

الفصل الثالث

أسس الموجات الضوئية

الفصل الثالث أسس الموجات الضوئية Lightwave Fundamentals

ستحدث في هذا الفصل عن أسس الموجات الضوئية وبصفة خاصة ما يتعلق بمجال الألياف البصرية والثنائيات الباعثة للضوء وأشعة ليزر وكاشفات الضوء وستجنب ما أمكن الدخول في المعادلات الرياضية ومحاولة عرض الموضوع بصورة مبسطة ، وسيلاحظ القارئ الكريم أن بعض الموضوعات المطروحة في هذا الفصل قد تكون مألوفاً لديه لأنها مشمولة في مناهج المرحلة الثانوية .

١-٣ طبيعة الضوء Nature of Light

لقد حاول علماء الطبيعة عبر القرون الماضية إيجاد تفسير علمي لظاهرة الضوء من خلال نماذج مبسطة يمكن التعامل معها وقد برزت نظريات عديدة لتفسير هذه الظاهرة ومحاولة التعرف على كيفية انتشاره وامتصاصه واختراقه لبعض الأوساط المختلفة . ومن أوائل من تعرف على طبيعة الضوء هو العالم المسلم الحسن بن الهيثم الذي دحض النظريات القديمة السائدة قبله بأكثر من ألف عام وقال بأن الضوء عبارة عن كمية فيزيائية لها صفاتها وخصائصها ولا تزال هذه النظرية هي السائدة حتى الآن ، وتلا ذلك نظريات أخرى استخدمت لتفسير طبيعة الضوء وهي :

١-١-٣ نظرية الجسيمات الدقيقة Corpuscular Theory

تقول هذه النظرية إن الضوء مكون من أجسام كروية صغيرة جداً ومهترنة تسير بسرعة عالية جداً وتختلف سرعتها تبعاً للوسط الذي تخترقه ، وتتحرك تلك الجسيمات الدقيقة في خطوط مستقيمة وأول من ابتدع هذه النظرية هو العالم الانجليزي اسحاق نيوتن وقد استند في نظريته هذه على أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس في حالة

الضوء على سطح عاكس . وتشير هذه النظرية إلى أن سرعة الضوء تزداد في الوسط الكثيف عنه في الوسط الخفيف وهو مخالف للوضع العملي والعلمي وقد فشلت هذه النظرية في تفسير ظواهر طبيعية كثيرة كالانكسار والتداخل والانعراج والاستقطاب . بعدها بدأت نظريات أخرى أكثر قرباً للواقع العلمي والعملية . وقد تفسر بعض الظواهر بإحدى هاتين النظريتين أو بكليهما . وسنقوم بشرحهما بإيجاز فيما يلي .

٣-١-٢ نظرية الموجات الكهرومغناطيسية Electromagnetic Wave Theory

من خلال تجارب عديدة وجد أن الضوء لا يتصرف كعزمة من الفوتونات بل على شكل موجات كهرومغناطيسية وأول من تحدث عن هذه النظرية هو العالم الإنجليزي ماكسويل ، وتحتوي هذه الموجات الكهرومغناطيسية على حقلين متذبذبين ومتعامدين على بعضهما البعض أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي ، وباستخدام هذه النظرية يمكن تفسير انتشار وانتقال الضوء ضمن الأجواء المختلفة . وعند محاولة تفسير طبيعة الضوء لا بد من استخدام نظريتي الفوتونات والموجات الكهرومغناطيسية ولا بد من أن نذكر هنا أن أي نظرية من هذه النظريات لا تستطيع لوحدتها أن تفسر كافة الظواهر الضوئية .

إن التعامل مع الضوء كموجة وكجسم يساعدنا على فهم البصريات الليفية فعندما نتحدث عن صفات الألياف البصرية التي تتغير مع الطول الموجي فإننا نستخدم الموجة وعندما نتحدث عن انبعاث الضوء من المصدر أو امتصاصه من قبل الكاشف نستخدم نظرية الجسيم particle theory .

١ - طول موجة الضوء Wavelength of Light

ذكرنا أننا أن الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية فإذا كان الأمر كذلك فلا بد إذاً من تردد لهذا الضوء وطول موجي . وفي مجال البصريات غالباً ما يستخدم

الطول الموجي بدلا من التردد والذي يستخدم كثيراً في مجالى الألكترونيات والاتصالات .
يقاس الطول الموجي إما بالميكرومتر micrometer ويساوي 10^{-6} m أو
بالأنجستروم angstrom ويساوي 10^{-10} m .

والطول الموجي يرتبط بالتردد f من خلال المعادلة التالية :

$$\lambda = \frac{v}{f} \dots\dots\dots (3.1)$$

حيث أن v هي سرعة الضوء في الوسط المادي وترتبط بسرعة الضوء في الفضاء c
بالمعادلة التالية :

$$v = \frac{c}{n} \dots\dots\dots (3.2)$$

و n هي معامل الانكسار للوسط المادي وتعتمد قيمته على الطول الموجي للضوء وفي
الاتصالات البصرية نستخدم منابع ضوئية تصدر الأشعة تحت الحمراء والألياف البصرية
تصنع من السليكا المنصهرة والتي ينخفض فيها معامل الانكسار مع ازدياد الطول الموجي
، ونرى في الجدول (٣-١) معامل الانكسار وسرعة الضوء في بعض المواد .

