الباب الثالث

الانكسار عند السطوح المستوية والسطوح الكرية وخلال العدسات

٤١ — قانونا الانكسار

اذا وقعت أشعة الضوء المستقيمة من وسط شفاف كالهواء مثلا الى وسط آخر شفاف كالماء أو الزجاج مثلا فان أشعته فى الوسط الثانى وان كانت خطوطاً مستقيمة لا تكون فى سمت أشعته فى الوسط الاول بل تنعطف عند السطح الفاصل بين الوسطين وانعطافها هذا يسمى انكساراً

وكما فى الانعكاس يسمى الشعاع الواقع على السطح الفاصل بين الوسطين الشعاع الساقط ويطلق لفظ العمود على العمود المقام على السطح من نقطة السقوط وتسمى الزاوية بين الشعاع الساقط والعمود زاوية السقوط أما الشعاع النافذ فى الوسط الثانى فيسمى الشعاع المنكسر والزاوية بينه وبين العمود فتسمى زاوية الانكسار

وينقاد انكسار الضوء الى قانونين ينص الاول على أن الشعاع الساقط والعمود والشعاع المنكسر فى مستوى واحد

وينص القانون الثانى على أن نسبة جيب زاوية السقوط الى جيب زاوية الانكسار لشعاع من ضوء ذى لون واحد، واحدة لكل وسطين. وسنرجىء التعرض الى علاقة هذه النسبة بلون الأشعة الى مواضع أخرى من هذا الكتاب

وظاهرة الانكسار كانت معروفة من قديم الزمان وقد حاول عبثاً كثير من الاقدمين الكشف عن علاقة زاوية السقوط بزاوية الانكسار وأول من كشف العلاقة الصحيحة بين الزاويتين « سنل »[1] اذ اهتدى سنة ١٦٢١ الى معرفة أن نسبة قاطع التمام لزاوية السقوط الى قاطع التمام

(١) Snell

لزاوية الانكسار ثابتة لكل وسطين وصاغ « ديكارت »[1] هذه العلاقة فى صيغتها المعروفة فى الوقت الحاضر . و يعرف القانون الثانى أحياناً بقانون « سنل » نسبة الى كاشفه

٤٢ — الاستدلال عملياً على صحة قانونى الانكسار

وتوجد تجارب ومشاهدات تبين صحة هذين القانونين فاذا أخذت كتلة من الزجاج على شكل متوازى مستطيلات ووضعت على قطعة من الورق الابيض قد بسطت على لوح أفقى من الخشب وكان عند منتصف أحد جوانبها الرأسية خط رأسى قد رسم بقلم شمعى[2] (أو كان به خدش رأسى خدش بسن من الماس) أمكن بالنظر الى الجانب الموازى رؤية الخط أو الخدش وتحديد خط البصر بدبوسين رأسيين . فاذا عينت على الورقة جوانب متوازى المستطيلات بقلم من الرصاص وعين موضع الخط أو الخدش و وصل سما الدبوسين بمستقيم ومد حتى يتقابل والمستقيم الذى يعين جانب متوازى المستطيلات فى نقطة و وصلت هـذه النقطة بموضع الخط أو الخدش المذكور كان المستقيم الاخير هذا بمثابة مسير شعاع ساقط داخل متوازى المستطيلات والمستقيم الواصل بين سمى الدبوسين بمثابة الشعاع المنكسر . فاذا رسم العمود على السطح عند نقطة السقوط أمكن قياس زاويتى السقوط والانكسار واستخراج جيب كل واحدة منهما من الجداول ثم ايجاد النسبة بين الجيبين . أو اذا ركز عند نقطة السقوط وأخذ بعدان متساويان أحدهما على الشعاع الساقط والآخر على المنكسر و رسم من نهايتيهما عمودان على العمود المرسوم على السطح عند نقطة السقوط كانت النسبة بين طولى هذين العمودين مساوية النسبة بين جيبى الزاويتين

فاذا أعيدت التجربة عدة مرات بحيث تكون زاوية السقوط فى كل مرة مختلفة وكرر العمل السابق أمكن التحقق من أن النسبة بين جيبى الزاويتين ثابتة للوسطين الهواء والزجاج وفى هـذا دليل على صحة قانون « سنل »

وانّ رسم الشعاعين الساقط والمنكسر وكذلك العمود فى مستوى الورقة يتضمن معنى القانون الاول . و يمكن التحقق من صحة هذا القانون اذا اختير الدبوسان فى التجربة السابقة متساوى

---

(١) Descarte (٢) توجد اقلام شمعية خاصة يكتب بها على الزجاج

الطولين ، ووضعت على الخط الرأسى المرسوم أو المخدوش على جانب متوازى المستطيلات علامة أو نقطة ارتفاعها فوق مستوى الورقة الافقية كارتفاع الدبوسين اللذين يحددان خط البصر فانه يلاحظ عند اجراء التجربة أن رأسى الدبوسين وصورة هذه العلامة تقع جميعها فى مستوى أفقى واحد

ومن أبسط الطرق للتحقق من صحة قانون سنل استخدام القرص الضوئى الذى سبق ذكره فى بند (١٥) فى الانعكاس فيوضع عند منتصفه كتلة من الزجاج على شكل نصف اسطوانة يمر محورها بمركز القرص وينطبق سطحها المستوى على المستقيم الواصل بين علامتى درجة التسعين . وتصوب حزمة ضيقة من أشعة الشمس مثلا بحيث تسقط على هذا السطح عند مركز القرص فتنكسر الحزمة خلال كتلة الزجاج حتى اذا بلغت سطحها المستدير وقعت عليه على امتداد نصف القطر فتكون زاوية سقوطها صفراً وزاوية انكسارها صفراً فتنفذ من السطح المستدير الى الخارج على امتداد مسيرها داخل الزجاج فيتسنى بسهولة قياس زاوية الانكسار (حيث تكون هى الزاوية الواقعة بين اتجاه الاشعة الخارجة من السطح المستدير وبين العمود) المقابلة لزاوية السقوط ويتسنى بادارة القرص تغيير قيمتيهما ثم التحقق بأن النسبة بين جيبى الزاويتين ثابتة

ويجدر بنا أن نذكر هنا أن أكبر الادلة على صحة قانونى الانكسار (كما هو الحال بالنسبة الى قانونى الانعكاس) ان كل ما يستنبط منهما يتفق ونتائج التجارب والمشاهدات العملية

٤٣ — معامل الانكسار

وتسمى نسبة جيب زاوية السقوط فى أحد الوسطين الى جيب زاوية الانكسار فى الوسط الثانى معامل انكسار الضوء من الأول الى الثانى فاذا كان الوسط الاول هو الخلاء المجرد عن المادة وهو ما يسمى الاثير سميت النسبة معامل انكسار الضوء فى الوسط الثانى أو بالاختصار معامل انكسار هذا الوسط وكثيراً ما يعبر بمعامل انكسار المادة أو الوسط عن النسبة بين جيب زاوية السقوط فى الهواء الى جيب زاوية الانكسار فى هذا الوسط وان كانت هذه النسبة لا تساوى تماماً النسبة الاولى كما سيتضح فيما بعد فان الفرق بينهما صغير يمكن للسهولة اغفاله فى مبدأ الامر

واذا كان معامل الانكسار من أحد الوسطين الى الآخر أكبر من الواحد أى اذا كانت زاوية السقوط فى الأول أكبر من زاوية الانكسار فى الثانى قيل أن الوسط الاول أصغر كثافة ضوئية من الثانى ولذلك عند سقوط الضوء من وسط أصغر كثافة ضوئية الى آخر أكبر كثافة فان الشعاع المنكسر ينعطف أو ينحرف فى الوسط الثانى نحو العمود والعكس بالعكس . ومعنى الكثافة الضوئية هنا يختلف عن المعنى المعتاد للكثافة ويجب التمييز بينهما فمن المعلوم أن كثافة بعض الزيوت كزيت الزيتون مثلا بمعنى كتلة وحدة الحجوم أصغر من كثافة الماء فى حين أن الكثافة الضوئية له أكبر من الكثافة الضوئية للماء أى أن الشعاع الساقط فيه عند انكساره فى الماء ينحرف بعيداً عن العمود

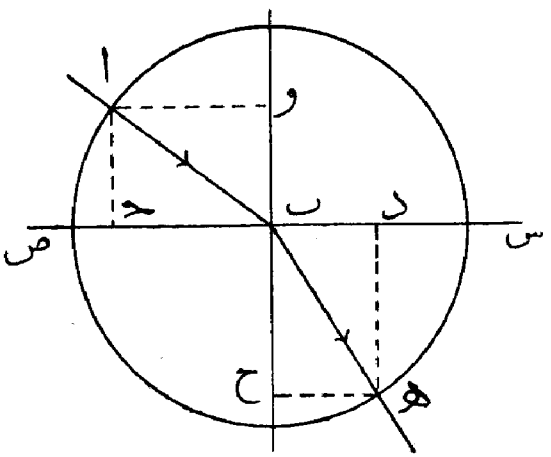
وان كانت الطرق التى يوجد بها معامل الانكسار سيأتى شرحها فيما بعد فبالجدول الآتى ذكر معامل انكسار الضوء فى بعض المواد المألوفة . ولما كان معامل الانكسار يتوقف على لون الاشعة الضوئية (وقد أشرنا الى ذلك فيما سبق) فان ما هو مدرج بالجدول هو معامل انكسار ضوء لهب الصوديوم وهو ضوء أصفر بسيط يمكن ان يعتبر ذا لون واحد

المادة	معامل الانكسار	
الزجاج	١,٤٨ — ١,٩٦	(تبعاً لاختلاف نوعه)
الثلج	١,٣١	
الماء	١,٣٣	
زيت الزيتون	١,٤٦	
الكحول الاميلى	١,٤١	
البنزين	١,٥٠	
الاثير الاثيلى	١,٣٥	
الجلسرين	١,٤٧	

٤٤ — الطريقه الهندسيه لرسم الشعاع المنكسر

اذا عرف معامل انكسار الضوء من وسط الى آخر وتعين مسير الشعاع الساقط فى أحدهما أمكن بطريقة هندسية سهلة رسم مسير الشعاع المنكسر فى الآخر

فاذا فرضنا أن ا ب (شكل ٣٣) شعاع يسقط على السطح المستوى س ص الفاصل بين الوسطين نركز عند نقطه السقوط ب ونرسم دائرة تقطع الشعاع الساقط فى نقطه ا ثم نسقط من ا العمود ا حـ على السطح ونأخذ نقطه مثل د فى الجانب الآخر من نقطه ب بحيث تكون نسبة $\frac{\text{ب حـ}}{\text{ب د}}$ مساوية معامل الانكسار من الوسط الاول الى الثانى ، ونرسم من د العمود د هـ على السطح بحيث يقطع فى الوسط الثانى محيط الدائرة فى نقطه هـ ، ثم نصل بين ب ، هـ بمستقيم يكون هو مسير الشعاع المنكسر



(شكل ٣٣)

ولاثبات هذا نرسم العمود على السطح من نقطة السقوط ونسقط عليه العمودين ا و ، هـ ح فتكون

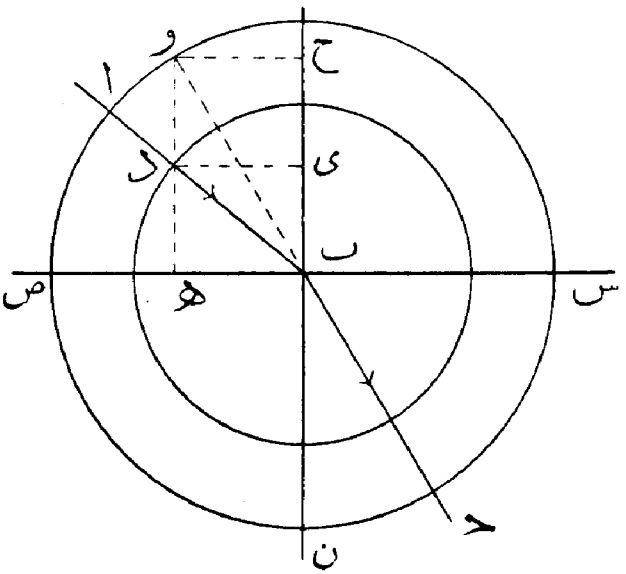
$$\frac{\text{حا}}{\text{حاهـ}} = \frac{\text{ا و}}{\text{هـ ح}} = \frac{\text{ب حـ}}{\text{ب د}}$$

ويساوى هذا معامل الانكسار من الوسط الاول الى الثانى وبما أن زاوية ا ب و زاوية السقوط تكون زاوية هـ ب ح زاوية الانكسار ويكون ب هـ مسير الشعاع المنكسر

وتوجد طرق أخرى لرسم مسير الشعاع المنكسر نكتفى منها بذكر الطريقة الآتية

لنفرض أن ا ب (شكل ٣٤) يمثل مسير الشعاع الساقط من الوسط الاول على السطح المستوى الفاصل بين الوسطين وليكن هـذا السطح س ص نركز فى نقطة السقوط ب ونرسم دائرتين متحدتى المركز والنسبة بين نصفى قطريهما مساوية معامل الانكسار ولنفرض أن الدائرة الاولى تقطع الشعاع الساقط فى نقطة ا والثانية تقطعه فى نقطة د والنسبة $\frac{\text{ب ا}}{\text{ب د}}$ مساوية معامل الانكسار من الوسط الاول الى الثانى (ولنرمز له بالحرف م) . ثم نرسم من د العمود د هـ على السطح ونمده

على استقامته حتى يقطع محيط الدائرة الاخرى فى نقطة و ونصل و ب فيكون امتداده ب ح هو الشعاع المنكسر



(شكل ٣٤)

ولاثبات هـذا نرسم العمود على على السطح من نقطة السقوط ب ونسقط من نقطتى و ، د العمودين و ح ، د ى عليه فيكون

$$\frac{\text{جا ا ب ح}}{\text{جا و ب ح}} = \frac{\frac{\text{د ى}}{\text{د ب}}}{\frac{\text{و ح}}{\text{و ب}}} = \frac{\text{و ب}}{\text{د ب}} = م$$

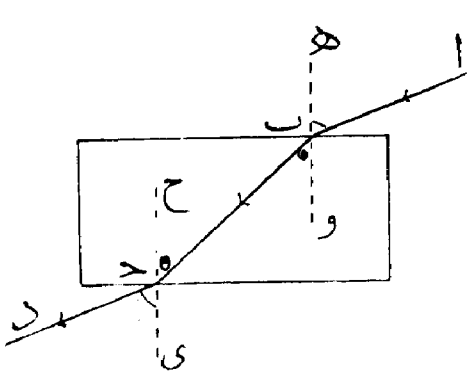
∴ زاوية و ب ح مساوية زاوية الانكسار

ولكن ∠ و ب ح = ∠ ح ب ن

∴ ب ح الشعاع المنكسر

٤٥ — الانكسار خلال وسط محدود بسطحين مستويين متوازيين

اذا وقع فى الهواء مثلا شعاع مثل ا ب (شكل ٣٥) على وسط محدود بسطحين مستويين متوازيين كمتوازى مستطيلات من الزجاج أمكن بالتجربة بيان أن الشعاع يكون مسيره عند خروجه من هذا الوسط موازياً لمسيره الأول قبل سقوطه عليه ويمكن التحقق من هذا بتعيين مسير الشعاع ا ب بدبوسين ثم النظر اليهما من الوجه المقـابل بحيث يرى الدبوسان خلال متوازى المستطيلات على استقامة واحدة وتعيين خط البصر هذا بدبوسين آخرين فيكون المستقيم الواصل بين سمى الاولين موازيا للمستقيم الواصل بين سمى الآخرين



(شكل ٣٥)

فاذا اتخذنا توازى الشعاعين ا ب ، ح د كحقيقة تستنبط عملياً بالتجربة ورسمنا عند ب العمود ه و وعند ح العمود ح ى كانت زاوية ا ب ه مساوية زاوية د ح ى ، زاوية ح ب و مساوية زاوية ب ح ح

فاذا رمزنا لمعامل الانكسار من الوسط الأول الواقع منه الضوء (الهواء مثلا) الى الثانى (الزجاج مثلا) بالرمز $م_{١٢}$ ومن الثانى الى الاول بالرمز $م_{٢١}$

فان $م_{٢١} = \frac{\text{جا} < ا ب ه}{\text{جا} < ح ب و}$

$م_{١٢} = \frac{\text{جا} < ب ح ح}{\text{جا} < د ح ى}$ ،

$\therefore م_{٢١} = \frac{١}{م_{١٢}}$

فاذا قيل مثلا أن معامل انكسار الضوء من الهواء الى الزجاج $\frac{٣}{٢}$ فان معامل انكساره من الزجاج الى الهواء يكون $\frac{٢}{٣}$

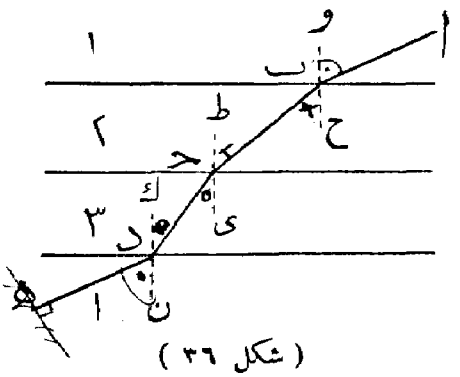
٤٦ — قاعدة قبول العكس

النتيجة التى توصلنا اليها فيما سبق توضح قاعدة عامة فى الضوء نسميها قاعدة قبول العكس فالشعاع ا ب (شكل ٣٥) يسقط فى أحد الوسطين وينكسر فى الثانى فى استقامة ب ح فاذا عكس مسيره فى هذا الوسط أى جعل بحيث يسير فى اتجاه ح ب فانه ينكسر خارجاً الى الوسط الأول فى اتجاه ب ا كما أن الشعاع ح د النافذ من الوسط المحدود بالسطحين المتوازيين اذا عكس مسيره أى جعل بحيث يسير فى اتجاه د ح فانه يتبع تماماً مسيره الاول فى الاتجاه المضاد ويخرج فى استقامة ب ا

وانطباق قاعدة قبول العكس فى الانعكاس نتيجة لازمة لقانونى الانعكاس

٤٧ — نفوذ الضوء خلال أكثر من وسطين مختلفين

اذا فرضنا أن ا ب (شكل ٣٦) شعاع يسقط فى وسط كالهواء مثلا نرمز له بالرقم ١ وينكسر فى وسط آخر كالماء مثلا نرمز له بالرقم ٢ وكان مسيره فى هذا الوسط ب ح ثم وقع هذا الشعاع على وسط كالزجاج مثلا نرمز له بالرقم ٣ وكان مسيره فيه ح د ثم نفذ من هذا الوسط الى الوسط الاول وكان مسيره فى استقامة د هـ وفرضنا أن السطوح المستوية الفاصلة بين هذه الاوساط بعضها والآخر متوازية أمكن بالتجربة كما فى بند (٤٥) بيان أن المسير ا ب مواز للمسير د هـ



