
حيث إن a تمثل معامل الدالة والذي يحدد الشكل العام (المثلثي ، أو القطع المكافئ، أو...) كما في الشكل (١٥) فعندما:

$a = 1$ نحصل على الشكل المثلثي.

$a = 2$ نحصل على شكل القطع المكافئ.

$a = \infty$ نحصل على شكل الليف العتبي.

حيث يمكن أن تأخذ أي قيمة حقيقية أكبر من واحد، لكن ومن ناحية عملية و بعد إجراء العديد من التجارب، فقد وجد أن أفضل القيم هي $a = 2$ ويسمى الشكل الناتج في هذه الحالة شبه القطع المكافئ (Near Parabolic profile).

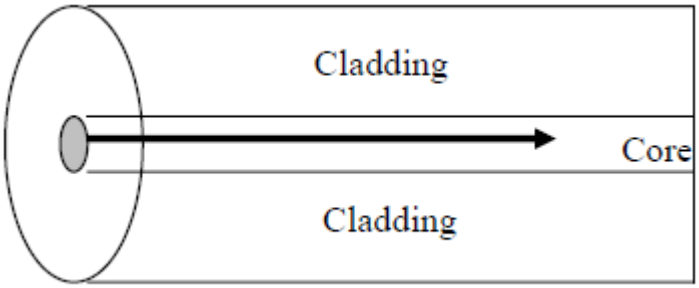


الشكل –١٥–

٧-٢- ألياف أحاديّة النمط (Single Mode Fibers) :

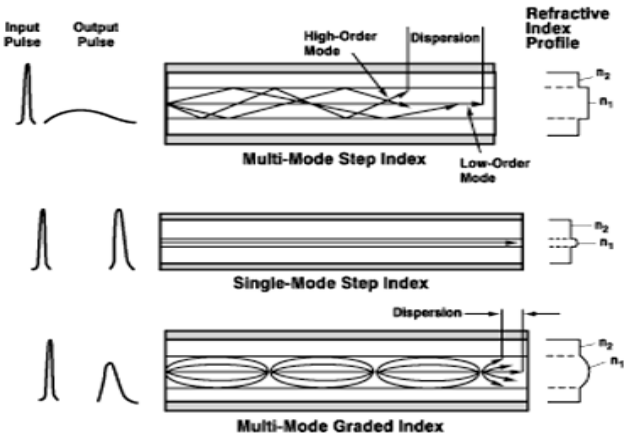
يستخدم هذا النوع في أنظمة الاتصالات الضوئية البعيدة المدى ويتميز بأنه ذو تخامد منخفض جداً وتشتيت قليل و قطر نواته صغير جداً كما في الشكل رقم (١٦)، بحيث يستقبل شعاع واحد فقط حامل للمعلومات موازي لمحور الليف و له فتحة عددية NA = 0.11

من عيوبه أنه يتطلب دقة عالية جداً أثناء وصله مع المرسلات والمستقبلات الضوئية وأيضاً في حال توصيله عند انقطاعه.



الشكل -١٦-

معظم الألياف أحاديّة النمط الموجودة حاليّاً ذات معامل انكسار عتبي ، تتميّز الألياف أحادية النمط بنوعيّتها الممتازة كما أنّ عرض النطاق فيها كبير، يكون قطر اللب فيها صغير جدّاً يصل إلى ٩ ميكرون و قطر الكساء يبلغ أضعاف قطر اللب و ذلك للتقليل من نسبة الفقد من الموجات المضمحلّة التي تمتد داخل الكساء و مع استخدام الغلاف الواقي يصبح القطر الإجمالي لليف أحادي النمط مساو إلى قطر الليف متعدّد النمط ، و ينتقل من خلالها إشارة ضوئية واحدة فقط و تمر عبرها أشعة الليزر تحت الحمراء ذات طول موجي يتراوح ما بين ١٣٠٠ إلى ١٥٥٠ نانومتر .