المادة	معامل الانكسار	سرعة الضوء (كم/ثانية)
الفراغ	1.0	300 000
الهواء	1.0003	300 000
الماء	1.33	225 000
السليكا المنصهرة	1.46	205 000
الزجاج	1.5	200 000
زرنبيخ الجاليوم	3.35	89 500
سليكون	3.5	88 000
جرمانيوم	4.0	75 000

الجدول (٣-١) معامل الانكسار وسرعة الضوء في بعض المواد

ب - سرعة الضوء Speed of Light

شأن الموجات الضوئية كشأن سائر الموجات الكهرومغناطيسية إذ تسير في الفضاء بسرعة عالية جداً تصل إلى 3000000000 m/s ويعبر عنها بالمعادلة التالية :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \dots\dots\dots (3.3)$$

حيث أن ϵ_0 معامل سماحية الفراغ الحر permittivity و μ_0 معامل نفاذية الفراغ الحر permeability وقيمهما التقريبية هي $8.85 \times 10^{-12} \text{ Farad/meter}$ و $411 \times 10^{-7} \text{ Weber/Ampere - meter}$ على التوالي .

وفي الوسط المادي تتغير قيم ϵ و μ فتتغير تبعاً لذلك سرعة الضوء في الوسط المادي ويعبر عن معامل الانكسار في الوسط المادي بالعلاقة التالية :

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \dots\dots\dots (3.4)$$

حيث أن سماحية ونفاذية الوسط المادي ϵ و μ يرتبطان بسماحية ونفاذية الفضاء بالعلاقتين الآتيتين :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

وتسمى ϵ_r السماحية النسبية relative permittivity و μ_r النفاذية النسبية relative permeability .

يعبر عن سرعة الضوء في الوسط المادي بالتالي :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c}{n} \dots\dots\dots (3.5)$$

٣-١-٣ - نظرية الفوتونات Photon Theory

تقول هذه النظرية إن الضوء عبارة عن سيل من الجسيمات الكهرومغناطيسية والتي تتحرك بسرعة فائقة يطلق عليها فوتونات وعلى الرغم من تسميتها بالجسيمات إلا أنها لا تشبه الجسيمات المادية ، إذ أنها تنطلق بسرعة فائقة ولكن كتلتها تساوي صفراً في حالة السكون وبدلاً من إطلاق كلمة جسيمات على الفوتونات يفضل إطلاق حزم ضوئية وأول من أخذ بهذه النظرية هو العالم الأمريكي ألبرت اينشتاين إذ افترض أن الطاقة في الحزمة الضوئية تسير خلال الفراغ في شكل حزم مركزه أطلق عليها اسم الفوتونات photons ، وطاقة الفوتون w_p يعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$W_p = hf \dots\dots\dots(3.6)$$

إذ تمثل f تردد الضوء و h ثابت بلانك $= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.S}$ وتستخدم هذه النظرية لإيضاح انبعاث وامتصاص الضوء وبصفة خاصة ما يتعلق بالتأثيرات الكهروضوئية كالثنائيات الباعثة للضوء أو الكواشف الضوئية والحزمة الضوئية تحتوي على عدد كبير من الفوتونات كما نرى في المثال التالي :

ما هو عدد الفوتونات في الثانية الساقطة على كاشف ضوئي إذا كانت القدرة هي واحد ميكرووات وطول موجة الضوء $1.3 \mu\text{m}$ ؟

من المعادلة (3.1) و(3.6) نجد أن الطاقة للفوتون الواحد عند $\lambda = 1.3 \mu$

$$W_p = hf = h \frac{c}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \times \frac{3 \times 10^8}{1.3 \times 10^{-6}} = 15.3 \times 10^{20} \text{ J}$$

وحيث أن القدرة هي معدل تسليم الطاقة لذا فإن الطاقة الكلية هي :-

$$W = Pt \dots\dots\dots(3.7)$$

ولو ضربنا القدرة (μw) بالفترة الزمنية وهي ثانية واحدة نجد أن الطاقة الناتجة هي ($1 \mu\text{J}$) فيكون عدد الفوتونات اللازمة للحصول على طاقة مقدارها ($1 \mu\text{J}$) مايلي :

$$\frac{w}{wp} = \frac{\text{الطاقة الكلية}}{\text{طاقة كل فوتون}} = \frac{10^{-6} \text{ J}}{15.3 \times 10^{-20} \text{ J/ photon}} = 6.5 \times 10^{12} \text{ photons.}$$

نلاحظ من هذا المثال العدد الهائل للفوتونات التي ترد إلى الكاشف خلال ثانية واحدة ،
وحيث أن زمن الاستقبال يقاس بجزء بسيط من الثانية مثلاً (1 μ sec) ، نجد أن عدد
الفوتونات الواردة في هذا الزمن الضئيل تساوي 6.5×10^6 فوتون وتوجد مستقبلات
قادرة على اكتشاف فوتونات قليلة فكيف . بهذا العدد الهائل منها ، ولا بد من الإشارة
هنا إلى أن هناك وحدة أخرى تستخدم لقياس الطاقة الحركية التي يكتسبها الإلكترون
عندما يعجل بفرق جهد مقداره واحد فولت هي إلكترون فولت ev ويعبر عنها بالعلاقة
التالية :

$$1 \text{ ev} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

لذا فإن طاقة الفوتون الوارد في المثال السابق هي :

$$\frac{15.3 \times 10^{-20}}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.96 \text{ ev.}$$

٣ - ٢ تطبيق التردد البصري Optical Frequency Spectrum

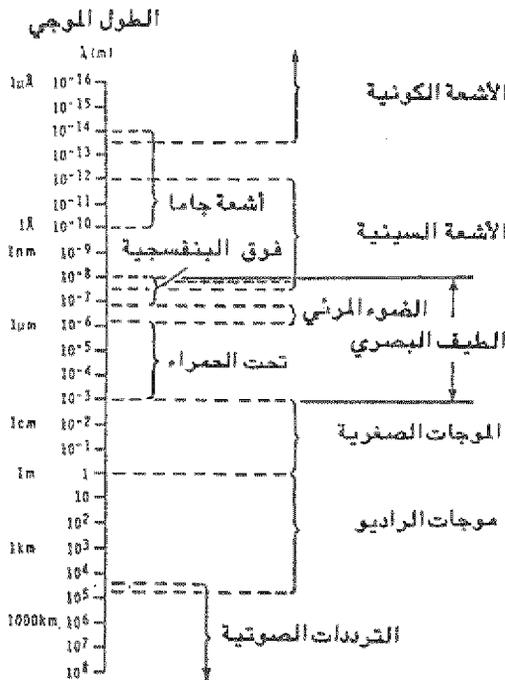
تشغل الموجات البصرية جزءاً يقع بين الموجات الصفرة والأشعة السينية كما هو
موضح في الشكل (٣-١) وتشمل مناطق ثلاث ، وهي :

١ - فوق البنفسجية ونطاق أطوال موجاتها قصير ولا يمكن للعين البشرية أن تراها
وأطوال موجاتها تتراوح بين 50 إلى 3900 أنجستروم ، من 6×10^{16} إلى
 7.69×10^{14} هيرتز وهي موضحة بالشكل (٣-٢) .