(شكل ٣٦)

فاذا اتخذنا توازى المسيرين المذكورين نتيجة عملية للتجربة ورسمنا عند نقط السقوط ب ، ح ، د الاعمدة وح ، ط ى ، ك ن بالترتيب ينتج أن

الزاوية ا ب و = الزاوية هـ د ن

فاذا رمزنا لمعامل الانكسار من الوسط ١ الى الوسط ٢ بالرمز $_{٢}م_{١}$

و » » » » ٢ » » ٣ » $_{٣}م_{٢}$

و » » » » ٣ » » ١ » $_{١}م_{٣}$

يكون

$$_{٢}م_{١} = \frac{\text{جا } ا ب و}{\text{جا } ح ب ح}$$

و

$$_{٣}م_{٢} = \frac{\text{جا } ح ب ط}{\text{جا } د ح ى}$$

و

$$_{١}م_{٣} = \frac{\text{جا } ح د ك}{\text{جا } هـ د ن}$$

ولما كانت زاوية ا ب و = زاوية هـ د ن

و « حـ ب ح = « ب حـ ط

و « د حـ ى = « حـ د ك

$$\therefore \ م_{١} \times م_{٢} \times م_{٣} \times م_{١} = ١$$

فاذا عرف معامل الانكسار من وسط ما الى آخر ومن أحدهما الى وسط ثالث أمكن بتطبيق هذه المعادلة ايجاد معامل الانكسار من الثانى الى الثالث

وبمثل البرهان السابق نرى انه اذا تعددت الاوساط وكان عددها ن فان

$$م_{١} \times م_{٢} \times \ldots \times م_{ن} = ١$$

٤٨ — الزاوية الحرجة والانعكاس الكلى

اذا رمزنا لزاوية السقوط فى وسط كالهواء الحرف ب ولزاوية الانكسار فى وسط كالماء بالحرف ر ولمعامل الانكسار من الأول الى الثانى بالحرف م فان

$$م = \frac{\text{حا ب}}{\text{حا ر}}$$

فاذا كان الوسط الأول أقل كثافة ضوئية من الثانى أى كانت ب > ر فانه وان ازدادت زاوية الانكسار تبعاً لازدياد زاوية السقوط فان هذه تبلغ القائمة فى حين أن زاوية الانكسار تكون لها قيمة أصغر من القائمة تتعين من المعادلة

$$م = \frac{١}{\text{حا ر}}$$

أى تكون قيمتها حا$^{-١}$ ($\frac{١}{م}$)

وتسمى زاوية الانكسار فى هذه الحالة (أى عند ما تكون زاوية السقوط فى الوسط الأقل كثافة قائمة) تسمى « الزاوية الحرجة »[١] ويكون جيبها مساوياً لمقلوب معامل الانكسار من الوسط الأول الى الوسط الثانى

---

(١) Critical Angle

واذا كان مسير الضوء من الوسط الاكبر كثافة الى الوسط الاقل كثافة وأخذت زاوية السقوط فى الاول تزداد بالتدريج من الصفر فان زاوية الانكسار فى الثانى تزداد أيضاً تبعاً لذلك حتى اذا بلغت زاوية السقوط فى الوسط الاول قيمة الزاوية الحرجة خرج الشعاع فى الوسط الثانى وزاوية انكساره قائمة فاذا تجاوزت زاوية السقوط فى الوسط الاكبر كثافة قيمة الزاوية الحرجة لا ينفذ الشعاع الى الوسط الاقل كثافة (والا كان جيب زاوية الانكسار فيه اكبر من الواحد) وانما ينعكس عند السطح الفاصل بين الوسطين انعكاساً ينقاد لقانونى الانعكاس ويسمى « انعكاساً كلياً » [1] تمييزاً له عن الانعكاس الذى يحدث قبل أن تبلغ زاوية السقوط قيمة الزاوية الحرجة حيث ينفذ جانب كبير من الضوء الى الوسط الاقل كثافة وتميزاً له أيضاً عن الانعكاس الحاصل عند السطوح المعدنية المصقولة حيث يكون الانعكاس مصحوباً بالامتصاص او عند سطوح المواد الشفافة فى الحالات المعتادة حيث يكون مصحوباً بالانكسار

ويمكن تعيين قيمة الزاوية الحرجة اذا علم معامل الانكسار. فالزاوية الحرجة فى الماء بالنسبة الى الهواء تساوى ٤٨° ٤٥′ بالتقريب وهى فى الزجاج بالنسبة الى الهواء ٤١° ٤٥′ بالتقريب

ويترتب على أن الزاوية الحرجة فى الماء ٤٨° ٤٥′ انه اذا غمرت العين فى الماء يتراءى للرائى أن الكائنات الموجودة خارج الماء محصورة فى منطقة معينة هى مخروط رأسه عند العين ونصف زاوية رأسه تساوى الزاوية الحرجة لأن الشعاع الواصل الى العين منطبقاً على سطح هذا المخروط تكون زاوية سقوطه فى الهواء قائمة فاذا كانت لزاوية السقوط فى الهواء أية قيمة أخرى أقل من القائمة كان الشعاع المنكسر الواصل الى العين واقعاً بين محور المخروط وسطحه المنحنى

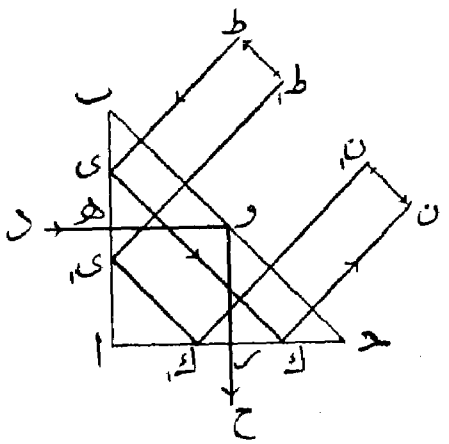
٤٩ — بعض تطبيقات الانعكاس الكلى

وللانعكاس الكلى تطبيقات عملية فعند ما يراد حرف الاشعة عن مسيرها بزاوية قائمة يؤخذ عادة منشور من الزجاج (شكل ٣٧) قائم الزاوية عند ا وكل من زاويتيه ب ، حـ نصف قائمة فاذا وقع على السطح ا ب شعاع مثل د هـ عمودياً عليه فانه ينفذ فى مادة المنشور

---

(١) Total Reflection

على استقامته الى نقطة و حيث يسقط على السطح ب حـ وزاوية سقوطه نصف قائمة وهى اكبر من الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى الهواء فينعكس عند و انعكاساً كلياً فى استقامة ور ويقع على السطح ا حـ عمودياً عليه فينفذ خارجاً فى استقامة رح وبهذه الكيفية يتسنى حرف الشعاع د و فى اتجاه وح بزاوية قائمة

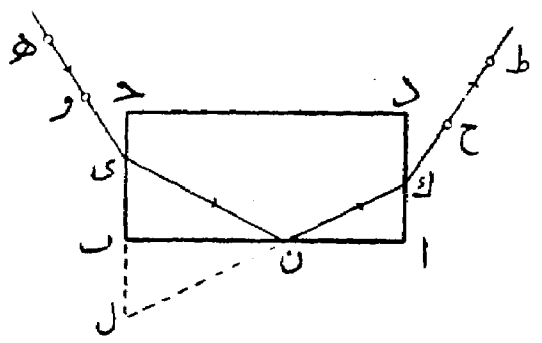


(شكل ٣٧)

وكذلك اذا أريد ان يرتد شعاع موازياً لمسيره الاول سائرا فى الاتجاه المضاد أمكن اسقاط الشعاع ، ليكن ط ى عمودياً على السطح ب حـ فينفذ فى استقامته الاولى الى نقطة ى حيث يعانى عندها انعكاسا كلياً فينعكس فى استقامة ى ك واقعاً على السطح ا حـ عند نقطة ك وينعكس لديها أيضاً انعكاساً كلياً ثانياً فيسقط على السطح ب حـ عمودياً عليه وينفذ خارجاً فى استقامة ك ن ويلاحظ هنا أن الحزمة ط ى ط، ى، تنقلب اذا انعكست بهذه الكيفية كما هو موضح بالسهمين ط، ط و ن، ن

٥٠ — تعيين مسير شعاع ينعكس انعكاساً كلياً : تعيينه بالتجربة

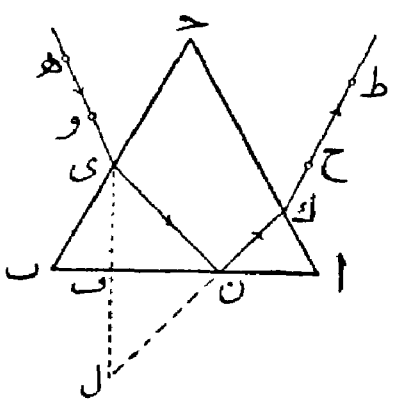
ويمكن بتجربة عملية بسيطة تعيين مسير شعاع يعانى انعكاساً كلياً داخل متوازى مستطيلات من الزجاج فاذا فرضنا أن ا ب حـ د (شكل ٣٨) يمثل متوازى مستطيلات من الزجاج موضوع على سطح ورقة مبسوطة على لوح أفقى من الخشب ورشق على الورقة دبوسان رأسيان عند هـ ، و يمثل المستقيم الواصل بينهما مسير شعاع ساقط على السطح ب حـ ثم نظر الى السطح د ا بحيث ترى صورتا الدبوسين الحادثتين بالانعكاس الداخلى عند السطح ا ب على استقامة واحدة وعين خط البصر بدبوسين آخرين عند



(شكل ٣٨)

ح و ط فالمستقيم الواصل بين سمى الدبوسين الاولين وهو ه و ى يمثل شعاعا ساقطاً على السطح ب ح وهذا ينكسر داخل متوازى المستطيلات ويسقط على السطح ا ب فينعكس ويسقط على السطح ا د ثم ينكسر عنده خارجاً الى الهواء حيث يمثل المستقيم الواصل بين سمى الدبوسين الآخرين وهو ك ح ط مسيره بعد ذلك فاذا مد ح ب الى نقطة ل بحيث يكون ب ل مساوياً ب ى ثم وصلت نقطة ل بنقطة ك وقطع المستقيم الواصل بينهما ا ب فى نقطة ن فان مسير الشعاع داخل متوازى المستطيلات يكون ى ن ك حيث يسهل بيان أن ى ن و ك ن يميلان بزاويتين متساويتين على ا ب واذن يميلان بزاويتين متساويتين على العمود المقام على السطح ا ب عند ن فيكون ى ن بمثابة الشعاع الساقط و ن ك بمثابة الشعاع المنعكس ويمكن التحقق عملياً من أن نسبة جيب الزاوية بين ه ى وبين العمود المقام على السطح ب ح عند ى الى جيب الزاوية بين هذا العمود و بين المستقيم ى ن مساوية نسبة جيب الزاوية بين ط ك والعمود المقام على السطح ا د عند ك الى جيب الزاوية بين هذا العمود وبين ن ك وتساوى هذه النسبة معامل انكسار الضوء من الهواء الى الزجاج

وبالمثل يمكن تعيين مسير شعاع ينعكس انعكاسا كلياً داخل منشور ثلاثى من الزجاج فاذا فرضنا أن ا ب ح (شكل ٣٩) يمثل منشوراً ثلاثياً قائماً موضوعاً على ورقة مبسوطة فوق لوح أفقى من الخشب ورشق دبوسان رأسيان عند ه و ونظر الى الجانب ا ح بحيث ترى صورتا الدبوسين الحادثتين بالانعكاس عند السطح ا ب تريان على استقامة واحدة وعين خط البصر بدبوسين آخرين عند ح و ط ثم مد المستقيم الواصل بين سمى ه و حتى يتقابل والسطح ب ح فى نقطة ى ومد المستقيم الواصل بين سمى ح و ط حتى يتقابل والسطح ا ح فى نقطة ك واسقط من نقطة ى العمود ى ف ل على ا ب وأخذت عليه نقطة ل بحيث يكون ى ف مساوياً ف ل ووصلت نقطة ل بنقطة ك ورمز لنقطة تقابل المستقيم ل ك والسطح ا ب بالحرف ن كان ى ن مسير الشعاع داخل المنشور



(شكل ٣٩)

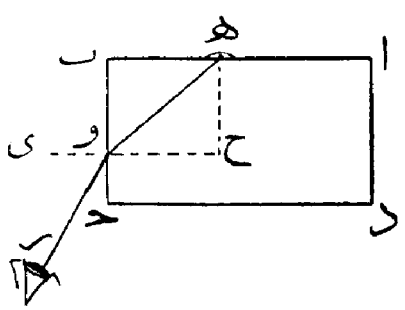
فى أثناء سقوطه على السطح ا ب ثم ن ك مسيره بعد الانعكاس عنه

ويلاحظ فى كلتى التجربتين أن زاوية سقوط الشعاع ى ن على السطح ا ب يجب أن تكون اكبر من الزاوية الحرجة لكى يحدث الانعكاس الكلى . فاذا وضع الدبوسان هـ ثم و حيثما اتفق فقد لا تكون الزاوية كذلك . ولذلك يستحسن عند اجراء التجربة تغيير موضع متوازى المستطيلات أو المنشور فى أثناء البحث عن صورتى الدبوسين حتى ترى الصورتان فى حالة متوازى المستطيلات عند النظر الى الوجه ا د (شكل ٣٨) أو فى حالة المنشور عند النظر الى الوجه ا حـ (شكل ٣٩)

٥١ — طريقة الزاوية الحرجة لايجاد معامل انكسار السائل

نفرض أن ا ب حـ د (شكل ٤٠) يمثل متوازى مستطيلات من الزجاج موضوع على صحيفة من الورق مبسوطة فوق لوح أفقى من الخشب ولنفرض عند هـ ابرة رأسية ملتصقة بالسطح ا ب من متوازى المستطيلات ولتكن الابرة مبللة بالماء (أو بالسائل المطلوب ايجاد معامل انكساره باعتبار أنه أقل كثافة ضوئية من الزجاج) بحيث تعتبر كأنها مغمورة فى قطرة من السائل

فاذا نظر الى الوجه ب حـ أمكن فى أوضاع خاصة للعين أن ترى صورة الابرة ، فمثلا اذا كان الضوء الصادر منها يقع خلال الماء على السطح ا ب فينكسر خلال الزجاج فى استقامة هـ و ثم يقع على السطح ب حـ وينكسر خارجاً الى الهواء فى استقامة و ر فانه اذا وضعت العين على امتداد هذا المستقيم امكن رؤية الصورة ولكن اذا تحركت العين من موضعها المبين بالشكل نحو الحرف ب لمتوازى المستطيلات فان هذا يترتب عليه ان الاشعة الواصلة الى العين تكون زاوية انكسارها عند خروجها من السطح ب حـ الى الهواء وهى زاوية ى و ر أصغر واذن تكون زاوية سقوطها على السطح ب حـ وهى زاوية هـ و حـ أصغر واذن



(شكل ٤٠)

تكون زاوية انكسارها عند نفوذها من القطرة الى داخل متوازى المستطيلات وهى زاوية وهـ ح اكبر ولكن نظراً لأن مادة القطرة أقل كثافة ضوئية من الزجاج فان هذه الزاوية لا يمكن أن تتجاوز نهاية عظمى معينة تكون قيمتها قيمة زاوية الانكسار فى الزجاج عند ما تكون زاوية السقوط فى القطرة قائمة وتكون هى الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى مادة القطرة . واذن يتضح أن الاستمرار فى تحريك العين نحو الحرف ب يجعلها تصل الى موضع معين تختفى عنده الصورة وتظل مختفية بعد ذلك وتكون المواضع التى ترى فيها الصورة محصورة بين هذا الموضع وامتداد السطح ب حـ من ناحية حـ فاذا فرضنا أن (شكل ٤٠) يمثل الموضع الذى عنده تبتدىء الصورة فى الاختفاء اذا تحركت العين من ناحية حـ نحو ب أو عنده تبتدىء فى الظهور اذا تحركت العين من ناحية ب نحو حـ ورمزنا لمعامل الانكسار من مادة القطرة (الماء مثلا) الى الزجاج بالرمز $م_{ك_م}$ يكون

$$م_{ك_م} = \frac{١}{\text{جا}\, د\, وهـ ح}$$

ولما كان $م_{ك_م} \times م_{ك_م} \times م_{ك_ه} = ١$

باعتبار أن $م_{ك_م}$ معامل الانكسار من الهواء الى مادة القطرة ، $م_{ك_ه}$ معامله من الزجاج الى الهواء يكون

$$م_{ك_م} = \frac{١}{م_{ك_ه}\ \text{جا}\, د\, وهـ ح}$$

فاذا قيست هذه الزاوية وعرفت قيمة $م_{ك_ه}$ أمكن ايجاد معامل الانكسار لمادة القطرة

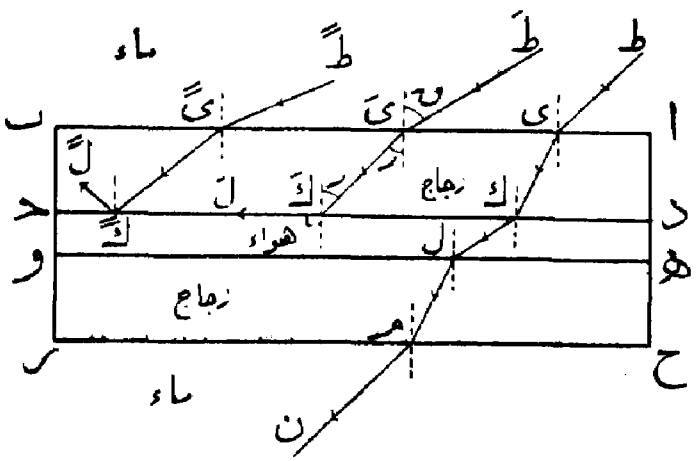
ولاجراء هـذه التجربة يوضع متوازى مستطيلات من الزجاج على صحيفة من الورق مبسوطة فوق لوح أفقى من الخشب وتحدد جوانبـه ا ب حـ د بالقلم الرصاص ثم تبلل ابرة بالسائل المراد ايجاد معامل انكساره وليكن الماء مثلا وتوضع بحيث تلتصق بالسطح ا ب وقد يكفى التوتر السطحى للسائل لجعلها تلتصق بالسطح والا فيستحسن أن تبل قطعة صغيرة من ورق النشاف أو الترشيح بالسائل ويستعان بها فى لصق الابرة بالسطح وجعلها مبتلة بالسائل فى أثناء