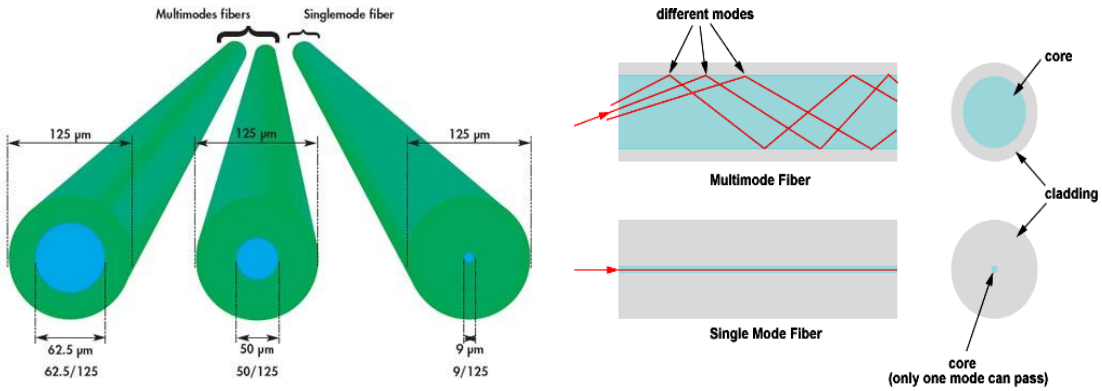
الشكل -١٧-

هذا الشكل يوضّح كيفية انتقال الضوء في كل من الأنواع الثلاثة إضافة إلى اتساع النبض الناتج عن انتشار الضوء في كلا من الليف أحادي النمط و متعدّد النمط.[١٠]

(١٠)Fiber optic, John Wiley pa274

مقارنة بين الأنواع :

إنّ قطر النواة كبير في الألياف متعدّدة النمط بمعامل انكسار عتبي و التشتيت كبير و هي سهلة الاستخدام ، تستخدم للمسافات القصيرة كما تستخدم في الشبكات المحليّة . أما في الألياف متعدّدة النمط بمعامل انكسار متدرّج فإن قطر النواة متوسطو التشتيت أقل و هي سهلة الاستخدام ، تستخدم للمسافات القصيرة ، كما تستخدم في الشبكات المحليّة .وفي الألياف أحاديّة النمط يكون قطر النواة صغير و التشتيت معدوم و هي صعبة الاستخدام ، تستخدم للمسافات الطويلة ، كما تستخدم في شبكات الهواتف و كوابل التلفزيون .



الشكلان– ١٨– و –١٩– يوضحان الفرق بين الانواع

الفصل الرابع: كيف تصنع الألياف الضوئية ؟

تصنع من زجاج على درجة عالية من النقاء حيث وصفت إحدى الشركات ذلك بقولها لو كان هناك محيط من الألياف الضوئية يصل للعديد من الأميال و نظرت من سطحه إلى القاع يجب أن تراه بوضوح ، و تتم صناعة الألياف الضوئية على النحو التالي :

- صنع اسطوانة زجاجية ذات شكل معد مسبقاً .
- سحب الألياف الضوئية من هذه الاسطوانة الزجاجية .
- اختبار الألياف الضوئية .

الزجاج المستخدم في عمل الاسطوانة يصنع من خلال عملية تسمّى "ترسيب البخار الكيميائي المعدّل" حيث يمرّر الأوكسجين على محلول كلوريد السيلكون وكلوريد الجرمانيوم و كيماويات أخرى ثم تمرر الأبخرة المتصاعدة داخل أنبوب من الكوارتز موضوع في مخرطة خاصّة ،مع دوران المخرطة تتحرّك الشعلة نحو الأعلى و الأسفل خارج الأنبوب و تتسبّب الحرارة الشديدة إلى إحداث أمرين:

_تفاعل السيليكون و الجرمانيوم مع الأوكسجين لتكوين أكسيد السيليكون و أكسيد الجرمانيوم.

_ترسب أكسيد السيليكون و أكسيد الجرمانيوم على جدار الأنبوب من الداخل و يندمجان معاً لتكوين الزجاج الخام المطلوب حيث يمكن التحكّم بدرجة نقاء و صفات الزجاج المتكوّن من خلال التحكّم بالخليط .
الآن يتم سحب الألياف من هذه الاسطوانة بوضعها في أداة السحب حيث ينزل الزجاج الخام في فرن كربوني درجة حرارته1900–2200درجة سيليزس فتبدأ المقدمة في الذوبان حتّى ينزل الذائب بتأثير الجاذبية و بمجرّد سقوطه يبرد مكونا الجديلة الضوئية ، هذه الجديلة تعالج بتغليف متتابع أثناء سحبها بوساطة جرار مع قياس مستمر لنصف القطر باستخدام مايكرومتر ليزري ، تسحب الألياف من القالب الخام بمعدّل 20 m/s. يتم بعد ذلك اختبار الألياف من ناحية معامل الانكسار و الشكل الهندسي خصوصا نصف القطر ، تحمّلها للشدّ ، تشتّت الإشارات الضوئية خلالها ، سعة حمل المعلومات ، تحمّلها لدرجات الحرارة و إمكانية توصيل الضوء تحت الماء .