٢ - المرئية وهي الموجات التي يمكن للعين البشرية أن تراها وأطوال موجاتها من
3900 إلى 7500 أنجستروم وتردداهما من 7.69×10^{14} و 3.9×10^{14} هيرتز
وهي موضحة بالشكل (٣-٣) .

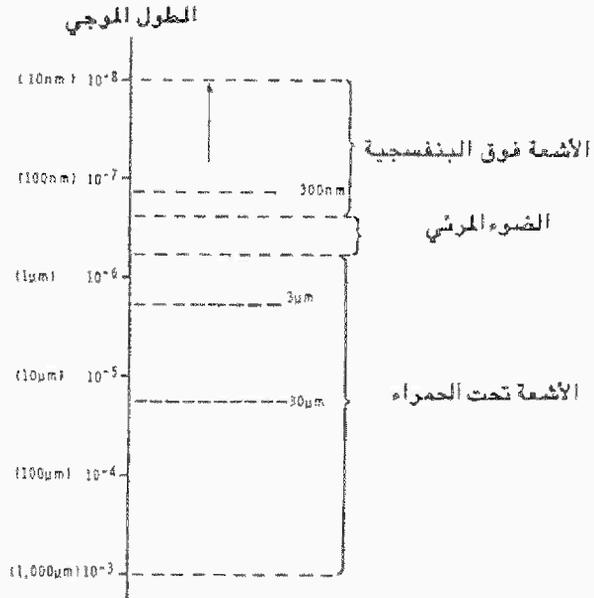
٣ - تحت الحمراء ونطاق طول موجاتها طويل لا يمكن للعين البشرية أن تراها ويتراوح طول موجاتها من 7500 إلى 40 000 000 أنجستروم وترددها من 4×10^{14} إلى 7.5×10^{10} هرتز وهي موضحة بالشكل (٣-٢) .

يمكن للعين البشرية أن ترى اللون البنفسجي والذي طول موجته يساوي 4300 أنجستروم في جانب من الطيف الكهرومغناطيسي واللون الأحمر والذي طول موجته يساوي 6800 أنجستروم على الجانب الآخر من الطيف . وتقع بين هذين اللونين ألوان عديدة كالأزرق والأخضر والأصفر والبرتقال ، كما هو موضح في الشكل (٣-٣) . وعندما يكون لشعاعين ضوئيين نفس طول الموجة يقال أن لهما نفس اللون وبالعكس فعندما يكون هناك شعاعين ضوئيين لهما نفس اللون فيقال أن لهما نفس طول الموجة .

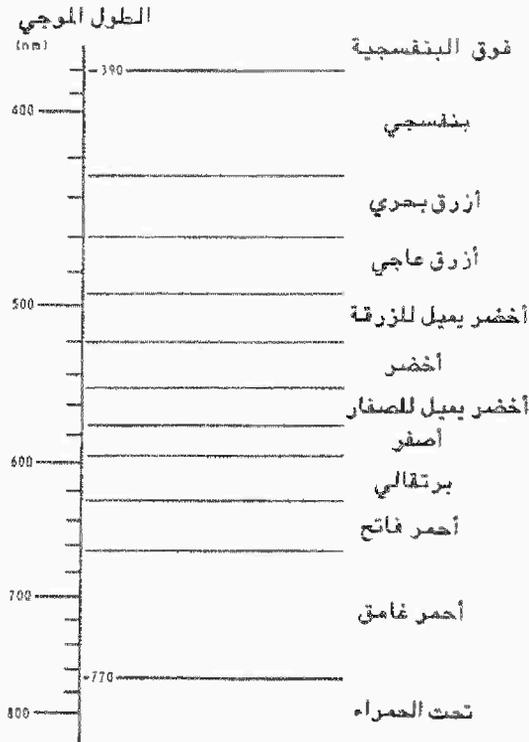


الشكل (٣-١)

موقع الطيف البصري في الطيف الكهرومغناطيسي



الشكل (٢-٣) الطيف البصري



الشكل (٣-٣) الطيف المرئي

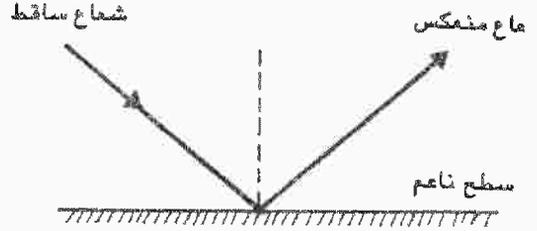
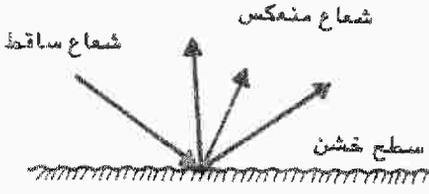
٣ - ٣ انعكاس الضوء Reflection of Light