التجربة . ويعين موضع الابرة وليكن هـ ثم ينظر نحو الوجه ب حـ والعين قريبة من الحرف حـ لكى ترى الصورة من غير عناء وبعد ذلك تحرك العين نحو الحرف ب مع الاستمرار فى النظر الى الصورة حتى يحصل الوضع الذى تبتدىء عنده فى الاختفاء ويحدد خط البصر ر و بدبوسين ثم يوصل بين سمتيهما بمستقيم ويمد المستقيم حتى يقطع ب حـ فى نقطة و ثم يوصل بين و ، هـ ويقدر جيب الزاوية بين هذا المستقيم والعمود المقام على السطح من نقطة هـ

أما معامل الانكسار من الزجاج الى الهواء وهو المقدار جـ م هـ فيمكن ايجاده أيضاً نظراً لأن هـ و يعين مسير شعاع ساقط فى الزجاج عند ما يكون و ر مسيره عند الانكسار فى الهواء

٥٢ — طريقة « وولاستون » لايجاد معامل انكسار السائل

وهذه الطريقة أيضاً يستعان فيها بالزاوية الحرجة لايجاد معامل انكسار السائل ويستخدم فيها جهاز بسيط يسمى أحياناً « خلية وولاستون »[1] ويتركب من لوحين متوازيين من الزجاج بينهما طبقة رقيقة من الهواء وقد سدت الجوانب بمادة غير منفذة للسائل حتى لا يتسرب الى ما بين اللوحين . ويوضع هذا الجهاز فى وضع رأسى مغموراً فى اناء من الزجاج جوانبه مستوية وبه السائل . ولبيان نظرية هذه الطريقة نفرض أن ا ب حـ د (شكل ٤١) يمثل أحد اللوحين ، هـ و ر ح يمثل الآخر وبينهما حـ د هـ و طبقة من الهواء وليكن الوسط المغمورة فيه الخلية هو الماء أى ما يعلو ا ب من الشكل وما تحت ر ح منه هو الماء . فاذا سقط شعاع مثل ط ى خلال الماء على سطح الزجاج فانه ينكسر خلال اللوح الأول فى استقامة ى ك مثلا فاذا كانت زاوية سقوطه صغيرة



(شكل ٤١)

(١) « Wollaston's Cell » نسبة الى مخترع الطريقة

كانت زاوية انكساره صغيرة وتكون زاوية سقوطه على السطح حـ د صغيرة أيضاً فاذا كانت أقل من الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى الهواء خرج الشعاع ك ل الى الطبقة الهوائية فينكسر خلال اللوح الثانى وينفذ من الجانب الآخر منه فى استقامة مـ ن . ولكن اذا كبرت زاوية سقوط الشعاع ط ى بالتدريج كبرت أيضاً زاوية سقوط الشعاع ى ك حتى اذا بلغت هذه ، قيمة الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى الهواء امتنع سقوط الشعاع ك ل على سطح اللوح الثانى وامتنع بذلك نفوذ الشعاع خلال الخلية الى الجانب الآخر . ويمثل طَ ىَ كَ لَ مسير شعاع يسقط على السطح د حـ بزاوية سقوط تساوى الزاوية الحرجة حيث يكون الشعاع كَ لَ ملامساً للسطح حـ د . ويمثل طَ ىَ كً لً مسير شعاع يسقط على السطح حـ د بزاوية سقوط اكبر من الزاوية الحرجة فينعكس انعكاساً كلياً فى استقامة كً لً

فاذا رمزنا لزاوية سقوط طَ ىَ على السطح ا ب بالحرف ن ولزاوية انكساره فى الزجاج بالحرف ر ، ولمعامل الانكسار من الماء الى الزجاج بالرمز $م_{ج}$ وله من الزجاج الى الهواء بالرمز $م_{هـ}$ يكون

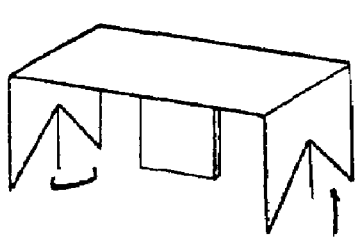
$$\frac{\text{حا ن}}{\text{حا ر}} = م_{ج} \text{ ، } \frac{\text{حا ر}}{\text{حا ٩٠}} = م_{هـ}$$

وبما أن $م_{ج} \times م_{هـ} \times م_{ه} = ١$

ينتج أن $\frac{\text{حا ن}}{\text{حا ر}} \times \text{حا ر} \times م_{ه} = ١$

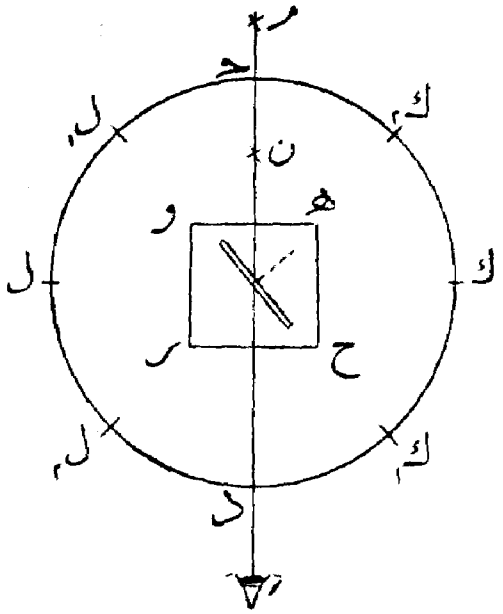
$$\therefore \quad م_{ه} = \frac{١}{\text{حا ن}}$$

ومن أبسط الطرق لتطبيق الفكرة السابقة عملياً أن تكون خلية « وولاستون » مثبتة رأسياً على حامل من الخشب كما بشكل (٤٢) به مسماران ا ، ب يقعان على امتداد الخلية. فيقاس البعد بينهما وترسم على صفحة من الورق دائرة (شكل ٤٣) قطرها



(شكل ٤٢)

يساوى هذا البعد و يرسم أحد أقطار هذه الدائرة وليكن حـ د ثم تبسط صفحة الورقة على لوح من الخشب ويؤتى بإناء من الزجاج على هيئة مكعب أجوف يملأ بالماء أو السائل الذى يراد تعيين معامل انكسار الضوء فيه ويوضع فى الوضع هـ و ر ح المبين بالشكل بحيث يكون منتصفه فى مركز الدائرة ويكون القطر حـ د عمودياً على وجهيه هـ و ، ر ح . ويؤتى بخلية وولاستون وتغمر رأسياً فى الاناء ويهيأ الحامل بحيث يكون المسماران على محيط الدائرة المرسومة وتكون الخلية موازية ما



(شكل ٤٢)

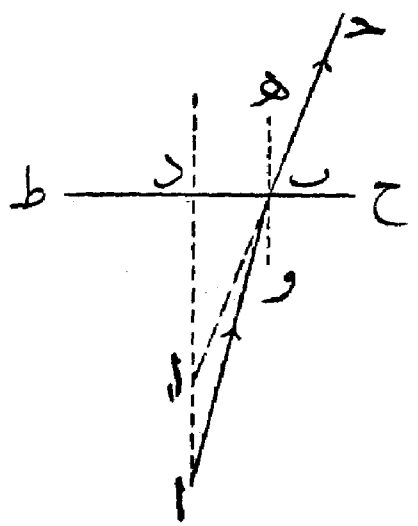
أمكن للوجهين هـ و ، ر ح فاذا كانت الخلية منطبقة على المستقيم الواصل بين مسمارى الحامل ا ، ب (شكل ٤٢) أو موازية له كان موضع المسمارين على الدائرة عند ك ، ل (شكل ٤٣) بحيث يكون القطر ك ل عمودياً على حـ د . وبعد ذلك يرشق على امتداد القطر حـ د من أحد جانبى الاناء دبوسان مـ ، ن وينظر من الجانب الآخر (عند د مثلا) بحيث يرى الدبوسان خلال الاناء فى استقامة واحدة فاذا أدير الحامل مع ملاحظة وجوب تحرك مسماريه على محيط الدائرة دارت الخلية معه وتكون الزاوية التى دار خلالها المستقيم الواصل بين المسمارين حتى يأخذ وضعاً معيناً مثل ك، ل، مساوية لزاوية سقوط الشعاع الممثل بالمستقيم الواصل بين سمى الدبوسين مـ ، ن على سطح الخلية فى الوضع المذكور. فاذا أدير الحامل مع الاستمرار فى النظر الى الدبوسين خلال الاناء بحيث يكونان على استقامة واحدة حتى يحصل الوضع الذى يختفى عنده الدبوسان ويرى مجال النظر مظلماً وحدد موضع المسمارين على الدائرة وليكن موضعهما عند ك، ، ل، فان الزاوية المحصورة بين ك، ل، وبين ك ل تكون مساوية زاوية و التى يقدر منها معامل الانكسار كما تقدم

ولتصحيح الخطأ الذى ينشأ عن عدم انطباق الخلية على المستقيم الواصل بين المسمارين

ا ٦ ب (شكل ٤٢) المثبتين على الحامل أو عدم موازاتها له يدار الحامل بعد تعيين الوضع ك١ ل١ (شكل ٤٣) فى الجهة المضادة حتى يعين الوضع ك٢ ل٢ الذى عنده أيضاً يبتدى الدبوسان فى الاختفاء فتكون الزاوية بين ك١ ل١ وبين ك٢ ل٢ مساوية ضعف زاوية ه المطلوبة

٥٣ — ايجاد موضع الصورة التى تحدث بالانكسار عند السطح المستوى

لنفرض أن نقطة مضيئة مثل ا (شكل ٤٤) موجودة فى وسط شفاف (كالماء مثلا) نرمز له بالرقم (١) وليكن ا ب شعاعاً ساقطاً منها على السطح ح ط الفاصل بين هذا الوسط ووسط آخر شفاف (كالهواء مثلا) نرمز له بالرقم (٢) وليكن ب ح مسير الشعاع بعد انكساره فى هذا الوسط ولنرمز لمعامل الانكسار من الوسط الأول الى الوسط الثانى بالحرف م١٢ فاذا رسم العمود ه و عند نقطة السقوط وأسقطنا من ا العمود ا د على السطح ومددنا الشعاع المنكسر حتى يقطع امتداده هذا العمود فى نقطة ا١ فان



(شكل ٤٤)

$$م_{12} = \frac{\text{جا} < ا ب و}{\text{جا} < ح ب ه}$$

$$= \frac{\text{جا} < ب ا د}{\text{جا} < ب ا_1 د}$$

$$= \frac{ا_1 ب}{ا ب}$$

فاذا فرضنا أن نقطة ب قريبة جداً من نقطة د أمكن اعتبار

$$ا ب = ا د$$

$$\text{و} \quad ا_1 ب = ا_1 د$$

واذن يكون

$$م_{12} = \frac{ا_1 د}{ا د}$$

واذن تكون نقطة ا, نقطة ثابتة على العمود ا د ما دامت نقط سقوط الأشعة قريبة جداً من د واذن فالأشعة المنكسرة فى الوسط (٢) اذا مدت على استقاماتها تتلاقى فى نقطة ا, متى كانت مواضع سقوطها على السطح قريبة جداً من د . فاذا نظر الى النقطة المضيئة من الوسط (٢) وكان خط البصر عمودياً على السطح ا ى وضعت العين على امتداد العمود ا د فان الأشعة المنكسرة الواقعة على العين والصادرة فى الحقيقة من ا يتراءى للناظر أنها صادرة من ا, نظراً لأن مخروط الأشعة الواقعة على العين تكون زاوية رأسه صغيرة وتكون نقط سقوط الأشعة على السطح قريبة جداً من د واذن تكون نقطة ا, هى صورة النقطة ا

واذن تكون نسبة بعد الصورة عن السطح الحادث عنده الانكسار الى بعد النقطة المضيئة عنه مساوية معامل الانكسار من الوسط الموجودة فيه النقطة المضيئة الى الوسط الذى تنفذ اليه الأشعة

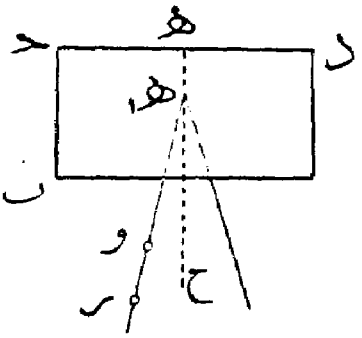
فاذا كان الوسط الموجودة فيه النقطة المضيئة أكبر كثافة ضوئية من الوسط الذى تنفذ اليه الأشعة كانت الصورة أقرب الى السطح وهذا ما يحدث اذا نظر من الهواء الى جسم مغمور فى الماء أو الى علامة موجودة داخل كتلة من الزجاج سطحها مستوى أما اذا كان الوسط الموجودة فيه النقطة أصغر كثافة كانت الصورة أبعد عن السطح وهذا ما يحدث اذا نظر والعين مغمورة فى الماء الى جسم فى الهواء

٥٤ — تعيين موضع الصورة الحادثة عن الانكسار بطريقة عملية

ويمكن بطرق عملية بسيطة تعيين موضع الصورة الحادثة بالانكسار فى حالات معينة وتحقيق النتيجة المذكورة

(الطريقة الأولى) فاذا أخذ متوازى مستطيلات من الزجاج وليكن ا ب حـ د (شكل ٤٥) ووضع على صحيفة من الورق الأبيض مبسوطة فوق لوح أفقى من الخشب وكان بأحد جوانب متوازى المستطيلات (عند ه على السطح حـ د مثلا) خط رأسى قد رسم بقلم شمعى أو خدش بسن من الماس ونظر الى هذا الخط خلال متوازى المستطيلات بحيث يكون خط

البصر منحرفاً قليلا عن العمود هـ ح وعين خط البصر بدبوسين و ى ر ثم أعيد هذا والعين فى الجانب الآخر من العمود هـ ح فان المستقيم الواصل بين سمى الدبوسين فى كل يمثل مسير شعاع منكسر نقطة سقوطه قريبة من نقطة تقابل العمود هـ ح والسطح ا ب الحادث عنده الانكسار . واذن يكون موضع تقابل امتدادى هذين المستقيمين وهى نقطة هـ، موضع صورة هـ

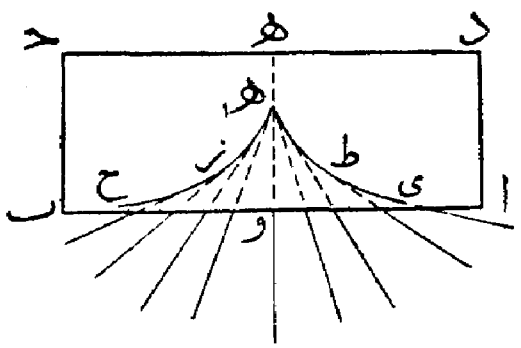


(شكل ٤٥)

(الطريقة الثانية) ويمكن تطبيق طريقة انطباق المواضع التى سبق شرحها فى الانعكاس . فاذا أخذ متوازى المستطيلات السابق ونظر الى الخط الرأسى عند هـ خلاله وعلى امتداد العمود هـ ح أمكن بتحريك دبوس رأسى فوق السطح الأفقى الأعلى لمتوازى المستطيلات الحصول على موضع يرى فيه هذا الدبوس وصورة الخط الرأسى على استقامة واحدة بحيث اذا ازيحت العين قليلا نحو اليمين أو الشمال لا يزالان يظهران على استقامة واحدة فيعين موضع الدبوس موضع الصورة الحادثة بالانكسار . ويمكن فى هذه التجربة أن تجعل صورة الدبوس الرأسى وهى الحادثة بالانعكاس عند السطح الأفقى الأعلى لمتوازى المستطيلات منطبقة على صورة الخط الرأسى وأصلح من هذا وذاك أن يحرك الدبوس وهو فى وضع رأسى على سطح الورقة أمام السطح ا ب لمتوازى المستطيلات وينظر الى صورة الدبوس الحادثة بالانعكاس عند هذا السطح والى صورة الخط الرأسى بحيث يكاد يكون خط البصر عمودياً على السطح ا ب ثم يعين موضع الدبوس عند ما تظهر صورته منطبقة على صورة الخط الرأسى وتبقى الصورتان منطبقتين اذا ما تحركت العين قليلا نحو اليمين أو الشمال . فيكون موضع صورة الدبوس على امتداد العمود المرسوم من موضع الدبوس وعلى بعد عن السطح ا ب يساوى بعد الدبوس عنه ويكون موضع هذه الصورة هو موضع صورة الخط الرأسى وهى الحادثة بالانكسار

٥٥ — غلاف الأشعة المنكسرة

اذا فرضنا أن نقطة ه (شكل ٤٦) تمثل علامة كخط رأسى على أحد الجوانب الرأسية لمتوازى مستطيلات ا ب حـ د ورسمت مسيرات أشعة ساقطة من ه بزوايا مختلفة داخل متوازى المستطيلات ثم عينت مسيراتها بعد انكسارها خارجة الى الهواء (سواء اكان ذلك بطريقة الرسم أو بوسيلة عملية كالنظر الى صورة الخط الرأسى المرسوم عند ه والعين فى مواضع مختلفة وتعيين خط البصر فى كل حالة بدبوسين يمثل المستقيم الواصل بين سميهما الشعاع المنكسر) فانه يرى أن امتدادات الأشعة المنكسرة لا تتلاقى جميعها فى نقطة واحدة ولكنها تمس خطاً منحنياً يسمى المنحنى الغلافى للاشعة المنكسرة وهو كالخط المنحنى ى ط ه١ ر ح المبين بالشكل



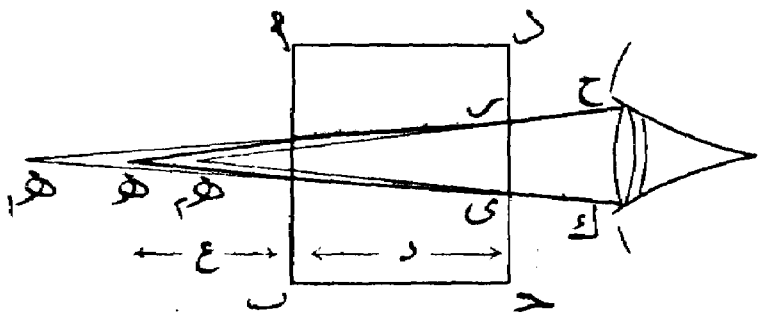
(شكل ٤٦)