الفصل الخامس: ميزات الألياف الضوئيّة واستخداماتها:

○ ميزات الألياف الضوئية:

- عرض نطاقها عالي جدّاً ممّا يعني إمكانية نقل معلومات عالية جدّاً بواسطة ليفة بصرية واحدة و قد تكون هذه المعلومات صور مكالمات هاتفية أو معلومات للحواسيب أو مزيج منها .
- قطرها صغير و وزنها خفيف يبلغ سمك الليفة البصرية سمك الشعرة ، و هي أقل حجم و وزن من الأسلاك الهاتفية أو المحوريّة ، فمثلاً: ليف بصري بقطر 125 مايكرومتر ضمن كابل يبلغ قطره ٦ ملم يمكن أن يحل محل كابل هاتفي قطره 8سم و يحتوي على 900 زوج من الخطوط السلكيّة النحاسية .
- لا يوجد تداخل بينها مهما قربت المسافة .
- لا تتأثر بالحث أو التداخل الكهرومغناطيسي فهي مصنّعة من مواد عازلة .
- انخفاض في سعر تكلفة المكالمات فمعظم الألياف الضوئية تصنع من مادة السيليكا الموجودة بكثرة في الرمل و يقل سعرها كثيراً عن النحاس و بالتالي ثمن نقل المعلومات بأنواعها المختلفة سيقل عن النظم الأخرى .
- أكثر أمان و سلامة فنظراً لأنّ الضوء هو الوسط الناقل للمعلومات في الألياف البصريّة و لا يولّد أي مجال مغناطيسي خارج الكابل فإنّ من الصعوبة إمكانية التجسّس و معرفة المعلومات التي يحويها الكابل البصري كما من الصعوبة معرفة وجود الكابل بسبب المادّة المصنع منها و لا يوجد أي جزء معدني إلّا في بعض الحالات حيث تتم إضافة كابل فولاذي لتقوية الكابل البصري أو تسليح معدني لحماية الكابل من القوارض و الأحمال الخارجيّة ، و سلامة الألياف لأن الضوء الناقل لا يمكن أن يحدث شراراً لعدم وجود تيار كهربائي فيه لذلك يمكن استخدامها في الأماكن الحاوية على غازات أو مواد قابلة للاحتراق و مستودعات المواد الخطرة كما أن احتمال كهربة العاملين في الألياف البصرية غير وارد .
- حياتها طويلة فالزجاج لا يصدأ .
- تتحمّل درجات حرارة عالية و لا تتأثّر بالمواد الكيميائيّة حيث يمكن للزجاج أن يتعرّض لدرجات حرارة متفاوتة من حيث الارتفاع و الانخفاض كما يمكن كما يمكن استخدامه في أجواء تحتوي على مواد كيميائيّة مختلفة دون أن يتعرض للتلف .
- سهولة الصيانة كما يمكن الاعتماد عليها .

لكنها لا تخلو بشكل عام من المساوئ والتي نذكر منها:

١- مقاومة شد غير مطلقة.

٢- تتطلب دقة عالية في تقنيات توصيلها و هذه غير مطلوب في الكوابل المحورية والصوتية.

٣- الثمن الباهظ لتجهيزات الإرسال والاستقبال بالرغم من الثمن الزهيد لكوابل الألياف.