عندما يسقط الضوء على سطح فاصل بين وسطين فإن جزءاً من هذا الضوء سينعكس في نفس الوسط الذي سقط فيه ، أما الجزء الآخر فإنه يخترق الوسط الثاني عبر سطح الانفصال حيث يمر الضوء تماماً أو لا يكون للوسط الثاني أي تأثير يذكر عندئذ يطلق على الوسط على أنه شفاف transparent ، مثل الزجاج والماء والهواء وبعض المنتجات البلاستيكية . وتعتبر الألياف البصرية المستخدمة للاتصالات من أفضل المواد الشفافة . أما إذا امتص الوسط الثاني الضوء فإن هذا الوسط يعتبر معتماً وقد تكون بعض الأوساط شفافة ولكن بزيادة سمكها تصبح معتمه، وهو ما نلاحظه على شواطئ البحر، إذ يكون الماء شفافاً عند الساحل ويزداد عتمه كلما تعمقنا أكثر . وبعض المواد تسمح بمرور جزء من الضوء وتضعف الرؤية من خلالها وتسمى نصف شفافة translucent وتتوقف نسبة ما ينعكس على طبيعة السطح العاكس .

عندما يسقط الضوء على سطح مصقول فإن انعكاسه سيكون منتظماً أي أنه سينعكس باتجاه معين بالنسبة لاتجاه زاوية السقوط كما في الشكل (٣-٤) أما إذا كان السطح الساقط عليه الضوء خشناً فإن الشعاع المنعكس سيكون غير منتظم ويسمى بالانعكاس المشتت diffuse كما في الشكل رقم (٣-٥) والانعكاس المشتت هو الذي يمكننا من رؤية كافة الأجسام المرئية في حياتنا اليومية .

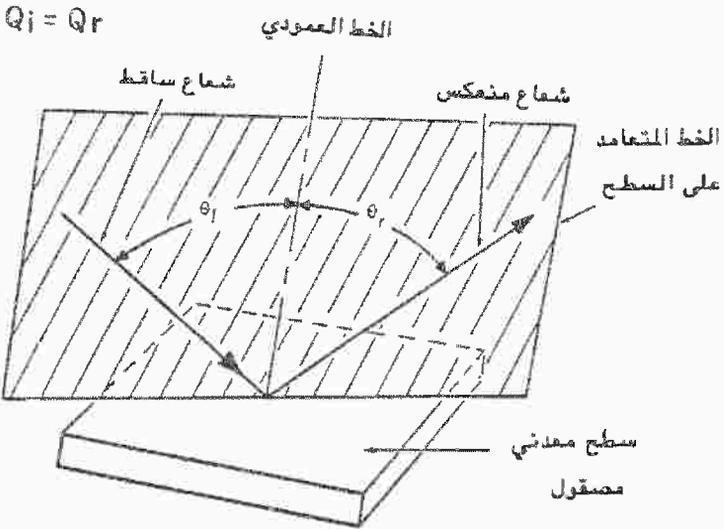
نرى في الشكل (٣-٦) شعاع ساقط وآخر منعكس وعند إلتقاء الشعاع بالسطح العاكس يوجد خط متعامد على السطح العاكس وفي هذا الشكل نرى أن زاوية السقوط، وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والخط العمودي تساوي زاوية الانعكاس ، وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والخط العمودي .

كما أن الشعاع الساقط والشعاع المنعكس والعمود على السطح العاكس تقع جميعاً في مستوى واحد عمودي على السطح العاكس .



الشكل (٥-٣) انعكاس من سطح خشن

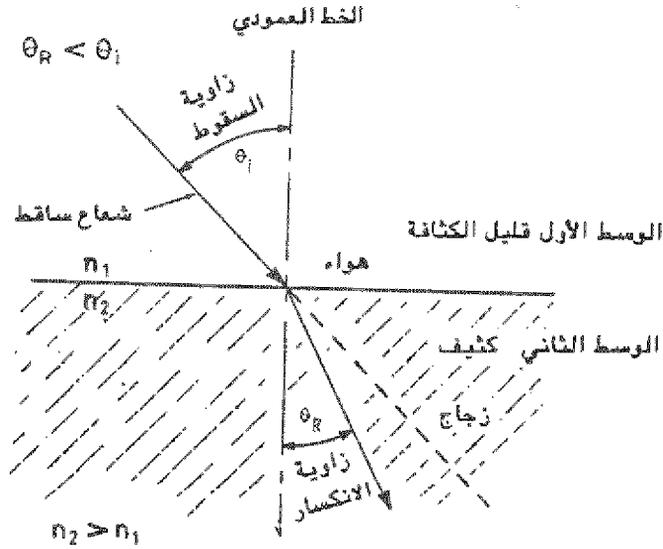
الشكل (٤-٣) انعكاس من سطح ناعم



الشكل (٦-٣) الأشعة المنعكسة

٤-٣ انكسار الضوء • Refraction of Light

إذا مر شعاع من وسط شفاف متجانس إلى آخر فإن هذا الضوء سينكسر عند السطح الفاصل بين الوسطين ولا بد من الإشارة هنا إلى أن بعض الضوء سينعكس ولكن لن نقوم بمناقشة ذلك في هذا البند وسنركز على الضوء الذي يخترق الوسط الثاني ونرى في الشكل (٧-٣) الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والمخط المتعامد على السطح الفاصل بين الوسطين عند نقطة التقاء الضوء بالسطح الفاصل بينهما .



الشكل (٧-٣) الشعاع المنكسر في الزجاج

ونلاحظ في حالة الانكسار ما يلي :

- ١ - النسبة بين جيب زاوية السقوط $\sin \theta_i$ (الزاوية بين الشعاع الساقط والعمود على سطح الانفصال عند نقطة السقوط) ، وجيب زاوية الانكسار $\sin \theta_r$ (الزاوية بين الشعاع المنكسر والعمود على السطح الفاصل عند نقطة السقوط) ثابتة للوسطين أيضاً كانت زاوية السقوط ويعبر عن هذه العلاقة بالمعادلة التالية :

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (3.8)$$

وتسمى هذه العلاقة بقانون سنل Snell وتقتل n_1 معامل انكسار الوسط الأول و n_2 معامل انكسار الوسط الثاني ، ويوضح الجدول رقم (٣-٢) معامل انكسار بعض المواد .