وان كانت امتدادات الأشعة المنكسرة تمس المنحنى الغلافى فانه اذا روعيت حزمة ضيقة منها أمكن اعتبارها متقابلة فى نقطة على هذا المنحنى لذلك تكون نقطة ه١ وهى رأس المنحنى الغلافى واقعة على العمود ه و بحيث يكون $\frac{\text{ه}_1\text{و}}{\text{ه و}}$ مساوياً معامل الانكسار من الوسط الأول الى الثانى لأنه يمكن اعتبارها موضع تقابل امتدادات الأشعة المنكسرة التى تكون نقط سقوطها قريبة جداً من نقطة و . كذلك اذا نظر الى النقطة ه من خارج السطح ا ب فان الحزمة الضيقة الواصلة الى العين أياً كان موضعها يمكن اعتبار امتداداتها متقابلة فى نقطة على المنحنى الغلافى واذا أخذت العين تتحرك فى مستوى الورقة رويدا رويدا بعيدا عن العمود ه و فان الصورة التى تراها تتحرك تبعاً لذلك على المنحنى الغلافى حتى اذا كادت العين تبلغ مستوى السطح ا ب كادت الصورة تكون واقعة عليه فموضع الصورة التى تراها العين يتغير تبعاً لتغير زاوية سقوط الأشعة الواقعة من النقطة التى نعتبرها جسما

٥٦ — موضع الصورة الحادثة اذا نظر الى المرئى خلال لوح من مادة شفافة

نفرض أن ا ب حـ د (شكل ٤٧) لوح من مادة شفافة (كالزجاج مثلا) يحول بين نقطة مضيئة هـ نعتبرها جسما وبين العين ولنفرض أن خط البصر عمودى على اللوح ولنرمز لبعد النقطة عن السطح ا ب بالحرف ع ولسمك اللوح بالحرف ء ولمعامل الانكسار من الوسط الموجودة فيه النقطة (الهواء مثلا) الى مادة اللوح بالحرف م

فالأشعة التى تكاد تسقط من هـ عمودية على السطح ا ب تنكسر خلال اللوح كأنها صادرة من النقطة هـ١ على امتداد العمود الواقع من هـ على السطح ا ب وعلى بعد من هذا السطح يساوى م ع واذن الأشعة التى تكاد تقع داخل اللوح عموديا على السطح د حـ تكون كأنها صادرة من هـ١ واذن يمكن



(شكل ٤٧)

بالنسبة الى الانكسار الثانى الذى يحدث عند السطح حـ د أن نعتبر نقطة هـ١ كأنها جسم ويكون بعده عن السطح حـ د مساوياً م ع + ء ولما كانت الأشعة التى تنكسر خارجة من اللوح وتقع على العين هى التى نقط سقوطها قريبة جداً من العمود الذى تقع العين على امتداده فان امتدادات هذه الاشعة المنكسرة تتقابل فى نقطة هـ٢ تكون بمثابة صورة للنقطة هـ١ ويكون بعدها عن السطح حـ د مساوياً

$$\frac{١}{م} (م ع + ء)$$

ويكون بعدها عن السطح ا ب مساوياً

$$\frac{١}{م} (م ع + ء) - ء = ع - ء (١ - \frac{١}{م})$$

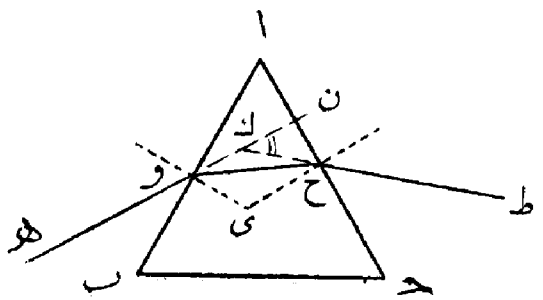
واذن يكون البعد بين موضع الصورة هـ٢ التى ترى خلال اللوح وبين الموضع الحقيقى للنقطة المضيئة هـ مساوياً $ء (١ - \frac{١}{م})$

ويتبين من هذا أن تأثير توسط لوح سميك من الزجاج مثلا بين العين والمرئى أن يظهر المرئى أقرب من الحقيقة

٥٧ — الانحراف الحادث عن الانكسار خلال المنشور الثلاثى

تبين فيما سبق (بند ٤٥) أنه اذا اخترق شعاع من الضوء وسطاً محدوداً بسطحين مستويين متوازيين فان مسيره بعد نفوذه منه يوازى مسيره الاول قبل وقوعه عليه فالشعاع الذى ينفذ فى هذه الحالة وان عانى ازاحة جانبية تقاس بالبعد العمودى بين المسيرين فانه لا يعانى انحرافاً عن مسيره الأول

ولكن اذا فرضنا أن ا ب ح (شكل ٤٨) يمثل مقطعاً أفقياً لمنشور ثلاثى من الزجاج مثلا وسقط على ا ب شعاع مثل هـ و فانكسر داخل المنشور فى استقامة و ح حتى اذا بلغ السطح ا ح انكسر خارجاً من المنشور فى استقامة ح ط فان الشعاع عند نفوذه فى المنشور ينحرف عن مسيره الاول بمقدار الزاوية الواقعة بين امتداد المستقيم هـ و وبين امتداد المستقيم ط ح وهى زاوية ن ك ط وتسمى زاوية الانحراف



(شكل ٤٨)

ويمكن تعيين مسير مثل هذا الشعاع هندسياً بتطبيق احدى الطرق لرسم الشعاع المنكسر أولا عند سقوط الشعاع هـ و على السطح ا ب ثم عند سقوط هذا الشعاع المنكسر على السطح ا ح وانكساره الى الخارج .

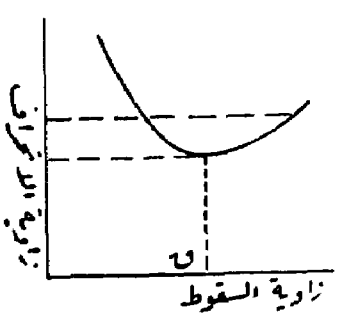
كذلك يمكن تعيين مسيره عملياً فيوضع منشور ثلاثى من الزجاج على صحيفة أفقية من الورق فى وضع قائم بحيث يكون ا ب ح (شكل ٤٨) ممثلا لحدوده على الورقة ثم يوضع دبوسان يمثل المستقيم الواصل بين سميهما شعاعاً ساقطاً على السطح ا ب وليكن هـ و ثم ينظر الى السطح ا ح فى وضع يرى فيه الدبوسان خلال المنشور فى استقامة واحدة ويعين خط البصر

ح ط بدبوسين آخرين فاذا وصل سما الاولين بمستقيم ومد حتى يقطع ا ب فى نقطة و ثم وصل سما الآخرين بمستقيم ومد حتى يقطع ا ح فى نقطة ح كان المستقيم الواصل بين و ، ح مسير الشعاع داخل المنشور

والسطحان اللذان يمثلان فى الشكل بالمستقيمين ا ب ، ا ح ويحدث عندهما الانكسار هما وجهان مستطيلان من الوجوه المستطيلة الثلاثة للمنشور الثلاثى القائم ويسميان الوجهين الحارفين والمستقيم الحادث من تلاقيهما والذى مقطعه فى الشكل نقطة ا يسمى الحرف الحارف للمنشور والزاوية المحصورة بين الوجهين الحارفين تسمى زاوية المنشور . ويلاحظ من الشكل أن الشعاع الذى ينفذ خلال المنشور منكسراً مرتين يقبل عند سقوطه على أحد الوجهين نحو الحرف الحارف اما عند خروجه من الوجه الآخر فيبتعد عن الحرف الحارف ، يجب ملاحظة ذلك عند اجراء تجربة الدبابيس لتعيين مسير الشعاع فيوضع الدبوسان اللذان يعينان الشعاع هـ و بحيث يميل المستقيم الواصل بين سميهما بالكيفية المبينة فى الشكل ثم ينظر الى السطح ا ح والبصر موجه الى ناحية الحرف الحارف ا حتى يرى الدبوسان فى استقامة واحدة

٥٨ — النهاية الصغرى لزاوية الانحراف

وزاوية الانحراف ن ك ط (شكل ٤٨) تتغير قيمتها تبعاً لتغير زاوية سقوط الشعاع هـ و على السطح ا ب ويمكن بالتجربة كتجربة الدبابيس السابقة تعيين مسير أشعة مختلفة تسقط بزوايا سقوط مختلفة وقياس زاوية الانحراف المقابلة لزاوية السقوط فى كل حالة فاذا اجريت تجربة من هذا القبيل بعناية ودقة وبينت العلاقة بين زاوية السقوط وزاوية الانحراف بالرسم البيانى كان الخط البيانى الدال على هذه العلاقة كالمبين بشكل (٤٩) ومنه يتضح أن هناك قيمة خاصة واحدة لزاوية السقوط هى المدلول عليها بالحرف ه فى الشكل تكون فيها زاوية الانحراف أصغر ما يمكن وتعرف هذه الزاوية بالنهاية الصغرى لزاوية الانحراف ويمكن استخراج



(شكل ٤٩)

قيمتها من الرسم البيانى

ويتبين من الخط البيانى أنه اذا كانت لزاوية الانحراف أية قيمة أخرى غير هـذه النهاية الصغرى فانه توجد قيمتان لزاوية السقوط تبلغ عندهما زاوية الانحراف تلك القيمة

فاذا عدنا الى شكل (٤٨) نرى أن الشعاع هـ و الساقط على الوجه ا ب بزاوية سقوط معينة ينحرف عند نفوذه من المنشور خارجاً فى استقامة ح ط بزاوية ن ك ط وتطبيق قاعدة قبول العكس تدل فضلا عن التجارب العملية على أن الشعاع ط ح الساقط على الوجه ا حـ بزاوية سقوط أخرى يخرج عند نفوذه من المنشور فى استقامة وهـ (ويكفى لبيان ذلك أنه بعد وضع الدبوسين اللذين يحددان مسير ح ط فى تجربة الدبابيس السابقة ينظر نحو الوجه ا ب بحيث يرى هذان الدبوسان خلال المنشور فى استقامة واحدة فيلاحظ أن خط البصر ينطبق على الخط الواصل بين الدبوسين الأولين اللذين يعينان مسير الشعاع هـ و الساقط على ا ب) فهو اذن ينحرف بزاوية تساوى زاوية ن ك ط أيضاً وبما أنه توجد قيمة واحدة لزاوية السقوط يبلغ عندها الانحراف نهايته الصغرى كان حتما أن تكون الزاوية بين الشعاع الساقط على الوجه ا ب والعمود مساوية الزاوية بين الشعاع الخارج من الوجه ا حـ والعمود على هذا الوجه (ونسميها زاوية الخروج) فى حالة ما تكون زاوية الانحراف عند نهايتها الصغرى والا فان توجيه الشعاع بحيث يتبع خلال المنشور مسيره الاول فى الاتجاه المضاد يؤدى الى القيمة نفسها للنهاية الصغرى لزاوية الانحراف وتكون هناك زاويتا سقوط مختلفتان يبلغ عندهما الانحراف نهايته الصغرى وهذا تنفيه التجارب

ويمكن بيان أن لزاوية الانحراف نهاية صغرى بتجربة بسيطة فاذا هيىء فى غرفة مظلمة منشور ثلاثى بحيث كان قابلا للدوران حول محور مواز لحرفه الحارف ومار بمركز وجهه المثلث وجعل حرفه الحارف أفقياً وزاوية المنشور الى أعلى وأسقطت عليه حزمة أفقية ضيقة من الضوء (ويستحسن أن يكون ضوءًا ذا لون واحد ويكفى فى مثل هذه التجربة أن يوضع فى سبيل أشعة الشمس مثلا قبل سقوطها على المنشور لوحاً من الزجاج الاحمر مثلا) فان الحزمة عند نفوذها من المنشور تنحرف الى أسفل فاذا هيىء حاجز أبيض فى وضع رأسى بحيث تقع عليـه

الأشعة بعد خروجها من المنشور وعين موضع وقوعها عليه وأدير المنشور قليلا حول المحور المذكور تغيرت زاوية السقوط وتغيرت تبعاً لها زاوية الانحراف وتغير موضع وقوع الأشعة على هذا الحاجز فاذا أدير المنشور فى الجهة التى تجعل زاوية الانحراف تأخذ فى النقصان بحيث يأخذ موضع وقوع الأشعة على الحاجز فى الارتفاع واستمر دورانه فى هذه الجهة فان موضع وقوعها على الحاجز يبلغ ارتفاعاً معيناً ينخفض بعده بالرغم من استمرار دوران المنشور فى الجهة نفسها. دالا ذلك على أن هناك وضعاً معيناً واحداً تبلغ عنده زاوية الانحراف نهايتها الصغرى ويمكن ملاحظة أن المنشور فى هذا الوضع يكون وجهاه الحارفان فى وضعين متماثلين أحدهما بالنسبة الى الشعاع الواقع عليه والآخر بالنسبة الى الشعاع الخارج منه

٥٩ — ايجاد النهاية الصغرى لزاوية الانحراف عملياً

ويمكن بتجربة بسيطة تستخدم فيها الدبابيس ايجاد النهاية الصغرى لزاوية الانحراف وذلك أن يوضع المنشور على سطح صحيفة من الورق الابيض مبسوطة على لوح أفقى من الخشب بحيث يكون حرفه الحارف رأسياً ويعين مسير شعاع ساقط على أحد سطحيه الحارفين بوساطة دبوسين رأسيين ثم ينظر من الوجه الآخر بحيث يرى الدبوسان على استقامة واحدة ويدار المنشور قليلا حول نفسه دون أن يبرح مكانه (ولكى يتيسر ذلك يستحسن أن ترسم على الورقة الدائرة التى تحيط بالقاعدة الثلاثية للمنشور ويدار المنشور حول محور رأسى بحيث لا يتجاوز حدود هذه الدائرة وأفضل من هذا أن يلصق دبوس من دبابيس الرسم بالقاعدة الثلاثية للمنشور بقليل من شمع الختم ويغرز سن الدبوس فى اللوح الخشبى فيتكون منه محور ثابت يسهل دوران المنشور حوله) ويلاحظ الاتجاه الذى يرى المستقيم الواصل بين الدبوسين ينحرف نحوه. ويدار المنشور فى الجهة التى تجعل هذا المستقيم ينحرف بعيداً عن رأس المنشور بحيث اذا أريد الاستمرار فى رؤية الدبوسين خلال المنشور على استقامة واحدة تطلب ذلك ازاحة العين نحو رأس المنشور ففى هذه الحالة يترتب على دوران المنشور صغر زاوية الانحراف فيستمر فى ادارته حتى يبلغ المستقيم الواصل بين الدبوسين موضعاً يبتدىء عنده فى الانحراف نحو رأس المنشور

ويعين خط البصر هـذا بدبوسين . فتكون الزاوية بين المستقيم الواصل بين سمى الاولين و بين المستقيم الواصل بين سمى الآخرين هى النهاية الصغرى لزاوية الانحراف .

٦٠ــ اثبات أن زاوية السقوط تساوى زاوية الخروج عند النهاية الصغرى للانحراف

استدللنا فيما سبق (بند ٥٨) على أنه عند ما يكون الانحراف عند نهايته الصغرى تكون زاوية سقوط الشعاع على أحد الوجهين الحارفين مساوية زاوية خروجه من الوجه الآخر باعتبار أن زاوية الخروج هى الزاوية بين الشعاع الخارج من الوجه والعمود المقام عليه ويمكن اثبات هذا ببرهان رياضى

فاذا رمزنا لزاوية سقوط الشعاع هـ و (شكل ٤٨) على السطح ا ب بالحرف ن ولزاوية انكساره وهى زاوية ح و ى بالحرف ن، ولزاوية سقوط الشعاع و ح على السطح ا ح وهى و ح ى بالرمز ن، وللزاوية بين الشعاع ح ط والعمود المقام على السطح ا ح من نقطة ح (أى امتداد ى ح) بالرمز ن، يكون فى المثلث ى و ح

$$\text{ن} + \text{ن}_{،} + \text{ق}\angle \text{ح ى و} = \text{قائمتين}$$

وفى الشكل الرباعى ا ح ى و

$$\text{ق}\angle \text{ا ح ى} = \text{ق}\angle \text{ا و ى} = \text{قائمة}$$

$$\therefore \quad \text{زاوية ح ى و} + \text{زاوية ح ا و} = \text{قائمتين}$$

$$\therefore \quad \text{ن} + \text{ن}_{،} = \text{ق}\angle \text{ح ا و} = \text{ا} \quad \ldots\ldots\ldots (١)$$

بالرمز لزاوية رأس المنشور بالحرف ا

واذا رمزنا لزاوية الانحراف وهى د ن ك ط الحرف ن يكون

$$\text{ن} = \text{ن} - \text{ن} + \text{ن}_{،} - \text{ن}_{،} = \text{ن} + \text{ن}_{،} - \text{ا}$$

وباستعمال رموز التفاضل يتبين أن

$$\frac{\text{د ن}}{\text{د ن}} = \frac{\text{د ن}_{،}}{\text{د ن}} + ١$$

لان ا وهى زاوية رأس المنشور ثابتة

∴ عند ما تكون ف عند نهايتها الصغرى يكون

$$\frac{\text{د}\,\text{ص}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}} + ١ = \text{صفراً} \qquad (٢)$$

ومن المعادلة (١) يتضح أن

$$\frac{\text{د}\,\text{ص}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}} + \frac{\text{د}\,\text{ص}}{\text{د}\,\text{ن}} = \text{صفراً} \qquad (٣)$$

ولكن لما كان $\frac{\text{حتا}\,\text{ن}}{\text{حتا}\,\text{ص}} = \text{م}$

فان $\text{حتا}\,\text{ن}\ \text{د}\,\text{ن} = \text{م}\ \text{حتا}\,\text{ص}\ \text{د}\,\text{ص}$

$$\therefore \frac{\text{د}\,\text{ص}}{\text{د}\,\text{ن}} = \frac{\text{حتا}\,\text{ن}}{\text{م}\,\text{حتا}\,\text{ص}}$$

كذلك $$\frac{\text{د}\,\text{ص}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}_{١}} = \frac{\text{حتا}\,\text{ن}_{١}}{\text{م}\,\text{حتا}\,\text{ص}_{١}}$$

وبما أن $\frac{\text{د}\,\text{ص}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}} = \frac{\text{د}\,\text{ص}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}_{١}} \cdot \frac{\text{د}\,\text{ن}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}}$ ينتج بالتعويض فى (٣)

أن $$\frac{\text{حتا}\,\text{ن}}{\text{م}\,\text{حتا}\,\text{ص}} + \frac{\text{حتا}\,\text{ن}_{١}}{\text{م}\,\text{حتا}\,\text{ص}_{١}} \cdot \frac{\text{د}\,\text{ن}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}} = \text{صفراً}$$

وبما أن $\frac{\text{د}\,\text{ن}_{١}}{\text{د}\,\text{ن}} = -١$ كما يتضح من المعادلة (٢)