- **استخدام الألياف البصريّة في الاتصالات :**

تتكوّن وحدة الاتصالات بالألياف البصريّة من الآتي :

- الألياف الضوئية
- معزّز أو مجدّد الإشارات الضوئية : يتكوّن من ألياف بصريّة مغلّفة بمادة خاصة و عندما تسقط الإشارات الضوئية الضعيفة على جزيئات المادة فإنّها تستثار لتعطي إشارات ضوئية قويّة لها نفس خصائص الإشارات الضوئية الساقطة أي أن الغلاف يعمل عمل الليزر (تضخيم الضوء الساقط) و هكذا تستمر عملية انتقال الضوء لمسافات طويلة دون أن تفقد .
- جهاز الإرسال : فيه تدار الأجهزة لتعطي سلسلة من الومضات الضوئية المتعاقبة التي تولّد الشفرات أو الإشارات الضوئية المرسلة .
- جهاز الاستقبال : تستخدم في هذه المستقبلات خلايا ضوئية أو الثنائيات الضوئية التي تتعرف و تكشف الإشارات الضوئية المرسلة و تحل شفرتها إلى إشارات كهربية تدير الأجهزة المختلفة كالتلفزيون و الكمبيوتر و غيرها .....

النظام الليفي البصري :

تشكّل الألياف البصرية العنصر الأساسي في أنظمة الاتصالات الليفيّة البصريّة حيث تستخدم كقنوات اتصال لنقل الضوء المحمّل بالمعلومات من مكان إلى أخر ، و عند تصميم وصلة ليفية بصرية لا بدّ من اعتبار ثلاثة عناصر رئيسية و هي : التوهين و التشتيت و فتحة النفوذ العددية . من أجل جهة الإرسال علينا اختيار منبع ضوئي يبعث الضوء بطول موجي مناسب و عرض طيفي قليل و قدرة بصرية كافية لهذا الغرض ثم استخدام نوعين من المنابع و هما الثنائيات الباعثة للضوء و الثنائيات الليزر . يتطلّب اقتران الضوء من المنبع إلى الليف وجود مواءمة جيدة بينهما كي تنقل أكبر قدر من القدرة البصريّة إلى الليف لذا لا بد من العناية في اختيار المقرن المناسب الذي يعطي أقل فقد ممكن و نظراً لأنّ الألياف تنتج بأطوال محدّدة فلا بد من ربط بعضها ببعض للحصول على الطول المطلوب و قد يؤدّي ذلك إلى حصول بعض الفقد في القدرة المنقولة و أسبابه هي : عدم التراصف الزاوي ، تباعد الأطراف ، نعومة الأسطح و توازيها و قد يحصل الفقد أيضاً عند ربط ألياف تختلف في أقطارها و فتحات نفوذها العددية ، عند المستقبل يجب اختيار الكواشف

التي تعمل بنفس الطول الموجي للمنبع و لها استجابة و كفاءة و كمية جيدتين و زمن استجابة مناسب و الحد الأدنى من القدرة القابلة للكشف .