معامل الانكسار	المادة
1	هواء
1	ثاني أكسيد الكربون
1.36	كحول الإيثيل
1.33	ماء
1.46	سيليكا منصهرة
1.5	زجاج
1.59	بوليمستيرين
3.5	سيليكون
4	جرمانيوم
1.8	ياقوت أزرق
1.6	الكالسيت (كربونات الكالسيوم المتبلورة)
1.54	كلورايد الصوديوم
1.38	فلورايد المغنيزيوم
2.3	كبريتيد الزنك
3.35	زرنبخ الجاليوم
3.6	زرنبخ جاليوم الألومنيوم

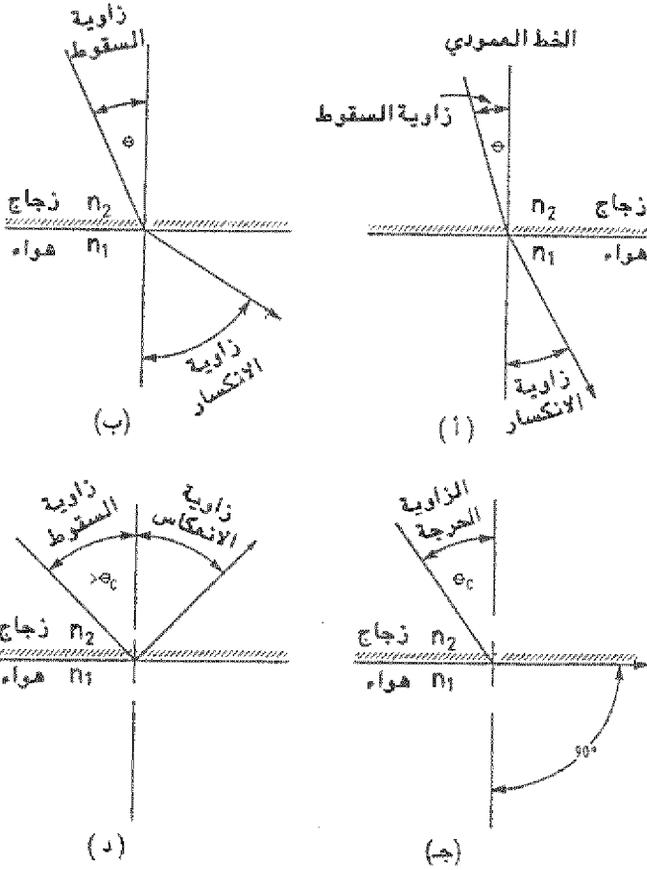
الجدول (٣ - ٢) معامل انكسار أوساط مختلفة

٢ - الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والعمود على السطح الفاصل بين الوسطين عند نقطة السقوط تقع جميعاً في مستوى واحد عمودي على السطح الفاصل .

عندما لمحدثنا عن الانكسار افترضنا أن الضوء يتجه من وسط معين إلى وسط أكثر كثافة منه ويمكن للضوء أن يتجه من الوسط الكثيف إلى وسط أقل كثافة إذ يمكننا أن نستخدم العلاقة (3.8) طالما أن الأشعة الساقطة ترمز إلى الوسط الأقل كثافة والأشعة المنكسرة إلى الوسط الأكثر كثافة .

لنفرض أن شعاعاً ضوئياً اتجه من وسط كثيف أي بمعامل انكسار عال إلى وسط أقل كثافة أي أن معامل انكساره أقل فإن هذا الشعاع لن ينكسر إذا سقط على السطح الفاصل بين الوسطين إذا كانت زاوية السقوط تساوي أو أكبر من زاوية معينة تسمى الزاوية الحرجة critical angle وبدلاً من ذلك فإنه سينعكس عند السطح الفاصل بين الوسطين وتسمى تلك بظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي $\text{total internal reflection}$. حيث أن الشعاع الساقط على السطح الفاصل بين الوسطين قادم من وسط كثيف إلى وسط أقل كثافة فإن زاوية الانكسار ستزداد، أي أن الشعاع المنكسر سيبعد عن الخط العمودي على السطح الفاصل كما هو في الشكل (٣-٨ أ) .

وكلما زادت زاوية السقوط ، فإن الشعاع المنكسر سيقترب من السطح الفاصل بين الوسطين ، الشكل (٣-٨ ب) . وعند زيادة زاوية السقوط فإن الشعاع المنكسر سيصل إلى حد يوازي فيه السطح الفاصل بين الوسطين (الشكل (٣-٨ ج) وزاوية السقوط هذه يطلق عليها الزاوية الحرجة ويرمز لها بـ θ_c عندها تكون قيمة زاوية الانكسار 90 درجة ، ولو عوضنا عن ذلك في المعادلة (3.8) نحصل على الآتي :-



الشكل (٣ - ٨) مراحل زاوية السقوط الحرجة

$$n_2 \sin \theta_i = n_1 \sin 90$$

وحيث أن $\sin 90$ يساوي واحد فإن

$$\sin \theta_i = \frac{n_1}{n_2}$$

في هذه الحالة $\theta_i = \theta_c$ إذاً

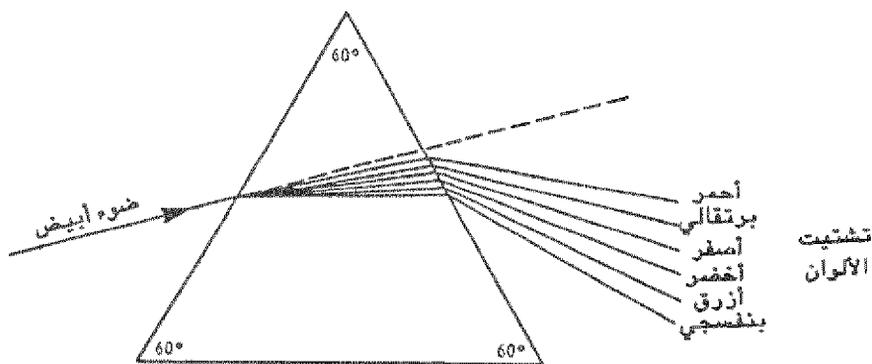
$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_2}$$

..... (3.9)

لذا فإن أي شعاع ساقط تزيد زاوية سقوطه عن الزاوية الحرجة سوف ينعكس إلى داخل الوسط عند الحد الفاصل بين الوسطين على فرض أن الشعاع الساقط متجه من الجهة الكثيفة إلى الأقل كثافة كما هو في الشكل (٣-٨ د) .