يكون $$\frac{\text{حتا}\,\text{ن}}{\text{م}\,\text{حتا}\,\text{ص}} - \frac{\text{حتا}\,\text{ن}_{١}}{\text{م}\,\text{حتا}\,\text{ص}_{١}} = \text{صفراً}$$

$$\therefore \frac{١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ن}}{١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ص}} = \frac{١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ن}_{١}}{١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ص}_{١}}$$

$$\therefore \frac{١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ن}}{\frac{\text{حا}^{٢}\,\text{ن}}{\text{م}^{٢}} - ١} = \frac{١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ن}_{١}}{\frac{\text{حا}^{٢}\,\text{ن}_{١}}{\text{م}^{٢}} - ١}$$

$$\therefore (١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ن})(\text{م}^{٢} - \text{حا}^{٢}\,\text{ن}_{١}) = (١ - \text{حا}^{٢}\,\text{ن}_{١})(\text{م}^{٢} - \text{حا}^{٢}\,\text{ن})$$

$$\therefore \quad \text{حا}^{٢}\, ب = \text{حا}^{٢}\, ب_{١}$$

ومنه يتضح أن زاوية $ب = ب_{١}$

أى زاوية السقوط مساوية لزاوية الخروج

٦١ — تقدير معامل انكسار مادة المنشور

تبين فيما سبق انه عند ما يكون الانحراف عند نهايته الصغرى تكون زاوية السقوط مساوية زاوية الخروج أى $ب = ب_{١}$ وكذلك $ح = ح_{١}$ فاذا رمزنا لزاوية رأس المنشور بالحرف $ا$ فان

$$ا = ٢\, ح \qquad (١)$$

واذا رمزنا للنهاية الصغرى لزاوية الانحراف بالحرف $د$ فان

$$د = ٢\, ب - ٢\, ح$$

$$= ٢\, ب - ا$$

$$\therefore \quad ب = \frac{ا + د}{٢}$$

ولما كان معامل الانكسار

$$م = \frac{\text{حا}\, ب}{\text{حا}\, ح}$$

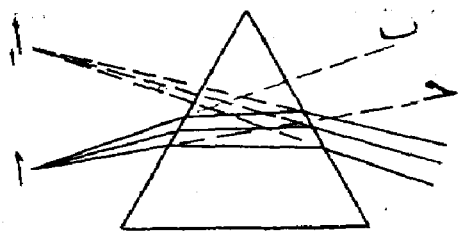
ينتج أن

$$م = \frac{\text{حا}\, \frac{ا + د}{٢}}{\text{حا}\, \frac{ا}{٢}}$$

فاذا قيست النهاية الصغرى لزاوية الانحراف كما فى بند (٥٩) وقيست زاوية رأس المنشور أى الزاوية بين وجهيه الحارفين كما فى بند (٢٢) أمكن بتطبيق هذه المعادلة ايجاد معامل انكسار الضوء فى مادة المنشور وسنرى فيما بعد أن هذه المعادلة أساس طريقة من أدق الطرق لايجاد معامل انكسار المادة

٦٢ – الصورة التى تحدث بالانكسار خلال المنشور عند ما يكون الانحراف عند نهايته الصغرى

يتبين من شكل (٤٩) أنه وان كانت هناك قيمة واحدة لزاوية السقوط يبلغ عندها الانحراف نهايته الصغرى فانه اذا تجاوزت زاوية السقوط هذه القيمة الى ما هو اكبر منها قليلا أو أصغر منها قليلا فان قيمة زاوية الانحراف تبقى أو تكاد تبقى ثابتة لا تتغير . لذلك اذا وقعت من نقطة مثل ا (شكل ٥٠) حزمة مخروطية بحيث يكون انحراف محور هذه الحزمة النهاية الصغرى للانحراف وكانت زاوية رأس المخروط صغيرة فان جميع أشعة هذه الحزمة تنحرف بزاوية



(شكل ٥٠)

لا تختلف كثيراً عن النهاية الصغرى لزاوية الانحراف ويمكن اعتبارها مساوية لها فيكون نتيجة نفوذها خلال المنشور أن تنحرف جميع هذه الاشعة بمقدار واحد واذن لا يتغير ميلها بعضها بالنسبة الى الآخر من جراء نفوذها فى المنشور وتمر اذن امتداداتها بنقطة واحدة ا تكون كأنها صادرة منها وتكون هذه النقطة بمثابة صورة واضحة دقيقة للنقطة ا. وتراها العين اذا كان محور مخروط الاشعة الواقعة عليها هو الشعاع الذى يعانى النهاية الصغرى للانحراف

ويمكن التحقق عملياً من أن الصورة التى ترى عند ما يكون الانحراف عند نهايته الصغرى دقيقة واضحة وذلك بأن تهيأ فتحة مستطيلة ضيقة بحيث تكون موازية للحرف الحارف لمنشور قابل للدوران حول محور موازٍ لهذا الحرف وتضاء هذه الفتحة بضوء ذي لون واحد نظراً لان نفوذ الضوء الابيض خلال المنشور يترتب عليه تشتت الاضواء ذات الالوان المختلفة بعضها بالنسبة الى الآخر . ويمكن الحصول على ضوء يعد ذا لون واحد بادخال مقدار صغير من ملح الطعام فى لهب مصباح بنزن على حرف ملعقة صغيرة من البلاتين أو بأن تلف قطعة من ورق القطن الصخرى (الازبستوس) حول الطرف الاعلى لانبوبة مصباح بنزن بحيث يكون حرفها ناتئاً فوق الطرف الاعلى لانبوبة المصباح وتشبع اللفافة بمحلول مشبع من ملح الطعام فاذا أشعل

المصباح يتصل حرف الورقة باللهب ويصير لونه أصفر . فاذا نظر خلال المنشور الى الفتحة المضاءة بهذه الكيفية ترى صورتها واضحة فى الوضع الذى تكون فيه زاوية انحراف الاشعة الواصلة الى العين هى النهاية الصغرى لزاوية الانحراف أما فى الاوضاع الاخرى للمنشور فلا تكون الصورة المرئية بتلك الدرجة من الوضوح

٦٣ — شرط نفوذ الشعاع الضوئى خلال منشور ثلاثى

اذا اعتبرنا هـ و (شكل ٤٨) شعاعاً ساقطاً على السطح ا ب من المنشور ورمزنا لزاوية انكساره عند هذا السطح وهى زاوية ى وح بالرمز ν_1 ولزاوية سقوطه على السطح ا ح وهى زاوية ى ح و بالرمز ν_2 يتضح كما تقدم أن

$$\text{ا} = \nu_2 + \nu_1$$

باعتبار أن ا زاوية رأس المنشور وهى الواقعة بين وجهيه ا ب ، ا ح ولكى ينفذ الشعاع وح (الواقع على السطح ا ح) خارجاً من المنشور يجب أن تكون زاوية سقوطه ν_2 أصغر من الزاوية الحرجة . فاذا رمزنا للزاوية الحرجة لمادة المنشور بالحرف ح يتضح أن أصغر قيمة لزاوية الانكسار عند السطح الاول يتفق معها نفوذ الشعاع خلال المنشور هى

$$\text{ح} - \text{ا}$$

فتكون أصغر قيمة لزاوية سقوط الشعاع هـ و على السطح ا ب يتفق معها نفوذ الشعاع خلال المنشور هى زاوية ه فى المعادلة

$$\text{جا ه} = \text{م جا} (\text{ا} - \text{ح})$$

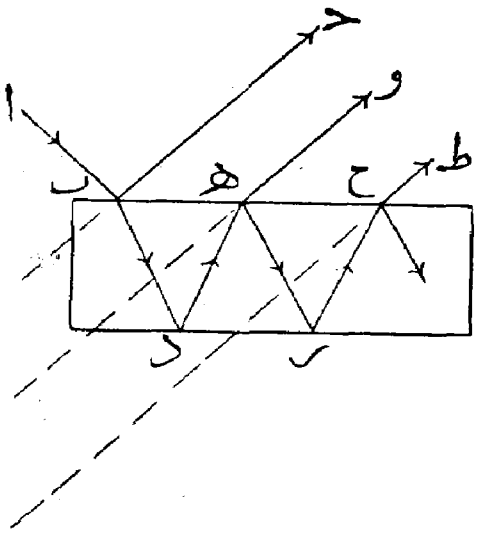
باعتبار أن م رمز لمعامل انكسار الضوء فى مادة المنشور

٦٤ — تعدد الصور فى المرآة السميكة

اذا وضع جسم كالاصبع مثلا أمام السطح العاكس لمرآة سميكة وبجواره ونظر الى صورته أمكن رؤية عدة صور حادثة بالانعكاس . والمرآة المعتادة لوح من الزجاج قد فضض سطحه الخلفى لكى ينعكس الضوء عنه بشدة

فاذا فرض أن نقطة مضيئة مثل ا (شكل ٥١) يسقط منها شعاع ا ب على السطح الامامى

للمرآة فانه ينعكس طبقاً لقانونى الانعكاس شعاع فى استقامة ب حـ وتتكون على امتداد حـ ب صورة . وينكسر خلال اللوح طبقاً لقانونى الانكسار شعاع فى استقامة ب د وهـذا عند وقوعه على السطح الخلفى المفضض ينعكس انعكاساً داخليـاً طبقاً لقـانونى الانعكاس فى استقامة د هـ ثم هو عند هـ ينكسر منه شعاع خارجاً الى الهواء فى استقامة هـ و وينعكس منـه شعاع انعكاساً داخليـاً فى استقامة هـ ر فتتكون على امتداد وهـ صورة ثانية وكذلك



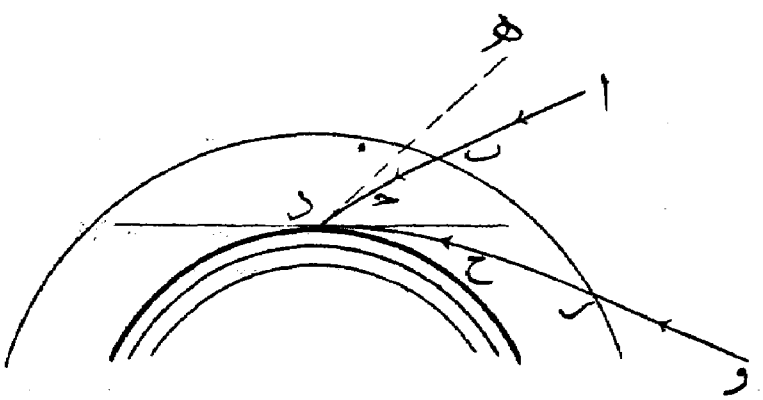
(شكل ٥١)

سقوط هـ ر على السطح الخلفى يترتب عليـه تكرار مثل ما حدث عند سقوط ب د عليه . فتتكرر الصور مثنى وثلاث

الظواهر الجوية المالوفة التى لها علاقة بموضوع الانكسار

٦٥ — الانكسار الفلكى

أشعة الضوء التى تصل من الاجرام السماوية الى سطح الكرة الارضية تعانى وهى تخترق الطبقة الهوائية المحيطة بالارض انكساراً يترتب عليه انحرافها . فاذا فرضنا أن ا ب (شكل ٥٢) مسير شعاع صادر من نجم بعيد فطالما أن الشعاع يسير فى الخلاء قبل بلوغه الطبقة الهوائية فان مسيره يكون مستقيما واذا ما بلغ اول هذه الطبقة ينكسر منحرفاً قليـــلا نحو العمود



(شكل ٥٢)

ومعامل الانكسار فى الغازات كما تدل التجارب العملية [1] يزداد تبعاً لزيادة ضغط الغاز او

(١) انظر الباب العاشر

كثافته ولما كانت الطبقات الهوائية تزداد كثافتها كلما قربت من سطح الارض فان الشعاع عند نفوذه خلال الهواء لا يكون مسيره مستقيما بل يكون منحنياً كما هو مبين بالمنحنى ب حـ د فى الشكل فاذا وقع الشعاع على عين الراقب عند د تراءى له انه آت فى استقامة د هـ (وهو المماس المرسوم عند د لهذا المنحنى) ويترتب على ذلك أن النجم يظهر على امتداد د هـ اى يظهر للراقب أقرب الى السمت من موضعه الحقيق . ويلاحظ ان التغير الذى يحدث بهذه الكيفية فى موضع النجم يقل كلما قرب النجم من السمت حتى اذا بلغ السمت تماماً انطبق مسير الشعاع الواصل منه على العمود المرسوم من نقطة السقوط (وهو امتداد نصف القطر) ونفذ الشعاع فى استقامة مسيره الأول ويكون الوضع الظاهرى للنجم هو الوضع الحقيق

وهذه الظاهرة تسمى « الانكسار الفلكى » [1] واثرها من الامور التى يجب مراعاتها فى الأرصاد الفلكية وهى ظاهرة عامة يترتب عليها نتائج أخرى منها أن النجم يظهر على الافق قبل أن يكون قد بلغه فعلا ويتضح هذا من الشكل اذا رسم المماس عند د لكرة الارض فهذا يمثل الأفق عند د ويرى أن الشعاع و رح د يصل الى د منطبقاً على الافق فاذا كان هذا الشعاع صادراً من نجم على امتداد ر و ظهر النجم على الافق وهو فى الحقيقة تحته وهذه حالة عامة تنطبق على جميع الاجرام ومنها الشمس والقمر ويترتب على حدوثها فى حالة الشمس أن الشمس ترى على الافق عند الشروق والغروب وهى فى الحقيقة تحته فى الحالتين واذن تكون المدة بين شروقها وغروبها أطول من المدة بين بلوغها الافق فعلا عند الشروق وبين بلوغها الافق فعلا عند الغروب

ومن نتائج هذه الظاهرة أن قرص الشمس أو قرص القمر بالقرب من الافق لا يظهر مستديراً بل يظهر بيضياً فاذا اعتبرنا قطراً رأسياً مرسوماً على قرص الشمس مثلا فان نهايته العليا تكون أقرب الى السمت من نهايته السفلى ولذلك يكون أثر الانكسار فى الطبقة الهوائية أن تكون ازاحة الطرف الأعلى نحو السمت أقل من ازاحة الطرف الأسفل نحو السمت فيظهر القطر الرأسى أقصر منه فى الحقيقة فى حين أن القطر الأفقى يزاح كله الى أعلى دون أن يطرأ على

---

(١) Astronomical Refraction

طوله تغير ما

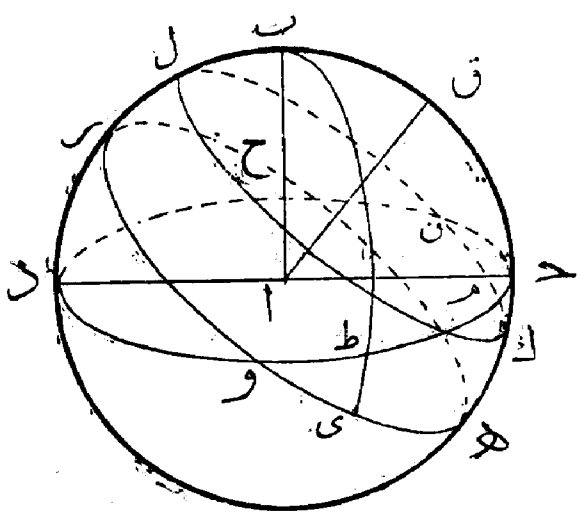
وقد كان الحسن بن الهيثم من أسبق العلماء الى ذكر مثل هذه الظواهر وشرحها

٦٦ — الفجر والشفق

الفجر هو الضوء الذى يرى قبل المشرق قبلَ شروق الشمس والشفق هو الضوء الذى يرى قِبلَ المغرب بعد غروبها والظاهرتان معروفتان من قديم الزمان وهما يحدثان عن انعكاس ضوء الشمس وهى تحت الأفق عند السحب أو دقائق الغبار أو الهباء المنتشر فى الجو . فعند حدوث الفجر لا تكون الشمس قد بلغت الموضع الذى عنده تصل الأشعة الصادرة منها الى عين الراقب منطبقة على الأفق فتكون الشمس تحت امتداد المستقيم ر و (شكل ٥٢) فلا تصل أشعتها الى العين عند د ولكنها تذهب فى الهواء الى أعلى فتقع مثلا على دقائق الغبار المنتشر فى الجو وتنعكس عن هذه الدقائق فيصل بعض الضوء المنعكس الى العين . وعند حدوث الشفق تكون الشمس قد تجاوزت قليلا الموضع الذى عنده تصل الاشعة الصادرة منها الى عين الراقب منطبقة على الافق

وقد بحث الحسن بن الهيثم فى هذه الظاهرة وقدّر أقصى بعد زاوى بين الشمس والأفق يحول حدوثها أى يحول مبدأ ظهور الفجر ومنتهى دوام الشفق وهذا البعد على حسب تقديره يساوى ١٨ درجة وهو المقدار المعول عليه الى وقتنا الحاضر

وزيادة فى شرح هذه الظاهرة وبعض المسائل المرتبطة بها نفرض أن الكرة التى مركزها نقطة ا (شكل ٥٣) تمثل كرة السماء ونقطة ا تمثل موضع الراقب والمستقيم ا ب يمثل السمت والمستوى ح د العمودى عليه يمثل الأفق وليكن ا ق المحور القطبى أى المحور الذى تبدو السماء



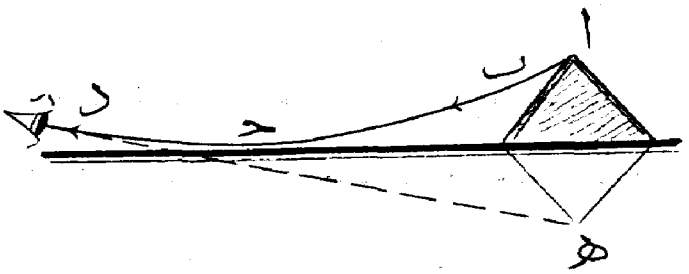
(شكل ٥٣)

دائرة حوله فتكون الزاوية التى يصنعها القوس ق ح عند المركز هى عرض المكان الموجود فيه الراقب فاذا كان الوقت وقت أحد الاعتدالين يكون مسير الشمس فى السماء هو ه و ح ه وفى اثناء المدة التى تكون فيها الشمس فوق الافق أى فى أثناء قطعها القوس و ح يكون النهار وتكون نقطة و مشرق الشمس ونقطة ح مغربها فاذا اعتبرنا أن ضوء الشمس المنعكس عما فى الجو من الهباء أو ما شابهه يبتدىء فى الوصول الى نقطة ا وهى تحت الأفق بمقدار ١٨ درجة ورسمنا على سطح الكرة القوس ب ط ى بحيث تكون الزاوية التى يصنعها عند المركز هى ٩٠ + ١٨ = ١٠٨ فان الشمس عند ى تكون تحت الأفق بمقدار ١٨ درجة وإذن متى بلغت الشمس فى مسيرها ليلا نقطة ى ابتدأ الفجر فى الانبثاق وتكون مدة دوامه هى المدة التى تستغرقها الشمس فى المسير من ى الى و . وطول القوس ى و يختلف تبعاً لاختلاف ميل الدائرة ه و ح ه على الافق وهذا يختلف باختلاف عرض المكان فاذا كان الموضع الذى نراعيه عند خط الاستواء مثلا حيث عرض المكان صفر يكون مسير الشمس عند أحد الاعتدالين الدائرة المارة بالسمت ب وتكون مدة دوام الفجر هى المدة التى تستغرقها الشمس فى قطع ١٨ درجة من قوس هذه الدائرة