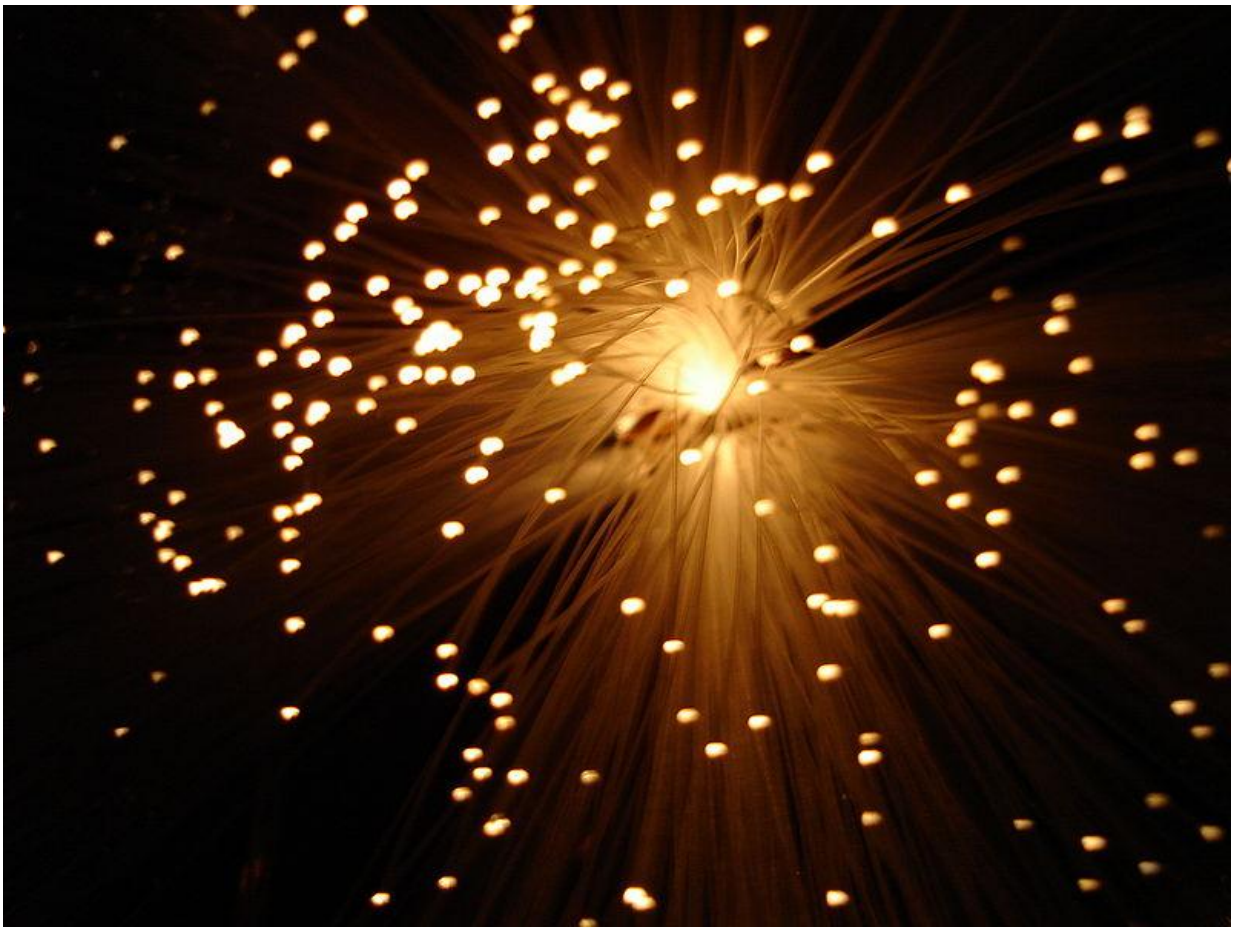
- **تطبيقات الألياف الضوئية :**

من الصعب جدّاً التعرّف على كل المجالات الممكن استخدام الألياف البصرية فيها ، لذلك سنتعرف على بعض مجالات الاستخدامات العامّة و هي :

الاتصالات الهاتفية و الاتصالات التلفزيونية ، محطات القوى و الشبكات المحليّة ، الاستخدامات العسكرية و نقل المعطيات و الكابلات المغمورة . حيث توجد خطوط مغمورة تربط الولايات المتحدة الأمريكية باليابان و أخرى تربط أوروبا بآسيا.

الخاتمة:

وبهذا نكون قد تعرفنا على قدر كبير من المعلومات عن الألياف الضوئية وأنواعها و آلية عملها وكيفية التعامل معها و إظهار الإيجابيات و السلبيات التي تعترضنا في أثناء استخدام هذه الالياف ، وبكل هذه المعلومات نتمكن من إدراك أهمية ما توصل له العلم الحديث بأن نحقق الكثير من الانجازات العلمية عن طريق الاستمرار في مسيرة العلم، فليس علينا فقط أن نتعلم و أن نقف هنا بل علينا الإبداع والابتكار لنكبر بوطننا و نحقق الفائدة الكبرى عن طريق استثمار العلم و توظيفه في حياتنا اليومية كأن نستبدل أسلاك الهاتف الواصلة إلى المنازل من المقاسم الهاتفية بألياف ضوئية لنحسن من جودة التواصل والاتصال و للارتقاء بعلومنا بالشكل الذي يليق بنا.



المصادر والمراجع:

1-http://www.findthatpdf.com/search-82195404-hPDF/download-documents-fiber-optics-1-arabic-pdf.htm

2-http://www.kutub.info/downloads/928.pdf?1271812445&key=MzIyMTA3NzPtDdrPgkXutre5m4cqvmVSajG6

3-Fiber Optic Telecommunication ,Nick Massa, Springfield Technical Community College ,University of Connecticut

٤-الضوء الهندسي –للدكتور رزق محمد قرفول والدكتور سلمان عبود دلا ،جامعة تشرين ،كلية العلوم عام ٢٠٠٤-٢٠٠٥

٥-محاضرات من معهد التعليم والتكوين عن بعد

6-PHYSICS for Scientists and Engineers , SERWAY –JEWETT

7- Fiber optic, 1991 John Wiley & Sons