٣ - ٥ التشتيت Dispersion

عندما تحدثنا عن الهواء فرضنا أن الضوء أو شعاع الضوء مكون من طول موجة واحدة وأن سرعة هذه الموجة v في وسط معامل انكساره n تساوي $\frac{c}{n}$ ، غير أن الواقع خلاف ذلك ففي الزجاج المكون للألياف البصرية نجد أن لهذه الظاهرة شأن كبير عند انتقال الموجات الضوئية في الألياف البصرية وأبسط الأمثلة على التشتيت هو مرور شعاع ضوئي أبيض كأشعة الشمس ، مثلا ، من خلال موشور زجاجي فإننا نرى أن هذا الضوء سيتفرق إلى ألوان مختلفة يرمز كل لون إلى طول موجة معينة كما هو في الشكل رقم (٣-٩) .



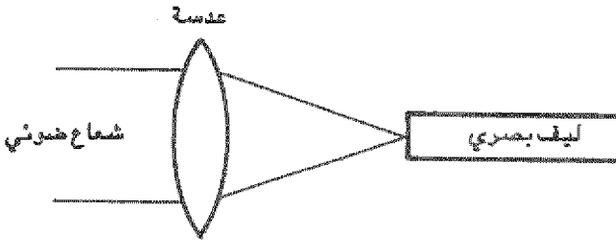
الشكل (٣-٩) تشتيت الضوء بواسطة موشور زجاجي

٣ - ٦ الانعراج Diffraction

نستخدم علم البصريات الهندسية geometrical optics أو بصريات الشعاع

ray optics لتفسير انتشار الضوء في خطوط مستقيمة وبالتالي فإنه لا يضيء إلا الأجسام التي في طريق المسار المستقيم وقد لوحظ أن اصطدام الضوء في حافة حادة كموس الحلاقة مثلاً أو مرور الضوء من خلال فتحة مستطيلة ضيقة فإن هذا الضوء سيحدد عن مسار الخط المستقيم في كلا الحالتين وسنرى أن الضوء ينتشر على جانبي الفتحة المستطيلة ويزداد الانحراف كلما ضاقت الفتحة وتسمى هذه الظاهرة بالانعراج diffraction. هناك نوعان من الانعراج أحدهما يسمى إنعراج فرسnel Fresnel diffraction وفي هذه الحالة يكون المنبع قريباً من الفتحة والشاشة التي يسقط عليها الشعاع قريبة أيضاً من الفتحة وواجهته الموجات wave fronts الساقطة على الشاشة وتلك التي تترك الفتحة ليست واجهات مستوية ، أما إذا تحرك المصدر والشاشة إلى مسافة بعيدة عن الفتحة فإن واجهات الموجات الساقطة ستكون مستوية والأشعة المصاحبة لها متوازية وتعتبر هذه الحالة خاصة من حالات انعراج فرسnel ويطلق عليها إنعراج فرانهورفر Fraunhofer diffraction . ونرى في بعض الكتب تسمية أخرى لهذين الانعراجين يطلق على انعراج فرسnel بانعراج الحقل القريب near field diffraction وانعراج فرانهورفر بانعراج الحقل البعيد far field diffraction ، ومن الظواهر الواجب دراستها في مجال الألياف البصرية هو تأثير الانعراج على تركيز وانتقال الضوء .

تتميز الألياف البصرية بصغر حجمها مما يدعونا إلى استخدام عدسة لتركيز الضوء في قلب الليفة كما في الشكل (٣-١٠) .



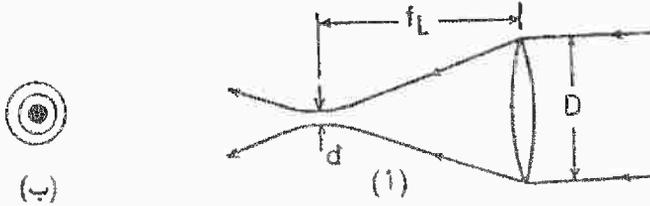
الشكل (٣-١٠) استخدام العدسة لتركيز الضوء

عند تركيز الضوء سنرى نقطة ضوئية في الوسط محاطة بحلقات ضوئية تقل شدة اضاءتها كلما ابتعدنا عن المركز وقطر النقطة المركزية .

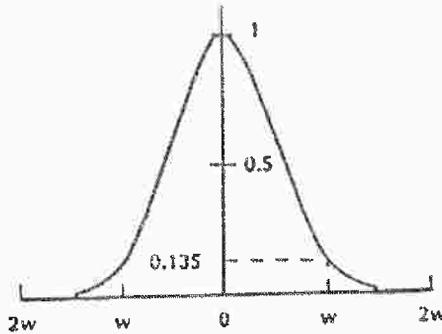
$$d = \frac{2.44 \lambda f_L}{D} \dots\dots\dots (3.10)$$

حيث أن λ هي طول الموجة ، f_L البعد البؤري للعدسة و D قطر العدسة ، والشكل (٣-١١) يوضح ذلك ، ولإعطاء القساريء الكريم فكرة عن قطر هذه النقطة لنفرض أن $f_L = 2D$ وطول الموجة يساوي $1 \mu m$ فإن قطر النقطة باستخدام المعادلة (3.10) سيساوي $4.88 \mu m$ بينما نحتاج في بعض الاستخدامات إلى تركيز الضوء لأقل من ذلك كما هو في البصريات المتكاملة Integrated Optics .