أما اذا لم يكن الوقت وقت أحد الاعتدالين فان مسير الشمس يمثل بدائرة مثل ك ل عمودية على المحور القطبى ا ق وعند الانقلاب الصيفى تبلغ الزاوية التى يصنعها القوس ك ه عند المركز مقدار ٩٠ + ٢٣٫٥ من الدرجة . وفى هذه الحالة يكون النهار هو المدة التى تستغرقها الشمس فى قطع القوس م ل ن ويكون أقصى هبوط تحت الأفق تبلغه الشمس فى أثناء الليل لا يتجاوز الزاوية التى يصنعها القوس ك ح عند المركز وهذه الزاوية قد تكون أقل من ١٨ درجة وفى هذه الحالة يندمج الشفق بالفجر فلا يكون ثمت ليل . وميل الدائرة ك ل بالنسبة الى الأفق ح د يتوقف على العرض ولذلك توجد مواضع على الكرة الأرضية تقع عندها نقطة ك على نقطة ح حيث يبلغ طول النهار عند الانقلاب ٢٤ ساعة وتوجد مواضع تكون عندها نقطة ك فوق نقطة ح حيث لا تغرب الشمس

٦٧ — السراب

كثافة الهواء فى الحالات المعتادة تقل اذا سرنا من أسفل الى أعلى ولكن قد يحدث فى الصحراوات الحارة أن ترتفع كثيراً درجة حرارة الطبقات الهوائية الملاصقة بسطح الأرض وتصير كثافة الطبقات السفلى أقل من كثافة التى فوقها (لا سيما اذا هبت فى الطبقات العليا ريح باردة) بحيث اذا سرنا من أسفل الى أعلى تزداد الكثافة بالتدريج حتى تصل الى نهايتها العظمى ثم تبتدىء فى النقص كما فى الحالات المعتادة عند ما يتجاوز الارتفاع سمك الطبقة التى يحدث فيها هذا الشذوذ ويترتب على ذلك أن يزداد معامل الانكسار اذا سرنا من أسفل الى أعلى حتى يبلغ نهايته العظمى ثم يأخذ فى النقص بعد ذلك كما فى الحالات المعتادة



(شكل ٥٤)

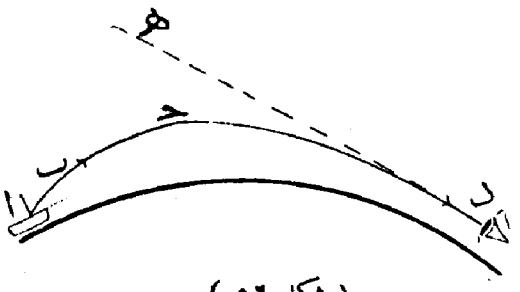
فاذا فرض أن شعاعاً صادراً من قمة تل مثلا بالقرب من الأفق كالشعاع ا ب (شكل ٥٤) فانه فى أثناء نفوذه من الطبقة العليا الكثيفة الى الطبقة اللطيفة التى تحتها تكون زاوية سقوطه فى الأول أصغر من زاوية انكساره فى الثانية فينحرف بعيداً عن العمود وعند نفوذه من الطبقة الثانية الى الطبقة الثالثة التى تحتها تكون زاوية السقوط اكبر من زاوية السقوط فى الحالة الأولى فتكون زاوية الانكسار اكبر من زاوية الانكسار فى الحالة الأولى فيزداد الشعاع انحرافاً وهكذا فيكون مسيره كالمنحنى ا ب ح المبين بالشكل . حتى اذا تجاوزت زاوية السقوط فى احدى الطبقات الزاوية الحرجة لهذه الطبقة بالنسبة الى الطبقة التى تحتها انعكس الشعاع وأخذ مسيره يتقوس كما هو مبين بالجزء ح د فى الشكل فاذا وقع على عين الرائى عند د تراءى له أنه آت فى استقامة د هـ فتتراءى له صورة مقلوبة للتل شبيهة بالصورة التى تحدث بالانعكاس عند سطح الماء وقد ترى صورة للسماء تحدث بهذه الكيفية أيضاً فيزداد الظن بوجود الماء رسوخاً فى الذهن

وقد وصف « وود » (١) تجربة أجراها تقلد بها ظاهرة السراب عملياً فى المعمل وذلك أن يؤتى بثلاث صفائح من الفولاذ يبلغ طول الواحدة متراً وعرضها عشرين سنتيمتراً وسمكها ثلاثة أو أربعة مليمترات وتوضع الصفائح بحيث تكون جميعها فى مستوى أفقى واحد وعلى امتداد واحد ثم تغطى سطوحها العليا بطبقة من الرمل و يوضع عند أحد الطرفين ب (شكل ٥٥) مرآة مستوية حـ تعكس ضوء السماء نحو الطرف الآخر ا بحيث اذا وضعت العين عند هذا الطرف فوق مستوى الصفائح قليلا ووجهت نحو المرآة ظهرت الصفائح الثلاث ممتدة كالصحراء وظهرت صورة السماء المنعكسة عن المرآة كأفق هـذه الصحراء ثم يوضع عند الطرف ب على سطح الصفيحة هناك بضعة نماذج يبلغ ارتفاع الواحد منها سنتيمتراً أو اثنين تمثل تلالا أو جبالا وتسخن بعد ذلك هـذه الصفائح من أسفل بلهب عدة صغيرة يبلغ ارتفاع الواحد خمسة سنتميترات وتكون على أبعاد متساوية كما هو مبين بالشكل . فاذا وضعت العين عنـد ا على ارتفاع ثلاثة أو أربعـة سنتمترات من مستوى الصفائح تراءى للناظر أنه يرى بركة من المـاء عند ب تنعكس عن سطحها صور نماذج الجبال والتلال الموضوعة هناك

(شكل ٥٥)

٦٨ — السراب المعكوس

وتحدث أحياناً ظاهرة أخرى تكون الظروف الاستثنائية فيها عكس الظروف الاستثنائية التى تؤدى الى حدوث السراب وتسمى ظاهرة السراب المعكوس وهى تحدث اذا كانت الطبقات السفلى من الهواء باردة وتهب فى الطبقات العليا ريح ساخنة فيقل معامل انكسار الضوء اذا سرنا من أسفل الى أعلى بكيفية شاذة غير الكيفية المعتادة . فاذا فرضنا أن شعاعاً مثل



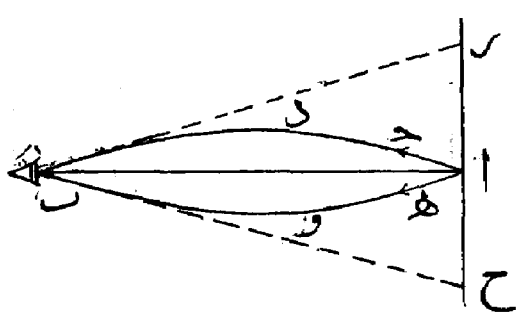
(شكل ٥٦)

(١) R. W. Wood فى كتابه Physical Optics

ا ب (شكل ٥٦) يصدر من جسم عند ا على سطح الأرض ويخترق الطبقات السفلى الى أعلى فانه ينحرف بالنفوذ من الطبقة السفلى الكثيفة الى الطبقة اللطيفة التى فوقها بعيداً عن العمود فينحنى الشعاع بالكيفية المبينة بالشكل حتى اذا تجاوزت زاوية سقوطه فى الطبقة الكثيفة الزاوية الحرجة لهذه الطبقة بالنسبة الى التى فوقها انعكس الشعاع وأخذ ينحنى بالكيفية المبينة بالجزء حـ د فاذا وقع على عين الرائى عند د تراءى له أن الشعاع آت من اتجاه هـ د فيرى صورة للجسم الموجود على سطح الأرض تكون مقلوبة كأنها معلقة فى السماء وقد يكون الجسم مختفياً تحت الأفق (كما هو مبين بالشكل) وتظهر صورته عالية مقلوبة فى السماء

٩٠ — ظاهرة « مرجانة »

وتحدث أحياناً ظاهرة أخرى تكون فيها الطبقات الملاصقة لسطح الأرض لطيفة تزداد كثافتها اذا ارتفعنا الى أعلى حتى تصل الكثافة الى نهايتها العظمى على ارتفاع قليل ثم تقل بعد ذلك . فالطبقة التى تكون كثافتها عند النهاية العظمى يكون معامل انكسار الضوء فيها أكبر ما يمكن ويقل اذا ارتفعنا فوق هذه الطبقة أو اذا نزلنا تحتها . فاذا فرضنا أن المستقيم ا ب (شكل ٥٧) يمثل هذه الطبقة فالشعاع الصادر من جسم صغير عند ا ومسيره فى استقامة ا ب ينطبق مسيره على سمت ا ب حيث ينفذ فى طبقة ذات كثافة غير متغيرة . أما الشعاع الصادر فى اتجاه ا حـ فانه ينفذ من طبقة الى أخرى أقل كثافة منها فيتقوس مسيره رويداً رويداً حتى ينعكس متى توافر شرط الانعكاس ويصير مسيره كالمنحنى ا حـ د المبين بالشكل . وبالمثل فان الشعاع ا هـ ينفذ من طبقة الى أخرى أقل كثافة منها فيتقوس وينعكس ويصير مسيره كالمنحنى ا هـ و .



(شكل ٥٧)

فاذا حدث ذلك وكانت عين الناظر عند ب تراءى له أن الشعاع ا حـ د كأنه آت فى استقامة ر ب وتراءى له الشعاع ا هـ و كأنه آت فى استقامة ح ب واذن يتراءى له الجسم الصغير عند ا كأنه قد استطال فى الاتجاه الرأسى

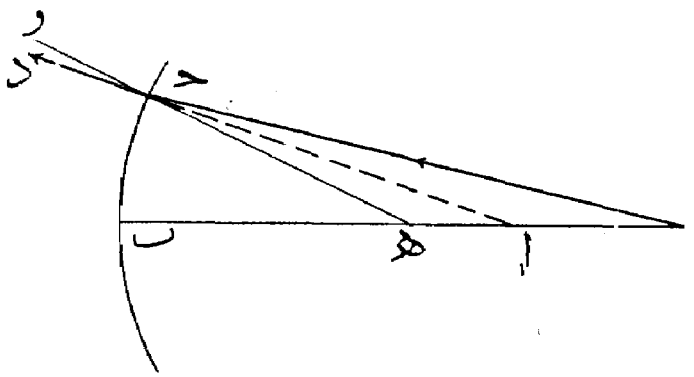
الى أن بلغ ما بين ر ، ح

وان كان الشكل يبين انحناء الاشعة بشيء من المبالغة فان هذه الظاهرة شوهدت فى برزخ « مسينا » فرؤيت الصخور على الشاطىء قد امتدت الى أعلى كأنها جبال شاهقة والاجسام الصغيرة قد استطالت كأنها أعمدة منصوبة وتعرف الظاهرة عند الفرنجة باسم « ظاهرة مرجانة »(١)

الانكسار عند السطوح الكرية وخلال العدسات الرقيقة

٧٠ — الانكسار عند السطح الكرى المقعر

لنفرض أن الضوء يقع من وسط كالهواء على آخر كالزجاج وان الحد الفاصل بين الوسطين سطح كرى مقعر كالمبين بالشكل (٥٨) ولتكن نقطة ا نقطة مضيئة على المحور ا ب ونقطة ه مركز تكور السطح ونقطة ب قطبه . نرسم من ا مسير شعاع مثل ا ح يقع على السطح عند ح فيكون ه ح و العمود المرسوم من نقطة السقوط ونرسم ح د بحيث يكون مسير الشعاع عند انكساره فى الوسط الثانى ونمد المستقيم د ح على استقامته حتى يقطع المحور فى نقطة ا ،



(شكل ٥٨)

فاذا رمزنا لزاوية السقوط ا ح ه بالحرف ن ولزاوية الانكسار د ح و بالحرف ر ولزاوية ح ا ب بالحرف ا ولزاوية ح ا ، ب بالرمز ا ، ولزاوية ح ه ب بالحرف ه يكون

$$ه = ا + ن = ا ، + ر$$

(١) Fata Morgana نسبة الى جنية فى اساطير القرون الوسطى بهذا الاسم

وبما أن $\frac{\text{حا}\,\theta}{\text{حا}\,\theta_{،}} = م$ ينتج اذا كانت نقطة حـ قريبة جداً من القطب ب ان تكون كل من الزاويتين θ ، $\theta_{،}$ صغيرة وأن يكون $\theta = م\,\theta_{،}$

$$\therefore \quad ه = ١ + م^{٢}\,\theta_{،}^{٢} \quad \ldots \quad (١)$$

$$\text{و} \quad ه = ١_{،} + \theta_{،}^{٢} \quad \ldots \quad (٢)$$

وبضرب المعادلة (٢) فى $م^{٢}$ وطرح المعادلة (١) من حاصل الضرب ينتج أن

$$ه\,(م^{٢} - ١) = م^{٢}\,١_{،} - ١ \quad \ldots \quad (٣)$$

فاذا رمزنا لبعد نقطة ا عن القطب ب بالحرف ع ولبعد $ا_{،}$ عنه بالرمز $ع_{،}$ ولنصف قطر تكور السطح بالرمز س فنظراً لأن نقطة حـ قريبة جداً من نقطة ب يكون

$$ه = \frac{\text{حـ ب}}{ع}$$

$$\text{و} \quad ١_{،} = \frac{\text{حـ ب}}{ع_{،}}$$

$$\text{كما أن} \quad ه = \frac{\text{حـ ب}}{س}$$

فبالتعويض فى المعادلة (٣) وباختصار حـ ب ينتج أن

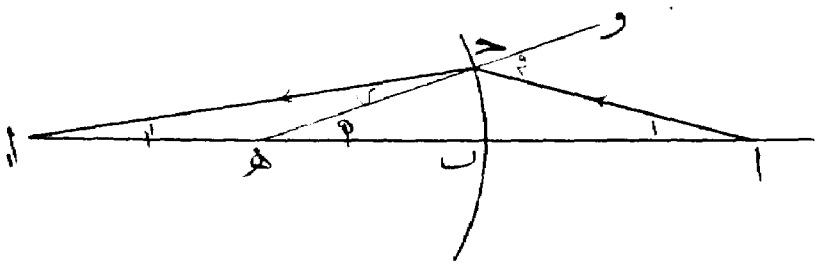
$$\frac{م^{٢} - ١}{س} = \frac{م^{٢}}{ع_{،}} - \frac{١}{ع} \quad \ldots \quad (٤)$$

ومن هذه المعادلة يتبين أن نقطة $ا_{،}$ تكون على المحور وعلى بعد معين من القطب أياً كان الشعاع الواقع من نقطة ا على السطح مادامت نقطة السقوط قريبة جداً من القطب واذن نرى أنه اذا وقعت من نقطة ا حزمة مخروطية ضيقة محورها منطبق على المحور ا ب فان الأشعة المنكسرة تمر امتداداتها بنقطة $ا_{،}$ وتكون هذه النقطة بمثابة صورة للنقطة ا وتكون علاقة بعد الجسم عن القطب ببعد صورته عنه طبقاً للمعادلة (٤) حيث يكون م رمزاً لمعامل انكسار

الضوء من الوسط الأول الموجود فيه الجسم الى الوسط الثانى الحادث عند سطحه الانكسار

٧١ — الانكسار عند السطح الكرى المحدب

نفرض فى هذه الحالة أن الضوء يقع من وسط كالهواء على آخر كالزجاج وان الحد الفاصل بين الوسطين سطح كرى محدب كالمبين بالشكل (٥٩) وليكن كما فى الحالة السابقة ا حـ مسير



(شكل ٥٩)

شعاع ساقط ، حـ ا، مسيره بعد الانكسار حيث يكون ه حـ و العمود عند نقطة السقوط وانرمز للابعاد والزوايا المقابلة لنظيراتها فى الحالة السابقة بالرموز نفسها فيكون

$$ا + ه = ن$$

$$ا + ه = ن م \quad \text{اى}$$

$$ا + ن = ه \quad ،$$

$$ا + ا، م = (م - ١) ه \quad \therefore$$

$$\frac{م - ١}{ن} = \frac{م}{ا،} + \frac{١}{ع} \cdots (١) \quad \therefore$$

ويتبين كما فى الحالة السابقة أنه يتكون للنقطة المضيئة ا الصورة ا، اذا اقتصر على الأشعة التى تكون مواضع سقوطها قريبة جداً من القطب والمعادلة (١) تدل على علاقة بعد الجسم عن القطب ببعد صورته عنه وهى تتحول الى صورة المعادلة (٤) فى البند السابق اذا اتبعت قاعدة الاشارات التى سبقت فى المرايا الكرية فتكون اذن هناك معادلة واحدة هى

$$\frac{١}{ع} - \frac{م}{ا،} = \frac{م - ١}{ن}$$

تدل على علاقة بعد الجسم عن القطب ببعد صورته عنه وتنطبق فى حالتى السطح الكرى المقعر والسطح الكرى المحدب اذا روعيت قاعدة الاشارات المعروفة

٧٢ – بؤرة السطح الكرى وبعده البؤرى

يتبين من المعادلة

$$\frac{م - ١}{س} = \frac{م}{ع_١} - \frac{١}{ع}$$

أنه اذا كانت قيمة $ع_١$ لا نهاية لها يكون

$$\frac{م - ١}{س} = -\frac{١}{ع}$$

وتسمى النقطة التى توضع عندها النقطة المضيئة لكى تكون الاشعة المنكسرة متوازية وموازية للمحور (أى تكون الصورة فى ما لا نهاية) « البؤرة الرئيسية الأولى » ويسمى بعدها عن القطب « البعد البؤرى الأول » ويساوى $-\frac{س}{م - ١}$

فاذا كان الضوء واقعاً من وسط أقل كثافة ضوئية ومنكسراً فى وسط اكبر كثافة فان قيمة $م$ تكون اكبر من الواحد فاذا كان السطح مقعراً تكون اشارة $س$ موجبة واذن يكون البعد البؤرى الأول مقداراً سالباً وفى هذه الحالة الاشعة تنكسر متوازية فى الوسط الكثيف عند ما تسقط عليه وامتداداتها تمر بنقطة فى الجانب الآخر من السطح وتكون هذه النقطة وهى البؤرة الرئيسية الاولى تقديرية اما اذا كان السطح محدباً فان البؤرة الرئيسية الاولى تكون حقيقية

واذا كانت قيمة $ع$ لا نهاية لها أى فى حالة ما تكون الاشعة الساقطة متوازية فان

$$\frac{م - ١}{س} = \frac{م}{ع_١}$$

واذن تنكسر هذه الاشعة مارة بنقطة على بعد يساوى $\frac{س م}{م - ١}$ من القطب تسمى « البؤرة الرئيسية الثانية » ويسمى بعدها هذا « البعد البؤرى الثانى »

ويتضح اذا روعيت الاشارات انه عند وقوع الضوء من وسط أقل كثافة ضوئية الى وسط أكبر كثافة فان البؤرة الثانية للسطح المقعر تقديرية فى الجانب الواقع منه الضوء وللسطح المحدب حقيقة فى الجانب الآخر

٧٣ — الانكسار خلال العدسة الكرية الرقيقة

العدسات التى ندرسها هنا هى العدسات المحدودة بسطحين كريين والتى يكون سمكها صغيراً وسنقتصر هنا على الحالات التى تكون فيها مواضع سقوط الاشعة على أحد سطحى العدسة قريبة جداً من قطب السطح حتى اذا كانت الاشعة منبعثة من نقطة على المحور يتكون بالانكسار عند السطح الاول للعدسة صورة فتقع الاشعة على السطح الثانى وكأن هذه الصورة بالنسبة اليه جسم فتتكون بالانكسار عن السطح الثانى الصورة النهائية وتكون هذه هى الصورة الحادثة بفعل العدسة . فان رمزنا لمعامل الانكسار من الوسط الواقعة منه الاشعة الى مادة العدسة بالحرف م ولنصف قطر تكور السطح الاول للعدسة وهو السطح الواقع عليه الضوء أولا بالرمز س$_{١}$ ولبعد النقطة المضيئة الموجودة على محور هذا السطح بالحرف ع فان الصورة الحادثة بالانكسار الاول تكون على المحور وعلى بعد ص من قطب السطح الاول طبقاً للمعادلة

$$\frac{١}{ع} - \frac{م}{ص} = \frac{١ - م}{س_{١}} \quad \ldots (١)$$

فاذا كان محور السطح الثانى منطبقاً على محور السطح الاول تكون الأشعة الواقعة على السطح الثانى كأنها صادرة من نقطة على المحور تبعد بمقدار ص عن قطب السطح الأول فاذا كان سمك العدسة صغيراً جداً أمكن اعتبار بعد هذه النقطة عن قطب السطح الثانى هو ص أيضاً ونظراً لان الضوء وهو منكسر عند هذا السطح ينفذ من مادة العدسة الى الوسط الاول فان معامل الانكسار يكون $\frac{١}{م}$ فبالرمز لنصف قطر تكور هذا السطح بالرمز س$_{٢}$ ولبعد الصورة الحادثة عن هذا الانكسار بعدها من قطب هذا السطح بالرمز ع$_{١}$ يكون

$$\frac{\frac{١}{م}}{ع_{١}} - \frac{١}{ص} = \frac{\frac{١}{م} - ١}{س_{٢}} \quad \ldots (٢)$$

ومن معادلة (١) يتضح أن

$$\left(\frac{١}{ع}+\frac{١-م}{ع_{١}}\right)\frac{١}{م}=\frac{١}{ع_{٢}}$$

فبالتعويض فى المعادلة (٢) ينتج أن

$$\left(\frac{١}{ع}+\frac{١-م}{ع_{١}}\right)\frac{١}{م}-\frac{\frac{١}{م}}{ع_{١}}=\frac{١-\frac{١}{م}}{ع_{٢}}$$

$$\therefore \quad (م-١)\left(\frac{١}{ع_{١}}-\frac{١}{ع_{٢}}\right)=\frac{١}{ع}-\frac{١}{ع_{١}} \quad \ldots (٣)$$

وتكون هـذه المعادلة هى المعادلة العامة الدالة على علاقة بعد النقطة المضيئة عن العدسة الرقيقة وبعد صورتها عنها ويلاحظ أن ع رمز لبعد النقطة المضيئة عن قطب السطح الاول ، ع$_{١}$ رمز لبعد الصورة التى تتكون بفعل العدسة عن قطب السطح الثانى وبما أن القطبين متقاربان واهمل البعد بينهما فان ع يعتبر رمزاً لبعد النقطة المضيئة عن العدسة ، ع$_{١}$ رمزاً لبعد صورتها عن العدسة

٧٤ — بؤرة العدسة وبعدها البؤرى

ويتبين من المعادلة (٣) فى البند السابق انه اذا كانت قيمة ع لا نهاية لها أى اذا كانت الأشعة الواقعة على العدسة متوازية وموازية للمحور ورمزنا لبعد الصورة بالحرف ل فان

$$\frac{١}{ل}=(م-١)\left(\frac{١}{ع_{١}}-\frac{١}{ع_{٢}}\right)$$

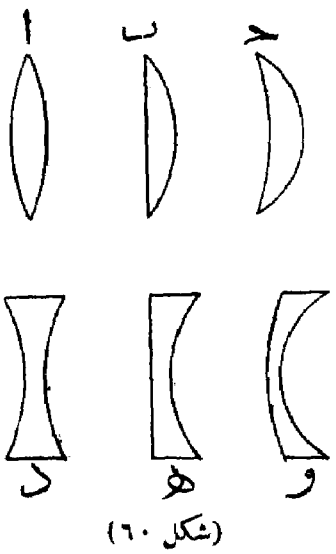
ويسمى موضع الصورة فى هذه الحالة «البؤرة» ويسمى بعدها عن العدسة «البعد البؤرى» ويكون موضع البؤرة من العدسة فى الجانب الذى يقع منه الضوء أو فى الجانب الآخر تبعاً للاشارة النهائية للمقدار الجبرى السابق فاذا كانت اشارته موجبة كان موضع البؤرة من العدسة فى الجانب الذى يقع منه الضوء وفى هذه الحالة تكون البؤرة تقديرية لأن الأشعة الحقيقية بعد نفوذها من العدسة الى الجانب الثانى لاتتلاقى فعلا فى البؤرة وانما اذا مدت على استقاماتها تتلاقى امتداداتها فى

نقطة فى الجانب الأول منها . ويكون بعد هذه النقطة طبقاً لقاعدة الاشارات موجباً . أما اذا كانت الاشارة للمقدار الجبرى المشار اليه سالبة فان البؤرة تكون حقيقية فى الجانب الذى تنفذ اليه الأشعة من العدسة

ولزيادة توضيح هذا نفرض أن العدسة من الزجاج وموضوعة فى الهواء فقيمة م تكون معامل الانكسار من الهواء الى الزجاج وأكبر من الواحد . واذن يكون المقدار (م — ١) موجباً فاذا كانت العدسة محدبة الوجهين (كما فى شكل ٦٠ — ا) وكان الضوء واقعاً عليها من الجانب الأيمن منها فان $\frac{1}{ب_1}$ وهو نصف قطر تكور السطح الواقع عليه الضوء تكون اشارته طبقاً لقاعدة الاشارات سالبة فى حين أن اشارة $\frac{1}{ب_2}$ تكون موجبة واذن المقدار

$$(م - 1)\left(\frac{1}{ب_1} - \frac{1}{ب_2}\right)$$

يكون مقداراً سالباً وتكون البؤرة حقيقية فى الجانب الآخر من العدسة



(شكل ٦٠)

واذا كانت العدسة محدبة مستوية (شكل ٦٠ — ب) فانه يتضح طبقاً لقاعدة الاشارات أنه سواء أكان السطح المعرض للضوء هو المحدب أم المستوى فان المقدار السابق يكون سالباً أيضاً

وكذلك اذا كانت العدسة محدبة مقعرة (شكل ٦٠ — حـ) بمعنى أن أحد سطحيها محدب والآخر مقعر ونصف قطر المحدب أصغر من نصف قطر المقعر (أى التحدب يغلب التقعر) فان المقدار المذكور يكون سالباً أيضاً

وفى هذه الحالات الثلاث تكون البؤرة حقيقية فى الجانب الآخر من العدسة

أما اذا كانت العدسة مقعرة الوجهين (شكل ٦٠ — د) أو مقعرة مستوية (شكل ٦٠ — هـ) أو مقعرة محدبة (شكل ٦٠ — و) بمعنى أن تقعرها يغلب تحدبها فانه بتطبيق قاعدة الاشارات بالنسبة الى المقدارين $\frac{1}{ب_1}$ ، $\frac{1}{ب_2}$ يتبين أن المقدار الجبرى المذكور يكون مقداراً موجباً فتكون البؤرة تقديرية فى الجانب الواقع منه الضوء

وتسمى العدسة التى بؤرتها حقيقية وبعدها البؤرى سالب العدسة اللامة لأن الأشعة المتوازية الواقعة عليها بعد نفوذها منها تتجمع أو تلم فى البؤرة أما التى بؤرتها تقديرية وبعدها البؤرى موجب فانها تسمى العدسة المفرقة او المبعثرة لأن الاشعة بعد نفوذها منها تخرج متباعدة بحيث اذا مدت على استقاماتها تتلاقى امتداداتها فى الجانب الواقع منه الضوء ويتبين مما تقدم أن العدسة السميكة فى الوسط الرفيعة عند الحافة تكون لامة والعدسة الرفيعة فى الوسط السميكة عند الحافة تكون مفرقة

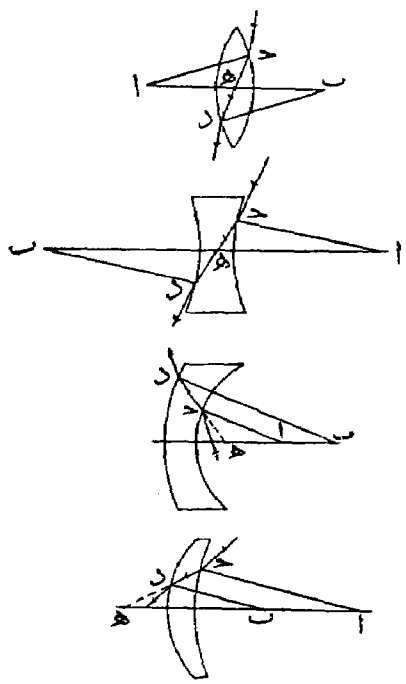
وما اطلق عليه البعد البؤرى هنا يسمى أحياناً « البعد البؤرى الثانى » وما أطلق عليه البؤرة هنا يسمى « البؤرة الرئيسية الثانية » . ويعرف « البعد البؤرى الاول » ببعد النقطة المضيئة عند ما تكون صورتها فى ما لا نهاية أى عند ما تنفذ الاشعة الواقعة منها على العدسة متوازية موازية للمحور ويمكن كما سبق بيان أن البعد البؤرى الاول للعدسة اللامة مقدار موجب فى حين أن البعد البؤرى الأول للعدسة المفرقة مقدار سالب وسنعنى فى هذا الكتاب بلفظ « البؤرة » ما يسمى أحياناً البؤرة الرئيسية الثانية و « بالبعد البؤرى » بعدها عن العدسة

٧٥ - المركز البصرى وخاصته الطبيعية

اذا فرضنا أن نقطتى ا ، ب (شكل ٦١) مركز تكور سطحين كريين يحددان عدسة ورسمنا ا حـ ، ب د نصفى قطرين متوازيين وكان المستقيم الواصل بين نقطتى حـ ، د هو أو امتداده يقطع المحور فى نقطة هـ فانه ينتج من تشابه المثلثين ا هـ حـ ، ب د هـ أن

$$\frac{\text{ا هـ}}{\text{ب هـ}} = \frac{\text{ا حـ}}{\text{ب د}} = \frac{\text{ن}_1}{\text{ن}_2}$$

باعتبار أن ن_1 رمز لنصف قطر تكور السطح الاول ، ن_2 رمز لنصف قطر تكور السطح الثانى



(شكل ٦١)

واذن تكون نقطة ه نقطة ثابتة كيفما رسم نصفا القطرين ما داما متوازيين لانها تقسم المستقيم الواصل بين المركزين من الداخل أو من الخارج بنسبة نصفى القطرين وتسمى نقطة ه المركز البصرى للعدسة

والمركز البصرى خاصة طبيعية . فالجزء التفاضلى من احد سطحى العدسة فى أية نقطة يمكن اعتباره مستوياً عمودياً على نصف القطر المرسوم عند هذه النقطة واذن يكون الجزء التفاضلى من السطح عند ح والجزء التفاضلى من السطح عند د متوازيين فاذا سقط شعاع من الضوء عند ح بحيث يخرج من العدسة عند د أمكن اعتباره كأنه يخترق جزءاً من مادة العدسة محدوداً بسطحين متوازيين فيكون مسيره بعد الخروج منها موازياً لمسيره الأول قبل الوقوع عليها ولما كان مثل هذا الشعاع يمر فى أثناء نفوذه من العدسة هو أو امتداده بالمركز البصرى أمكن القول أن الشعاع الذى يخترق العدسة ماراً هو أو امتداده بالمركز البصرى مسيره بعد نفوذه منها موازٍ لمسيره قبل وقوعه عليها

ولما كانت العدسات التى نراعيها هنا هى العدسات الرقيقة أمكن اغفال الازاحة الجانبية التى يعانيها الشعاع وهى البعد العمودى بين مسيريه المتوازيين واذن أمكن اعتبار الشعاع نافذاً خلال العدسة دون أن يتغير مسيره كأن العدسة ليست موجودة

٧٦ — ايجاد صورة نقطة مضيئة ليست على المحور

قانون العدسات الذى أثبتناه فيما سبق قد استنبط بالنسبة الى نقطة مضيئة على المحور أما اذا لم تكن النقطة موجودة على المحور فان صورتها يمكن ايجادها بتعيين مسيرى شعاعين يصدران منها بعد نفوذهما من العدسة فحيث يتلاقى هذان المسيران أو يتلاقى أحدهما وامتداد الآخر أو يتلاقى امتداداهما تكون صورة النقطة المضيئة

والخاصة الطبيعية للمركز البصرى تلك الخاصة التى بيناها فيما سبق تعين مسير أحد الأشعة الصادرة من أية نقطة مضيئة بعد نفوذه من العدسة

ويتبين مما سبق أنه اذا كانت العدسة لامة أى كان بعدها البؤرى سالباً فالأشعة الواقعة عليها

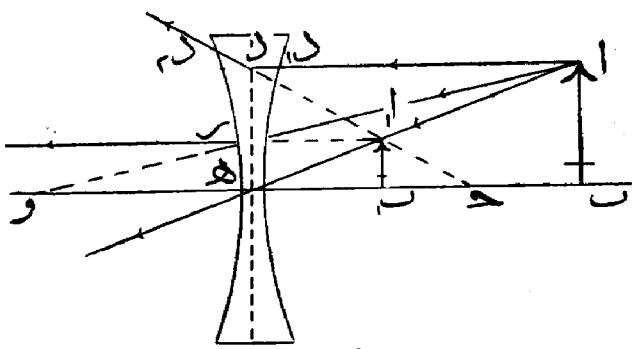
موازية للمحور تمر بعد نفوذها منها بالبؤرة ولذلك يتعين مسير أى شعاع واقع على العدسة موازياً للمحور بأنه بعد نفوذه منها يمر بالبؤرة أما اذا كانت العدسة مفرقة فان الشعاع الذى يقع موازياً للمحور ينفذ من العدسة وامتداده مار بالبؤرة

كذلك فالشعاع المار بنقطة على بعد من العدسة اللامة يساوى بعدها البؤرى (أى المار بما يسمى البؤرة الاولى للعدسة اللامة) فانه بعد نفوذه منها يكون موازيا للمحور والذى يقع على العدسة المفرقة وامتداده مار بنقطة فى الجانب الآخر منها على بعد يساوى البعد البؤرى (أى المار بما يسمى أيضاً البؤرة الأولى لها) فانه بعد نفوذه منها يكون موازياً للمحور

بهذه الكيفية يتعين مسير بضعة أشعة بعد نفوذها من العدسة ويكون موضع تقابلها اذا كانت صادرة من نقطة واحدة هو صورة هذه النقطة

٧٧ — ايجاد الصورة التى تتكون بوساطة العدسة المفرقة لجسم أمامها

لنفرض أن جسما مثل ا ب قد وضع على محور عدسة مقعرة الوجهين مثلا عمودياً عليه (كما بشكل ٦٢) ولتكن نقطة حـ بؤرة العدسة (أى البؤرة الرئيسية الثانية) ونقطة و على بعد منها فى الجانب الآخر يساوى بعدها البؤرى (أى بؤرتها الرئيسية الأولى) ولتكن نقطة ه المركز البصرى ويمكن



(شكل ٦٢)

اعتبارها فى منتصف العدسة نظراً لأن العدسة رقيقة . نرسم من نقطة ا مسير شعاع ا ه يمر بالمركز البصرى فهذا ينفذ على استقامته ثم نرسم من ا مسير شعاع مثل ا د١ يسقط موازيا للمحور فهذا يخرج من العدسة كأنه صادر من نقطة حـ ونظراً لأن العدسة رقيقة فانه سيان أن توصل د١ وهى نقطة سقوط الشعاع على السطح الاول للعدسة بنقطة حـ فيكون مسير الشعاع النافذ على استقامة حـ د١ أو أن توصل نقطة د٢ وهى نقطة تقابل امتداد ا د١ والسطح الثانى بنقطة حـ فيكون مسير الشعاع النافذ على استقامة حـ د٢ والأفضل من هذا وذاك أن يرسم من نقطه ه مستوى عمودى على المحور

يسمى المستوى الرئيسى وتوصل نقطة تقابل امتداد الشعاع الساقط وهذا المستوى ولتكن هى نقطة د بالبؤرة حـ فيكون مسير الشعاع بعد نفوذه من العدسة على امتداد حـ د

فتكون نقطة ا$_{١}$ وهى موضع تقابل امتدادى الشعاعين الخارجين من العدسة هى صورة ا فاذا اسقطنا من ا$_{١}$ العمود ا$_{١}$ ب$_{١}$ على المحور كانت نقطة ب$_{١}$ صورة نقطة ب

ويمكن اثبات أن نقطة ب$_{١}$ هى صورة نقطة ب كما يأتى

فالمثلثان حـ ا$_{١}$ ب$_{١}$ ، حـ د هـ متشابهان

$$\therefore \quad \frac{ا_{١} ب_{١}}{د هـ} = \frac{حـ ب_{١}}{حـ هـ} = \frac{ل - هـ ب_{١}}{ل}$$ باعتبار أن ل رمز للبعد البؤرى للعدسة