لو أخذنا مقطعاً عرضياً لضوء صادر من ليزر غازية أو ثنائي باعث للضوء لوجدنا أن توزيع شدة الضوء في هذا المقطع سيكون كما هو في الشكل (٣-١٢) .



الشكل (٣ - ١١) (أ) تمييز شعاع ضوئي حسب نظرية الانعراج (ب) توزيع الضوء في المستوى البؤري



الشكل (٣-١٢) التوزيع الجارسي لشدة الإضاءة

ويسمى هذا التوزيع بتوزيع جاوس ويعبر عنه رياضياً بالتالي :

$$I = I_0 e^{-2r^2/w^2} \quad (3.11)$$

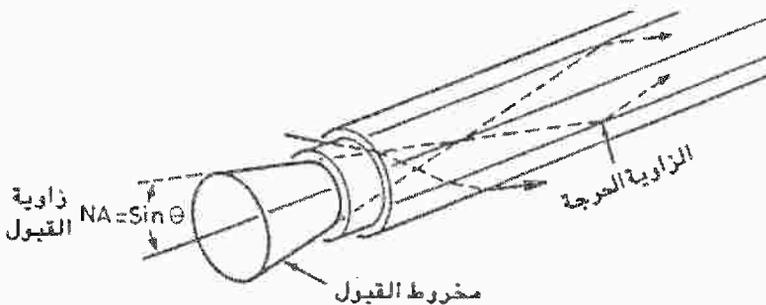
حيث أن $e = 2.718$ ، I_0 شدة الإضاءة في المركز ($r = 0$) و r هي المسافة من المركز ، ومن المتعارف عليه أن عرض نقطة شعاع الضوء من نوع جاوس w هي عندما تصبح شدة الضوء $\frac{1}{e^2}$ من شدته في المركز ونصف القطر هذا يعطينا حجم نقطة الضوء .

٣ - ٧ فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture

تستخدم العدسات في نظم الاتصالات البصرية لتجميع الضوء وتركيزه لنقوم بإصاله إلى ليفة بصرية أو إلى كاشف ضوئي وفي مجموعهما نحصل على نظام تجميع جيد للضوء وتستخدم لهذا الغرض تسمية فتحة النفوذ العددية للتعبير عن قدرة أي نظام بصري لتجميع الضوء بما فيها الألياف البصرية وتستخدم لهذا الغرض المعادلة التالية :

$$\text{Numerical Aperture NA} = n_0 \sin \theta \quad (3.12)$$

حيث تمثل n_0 معامل انكسار الوسط الفاصل بين العدسة وكاشف الضوء في حالة استخدام كاشف ضوئي أو ليفة بصرية كما هو في الشكل (٣ - ١٣) والزاوية θ هي زاوية القبول القصوى maximum acceptance angle



الشكل (٣-١٣) مخروط وزاوية القبول

عندما يكون الهواء هو الوسط الفاصل بين العدسة والليفة البصرية أو الكاشف

الضوئي فإن :

$$NA = \sin \theta \dots\dots\dots (3.13)$$

وزاوية القبول θ لها علاقة بقطر الكاشف الضوئي أو الليفة البصرية d وبالبعد البؤري f_L

$$\tan \theta = \frac{d}{2f_L}$$

في حالة استعمال عدسة حيث أن

ويمكن التعبير عن θ بالمعادلة التالية :

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}}$$

حيث أن n_1 معامل انكسار اللب و n_2 معامل انكسار الكساء .

٣ - ٨ الاستقطاب Polarization

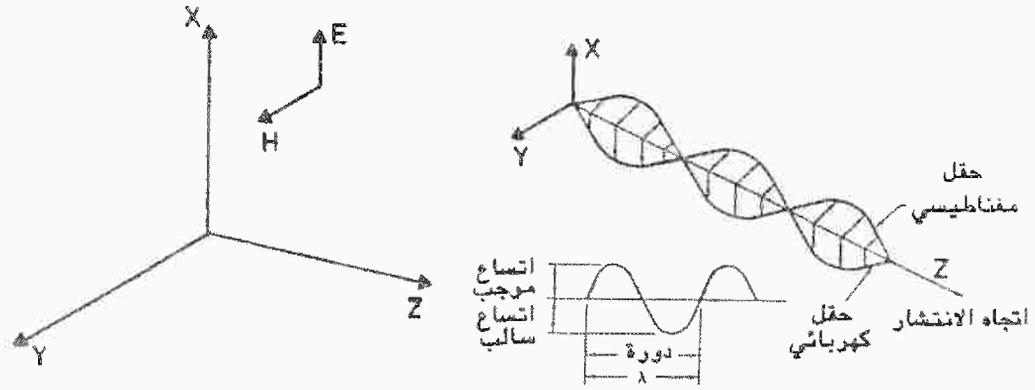
يتكون الضوء حسب نظرية ماكسويل من موجات كهرومغناطيسية . تتعامد فيها مركبات الحقل الكهربائي مع الحقل المغناطيسي ونرى في الشكل (٣-١٤) علاقة مركبة الحقل الكهربائي electric field vector مع اتجاه حركة الموجة حيث أن الموجة تتحرك باتجاه Z وحركة الحقل الكهربائي باتجاه X ويطلق على مثل هذا المجال بأن استقطابه خطي إذ أنه يشير دائماً إلى اتجاه واحد .

ونرى دائماً أن اتجاه مركبة الحقل متعامد دائماً على حركة اتجاه الموجة إذا كان الوسط غير محاط unbounded medium وكما في الشكل (٣-١٤) فإن اتجاه E قد يكون باتجاه y مادام متعامداً على اتجاه حركة الموجة ويعتمد الاستقطاب على نوعية مصدر الضوء وبإمكان أكثر من موجة أن تسلك نفس السلوك في آن واحد وكل منها له استقطاب خاص بها ويطلق على كل موجة بأنها نمط mode .

يطلق على الموجة التي تتحرك فيها مركبة المجال في أي اتجاه بأنها موجة غير مستقطبة unpolarized wave وتمثل تلك الحالة معظم الموجات التي تمر خلال الألياف

البصرية.

وفي الألياف البصرية يمكن لعدة أنماط modes أن تسير خلالها وتلعب هذه الأنماط دوراً كبيراً عند تصميم نظم الاتصالات البصرية .



الشكل (٣-١٤) موجة تسير باتجاه Z ومركبة الحقل الكهربائي باتجاه X

٣ - ٩ الخلاصة Summary

قدمنا في هذا الفصل المبادئ الأساسية للموجات الضوئية . وبدأنا بشرح للنظريات التي تفسر ماهية الضوء وتصرف الضوء تحت ظروف مختلفة ، وأشرنا إلى القوانين التي تفسر هذا التصرف ، ورأينا أن موقع الموجات الضوئية يقع ضمن نطاق طيف واسع وهو الطيف الكهرومغناطيسي . بعد ذلك تم شرح مفاهيم الانعكاس والانكسار والانعراج والتشتيت وعلاقتها بمعامل الانكسار والطول الموجي وزوايا السقوط والانعكاس أو الانكسار ثم تطرقنا إلى فتحة النفوذ العددية وأهميتها في نظم الاتصالات بالإضافة إلى تقييم موجز عن استقطاب الموجات الضوئية .

الفصل الثالث

اسئلة

- ١ - ماهو الضوء وماهي النظريات التي استخدمت لتفسير طبيعته ؟
- ٢ - ماهو الفوتون وماهي الظاهرة الطبيعية التي تفسر بنظرية الفوتونات؟
- ٣ - إذا تضاعف التردد في الفراغ الحر ماذا سيحصل للطول الموجي؟
- ٤ - هل سرعة الضوء في الماء أكثر من سرعته في الفراغ الحر ولماذا؟
- ٥ - أين تقع الأطوال الموجية التالية في الطيف الكهرومغناطيسي
 $\lambda = 1000 \text{ km}$, $\lambda = 11 \text{ cm}$, $\lambda = .4 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,
 $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$, $\lambda = 10^{-11} \text{ m}$, $\lambda = 1 \text{ cm}$
- ٦ - ما الفرق بين الإنكسار والانعكاس ؟
- ٧ - ما الفرق بين الإنكسار والانعراج ؟

مسائل

- ١ - أوجد سرعة الضوء في المواد التالية :
 - أ - ماء $n = 1.33$
 - ب - سيليكات $n = 1.46$
 - ج - سليكون $n = 3.5$
 - د - ياقوت أزرق $n = 1.8$
- ٢ - احسب الزمن اللازم لوصول الضوء إلى نهاية ليف مصنوع من السيليكات طوله 500m ؟
- ٣ - أوجد الزمن اللازم لذهاب وعودة شعاع ضوئي إلى ساتل على إرتفاع 50km إذا كان الجو ملوثاً للخمسة كيلومترات الأولى فوق سطح الأرض ومعامل الانكسار

$n = 1.015$ أما المسافة بعد 5km فهي فراغ ؟

٤ - احسب طاقة الفوتون عند $\lambda = 0.5\mu\text{m}$, $\lambda = 0.82\mu\text{m}$, $\lambda = 13\mu\text{m}$, $\lambda = 155\mu\text{m}$ ؟

أيهما يملك طاقة أكبر فوتون الأشعة المرئية أم فوتون فوق البنفسجية ؟

٥ - احسب عدد الفوتونات التي تصل كل ثانية إلى مستقبل إذا كانت القدرة 5 mw عند

$$\lambda = 0.82\mu\text{m}$$

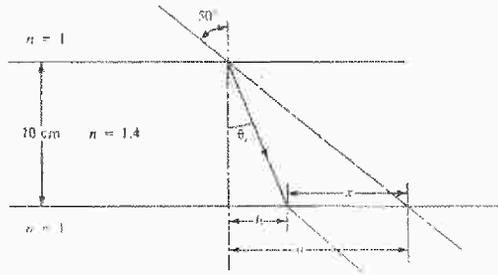
٦ - ارسم منحنى للعلاقة بين زاوية القبول وفتحة النفوذ العددية NA للمدى

$0.1 < NA \leq 0.8$. افرض أن معامل انكسار الوسط الفاصل بين المنبع والليف

$$n_0 = 1$$

٧ - يمر الضوء في الشكل (٣-١٥) خلال لوح زجاجي . أوجد مقدار انحراف

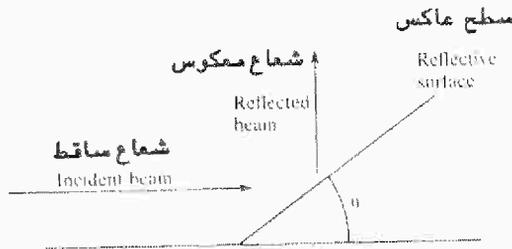
الضوء X ؟



الشكل (٣-١٥)

A - ماهي الزاوية θ التي يكون فيها الضوء المنعكس عمودي على الضوء الساقط في

الشكل (٣-١٦) .



الشكل (٣-١٦)

- ٩ - احسب حجم البقعة المباشرة لمجموعة ضوئية متوازية تسقط على عدسة قطرها 15mm وبعدها البؤري 25mm إذا كان الطول الموجي $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ؟
- ١٠ - ارسم منحنى بياني لشدة شعاع جاوس مقابل البعد عن المحور إذا كان حجم البقعة الجاوسية 1mm ؟