والمثلثان هـ ا$_{١}$ ب$_{١}$ ، هـ ا ب متشابهان

$$\therefore \quad \frac{ا_{١} ب_{١}}{ا ب} = \frac{هـ ب_{١}}{هـ ب}$$

وبما أن ا ب = د هـ

يكون $$\frac{ل - هـ ب_{١}}{ل} = \frac{هـ ب_{١}}{هـ ب}$$

وبضرب الطرفين ثم قسمة المعادلة على هـ ب . هـ ب$_{١}$. ل ينتج أن

$$\frac{١}{هـ ب_{١}} - \frac{١}{هـ ب} = \frac{١}{ل}$$

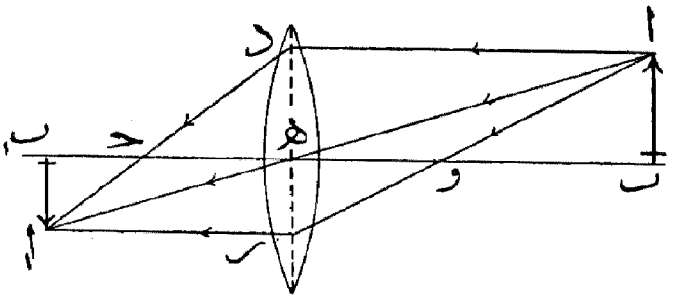
دالا ذلك على أن نقطة ب$_{١}$ هى صورة نقطة ب

ويتبين من الرسم أن الصورة تقديرية معتدلة فى الجانب الموجود فيه الجسم

ويمكن أن نرسم من نقطة ا مسير شعاع مثل ا ر يقع وامتداده مار بنقطة و فاذا كانت نقطة ر موضع تقابله والمستوى الرئيسى فان مسيره بعد نفوذه من العدسة يمر بنقطة ر ويكون موازياً للمحور فنقطة تقابل امتداد هذا الشعاع وامتداد احد الشعاعين الآخرين تكون هى أيضاً صورة النقطة ا وسنرى فيما بعد أن امتدادات الاشعة الثلاثة تتقابل فى نقطة واحدة

٧٨ — ايجاد الصورة التى تتكون بوساطة العدسة اللامة لجسم امامها

(أولا) اذا كانت الصورة حقيقية



(شكل ٦٣)

لنفرض الفروض التى تقدمت فى البند السابق مع ملاحظة أن بؤرة العدسة وهى نقطة حـ (شكل ٦٣) تكون فى الجانب الثانى من العدسة ونقطة و (وهى البؤرة الرئيسية الأولى) فى الجانب الموجود فيه الجسم وليكن د هـ ر المستوى الرئيسى وليكن موضع الجسم ا ب على بعد من العدسة أكبر من بعدها البؤرى

نرسم من ا مسير الشعاع ا هـ المار بالمركز البصرى فهذا ينفذ على استقامة ا هـ ثم نرسم مسير الشعاع ا د الساقط موازياً للمحور فيكون مسيره بعد النفوذ من العدسة فى استقامة د حـ . وهذان الشعاعان يتقابلان فعلا فى نقطة ا، تكون هى صورة ا واذا اسقط من ا، العمود ا، ب، على المحور تكون نقطة ب، صورة نقطة ب ويمكن بيان ذلك كما فى الحالة السابقة حيث ينتج أن

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{هـ\,ب} + \frac{١}{هـ\,ب_{،}}$$

وهذا يتفق والمعادلة العامة نظراً لان البعد البؤرى فى الحالة التى نحن بصددها مقدار سالب وكذلك بعد الصورة مقدار سالب

ويمكن رسم مسير الشعاع الذى يمر عند سقوطه بالنقطة و فهذا عند نفوذه من العدسة يكون مسيره موازياً للمحور وسنرى فيما يلى أن الأشعة الثلاثة تتقابل فى نقطة ا،

ويتبين من الرسم أن الصورة التى تحدث فى هذه الحالة صورة حقيقية مقلوبة فى الجانب الآخر من العدسة

(ثانياً) اذا كانت الصورة تقديرية

يوضع الجسم ا ب فى هذه الحالة بحيث يكون واقعا بين نقطة و (شكل ٦٣) والعدسة أى

بحيث يكون على بعد من العدسة أقل من بعدها البؤرى وتطبق عمليات الرسم السابقة فيرى أن الأشعة النافذة لا تتقابل فعلا وانما تتقابل امتداداتها فتكون الصورة تقديرية معتدلة فى الجانب الموجود فيه الجسم .

٧٩ — ايجاد نسبة طول الصورة الى طول الجسم — التكبير

يعرف التكبير كما فى حالة المرايا الكرية بأنه نسبة طول الصورة الى طول الجسم أو بوجه عام نسبة أى بعد طولى فى الصورة الى البعد الطولى الذى يقابله من الجسم

واذا راعينا حالة العدسة المفرقة (شكل ٦٢) يتضح من تشابه المثلثين ا١ ب١ هـ ، ا ب هـ

أن $\frac{ا_1 ب_1}{ا ب} = \frac{هـ ب_1}{هـ ب} = \frac{ع_1}{ع}$ . . . . . (١)

ومن تشابه المثلثين حـ ا١ ب١ ، حـ د هـ

أن $\frac{ا_1 ب_1}{د هـ} = \frac{ب_1 حـ}{هـ حـ} = \frac{ل - ع_1}{ل} = - \frac{ع_1 - ل}{ل}$

وبما أن د هـ = ا ب يكون

$$\frac{ا_1 ب_1}{ا ب} = - \frac{ع_1 - ل}{ل} \quad . . . . . (٢)$$

ومن تشابه المثلثين و ر هـ ، و ا ب أن

$$\frac{ر هـ}{ا ب} = \frac{و هـ}{و ب} = \frac{ل}{ع + ل}$$

وبما أن ر هـ = ا١ ب١ يكون

$$\frac{ا_1 ب_1}{ا ب} = \frac{ل}{ع + ل} \quad . . . . . (٣)$$

ويمكن بالتعويض بدلا من ل فى المعادلتين (٢) ، (٣) قيمتها المستخرجة من المعادلة

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} = \frac{١}{ل}$$

بيان أن النسب الثلاث متساوية واذن تكون نقطة ا$_{١}$ هى نقطة تقابل امتدادات الأشعة النافذة من العدسة

ويمكن ايجاد النسب المذكورة فى حالة الصور التقديرية أو الحقيقية التى تتكون بوساطة العدسة اللامة واستخراجها من تشابه المثلثات المدلول عليها بالحروف الواردة فيما تقدم ويمكن الاكتفاء بالنسب الثلاث المذكورة هنا واستخراج التكبير فى حالة العدسات اللامة منها (أى النسب) مع تطبيق قاعدة الاشارات عند التعويض فى المقادير الواردة فيها وتكون الاشارة السالبة للنسبة المستخرجة بهذه الكيفية دليلا على أن الصورة مقلوبة

٨٠ — الصور التى تتكون بوساطة العدسة الرقيقة . مواضعها وصفاتها

(أولا) العدسة اللامة

يمكن ايجاد موضع الصورة ونسبة طولها الى طول الجسم وتحديد ما اذا كانت مقلوبة او معتدلة من المعادلتين

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} = \frac{١}{-ل} \text{ و التكبير } = \frac{ع_{١}}{ع}$$

حيث يلاحظ وضع اشارة ل سالبة نظراً لان العدسة لامة واذن تكون

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} = \frac{١}{ل}$$

(١) الجسم على بعد لا نهاية له من العدسة

$$ع = \infty \quad \therefore \quad ع_{١} = -ل$$

واذن الصورة تكون فى البؤرة وهى فى الجانب الآخر من العدسة وحقيقية

(٢) الجسم على بعد اكبر من ضعف البعد البؤرى للعدسة واصغر من ما لانهاية

أى $ع > ٢ل$ و $< \infty$

$$\therefore \frac{١}{ع} < \frac{١}{٢ل} \quad ، \quad ع > \text{صفر}$$

$$\therefore \frac{١}{ع_١} - < \frac{١}{٢ل} \quad ، \quad - > \frac{١}{ل}$$

$$\therefore ع_١ < -٢ل \quad ، \quad - > -ل$$

واذن الصورة تقع فى الجانب الآخر من العدسة فهى حقيقية وعلى بعد يتراوح بين البعد البؤرى وضعفه وهى مصغرة ومقلوبة

(٣) الجسم على بعد يساوى ضعف البعد البؤرى

$$\text{أى} \quad ع = ٢ل$$

$$\therefore \quad ع_١ = -٢ل$$

واذن الصورة تقع فى الجانب الآخر من العدسة فهى حقيقية وعلى بعد يساوى ضعف البعد البؤرى وهى مساوية للجسم ومقلوبة

(٤) الجسم على بعد أصغر من ضعف البعد البؤرى واكبر من البعد البؤرى

$$\text{أى} \quad ع < ٢ل \quad ، \quad ع > ل$$

$$\therefore \quad \frac{١}{ع} < \frac{١}{٢ل} \quad ، \quad \frac{١}{ع} > \frac{١}{ل}$$

$$\therefore \quad \frac{١}{ع_١} - < \frac{١}{٢ل} \quad ، \quad ع > \text{صفر}$$

$$\therefore \quad ع_١ > -٢ل \quad ، \quad - < -\infty$$

واذن الصورة تقع فى الجانب الآخر فهى حقيقية وعلى بعد اكبر من ضعف البعد البؤرى وأقل من ما لا نهاية له وهى مكبرة مقلوبة

(٥) الجسم فى البؤرة

$$\text{أى} \quad ع = ل$$

$$\therefore \quad ع_١ = \infty$$

فالأشعة تخرج من العدسة متوازية أو الصورة تكون فى ما لا نهاية له

(٦) الجسم بين البؤرة والعدسة

أى ع < ل ، ع > صفر

∴ $\frac{١}{ع}$ > $\frac{١}{ل}$ ، ع < ∞

∴ $\frac{١}{ع_{١}}$ مقدار موجب أقل قيمة من $\frac{١}{ع}$

∴ $ع_{١}$ مقدار موجب أكبر قيمة من ع

واذن الصورة فى الجانب الموجود فيه الجسم فهى تقديرية وعلى بعد أكبر من بعد الجسم وهى مكبرة ومعتدلة

(ثانياً) العدسة المفرقة

فى هذه الحالة المعادلة الدالة على علاقة بعد الجسم عن العدسة وبعد صورته عنها هى

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} = \frac{١}{ل}$$ حيث تكون اشارة ل موجبة

واذن أيا كانت قيمة ع فما دامت موجبة فان قيمة $\frac{١}{ع_{١}}$ موجبة وأكبر من قيمة $\frac{١}{ع}$ واذن قيمة $ع_{١}$ تكون موجبة وأصغر من قيمة ع

واذن الصورة تكون فى الجانب الموجود فيه الجسم فهى تقديرية وتكون مصغرة معتدلة

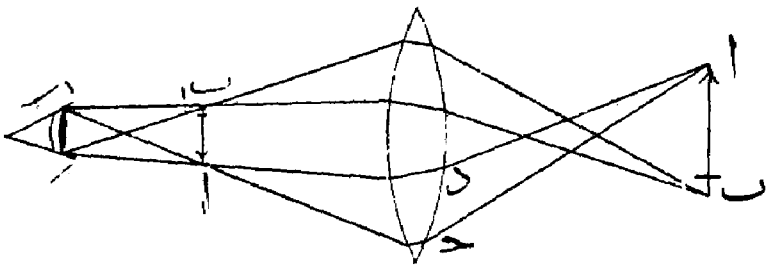
٨١ — رسم مسير الاشعة التى ترى العين بها صورة تحدث بوساطة عدسة

(أولا) اذا كانت العدسة لامة والصورة حقيقية

نفرض أن ا ب (شكل ٦٤) الجسم ولتعين صورته $ا_{١}$ $ب_{١}$ اما بالرسم واما بتطبيق القانون فالعين فى وضعها المبين بالشكل ترى نقطة مثل $ا_{١}$ من جراء وقوع مخروط الاشعة الذى رأسه عند $ا_{١}$ عليها فاذا مدت هذه الأشعة حتى تقطع سطح العدسة أو بالأحرى المستوى الرئيسى ثم وصلت نقط تقابلها وهذا المستوى بنقطة ا تكون المخروط ا ح د فهذا بعد نفوذه من العدسة يلم فى نقطة

ا ب يقع على العين واذن يمثل الاشعة التى ترى العين بها الصورة

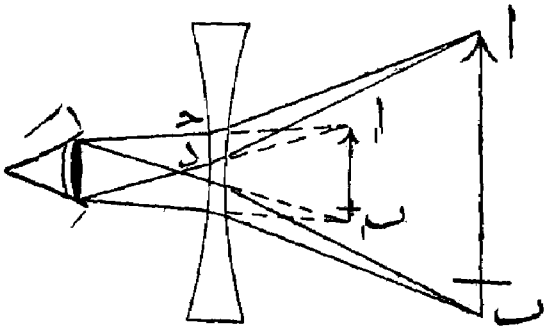
وبالمثل يمكن رسم مخروط الأشعة التى ترى العين بها صورة أية نقطة أخرى



(شكل ٦٤)

(ثانياً) اذا كانت الصورة تقديرية

نفرض أن الصورة التقديرية تتكون بوساطة عدسة مفرقة وليكن ا ب الجسم (شكل ٦٥) ثم نعين صورته ا ب اما بالرسم واما بتطبيق القانون



(شكل ٦٥)

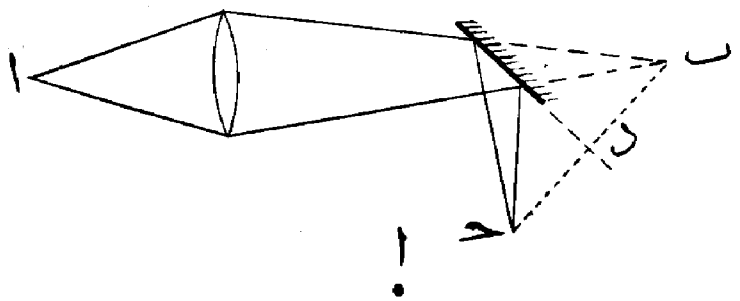
فالعين فى موضعها المبين بالشكل ترى الصورة ا ب بمخروط من الاشعة يمر امتداده بنقطة ا فاذا رسم هذا المخروط تقابل والعدسة أو بالأحرى مستواها الرئيسى فى نقط اذا وصلت بنقطة ا تكون المخروط ا حـ د فهذا بعد نفوذه من العدسة يقع على العين كأنه صادر من نقطة ا فهو يمثل اذن الاشعة التى ترى العين بها الصورة ا وبالمثل يمكن رسم مخروط الأشعة التى ترى العين بها صورة أية نقطة أخرى

٨٢ — الصور الحقيقية التى قد تتكون بالانعكاس عن سطح مرآة مستوية أو محدبة أو بفعل عدسة مفرقة

الصور التى تتكون بالانعكاس عن سطح مرآة مستوية أو مرآة كرية محدبة أو بفعل عدسة مفرقة للاجسام الموجودة أمامها والتى تصدر منها فعلا الاشعة الساقطة تكون دائما صوراً تقديرية ولكن قد يحدث احيانا أن الاشعة تسقط على سطح المرآة المستوية أو المحدبة أو على سطح العدسة المفرقة ولا تكون صادرة من نقطة أمامها وانما تمر امتداداتها بنقطة خلف سطح المرآة أو فى الجانب الآخر من العدسة وتكون هذه النقطة بمثابة « جسم تقديرى » فتتكون لهذا الجسم

التقديرى صورة حقيقية

فاذا فرضنا أن عدسة لامة أحدثت لجسم وليكن نقطة مضيئة عند ا (شكل ٦٦) صوره حقيقية عند ب ووضعت مرآة مستوية مثلا بين الصورة والعدسة اللامة وكان السطح العاكس للمرآة متجهاً قبل العدسة فالاشعة الواقعة على المرآة كانت تتقابل عند ب لولا وجود المرآة فنقطة ب يمكن أن نعدها جسما تقديريا



(شكل ٦٦)

بالنسبة الى المرآة . فاذا اسقطنا من ب العمود ب د على سطح المرآة أو امتداده ومددنا العمود الى نقطة حـ بحيث يكون ب د = حـ د فان نقطة حـ تكون الصورة الحادثة بالانعكاس للجسم التقديرى ب وهذه الصورة حقيقية أمام السطح العاكس . ويمكن اثبات أن نقطة حـ صورة لنقطة ب باثبات أن الزاوية بين اى شعاع يسقط على سطح المرآة المستوية وبين العمود المقام من نقطة السقوط على هذا السطح تساوى الزاوية بين هذا العمود وبين المستقيم الواصل من نقطة السقوط الى نقطة حـ

واذا وضعنا بدلا من المرآة المستوية مرآة كرية محدبة سطحها العاكس قبل العدسة بحيث يكون محورها منطبقاً على محور العدسة أو يكاد ، أمكن فى هذه الحالة أيضاً اعتبار نقطة ب جسما تقديرياً بالنسبة الى المرآة المحدبة ويكون بعد هذا الجسم عن قطب المرآة طبقاً لقاعدة الاشارات مقداراً سالباً واذن تكون علاقة بعد الصورة ببعد الجسم طبقاً للمعادلة

$$\frac{١}{\text{ع}_١} = \frac{١}{\text{ع}} + \frac{١}{-\text{ل}}$$

حيث تكون اشارة ل أيضاً سالبة

$$\therefore \quad \frac{١}{\text{ع}_١} = \frac{١}{\text{ع}} - \frac{١}{\text{ل}}$$

فاذا كانت ع < ل تكون قيمة ع$_{١}$ موجبة واذن تكون الصورة الحادثة حقيقية أما اذا كانت ع > ل فان قيمة ع$_{١}$ تكون سالبة وتكون الصورة تقديرية

كذلك اذا وضعت بدلا من المرآة عدسة مفرقة ينطبق محورها على محور العدسة اللامة فانه يمكن اعتبار نقطة ب جسما تقديريا بالنسبة الى العدسة المفرقة ويكون بعد هذا الجسم عن هذه العدسة مقداراً سالبا وتكون علاقة بعد الجسم عن العدسة ببعد الصورة طبقا للمعادلة

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} = \frac{١}{ل} \quad \text{(حيث يلاحظ أن البعد البؤرى موجب)}$$

$$\therefore \frac{١}{ع_{١}} = \frac{١}{ع} - \frac{١}{ل}$$

فتكون قيمه ع$_{١}$ سالبة اذا كانت ع < ل وفى هذه الحالة لاتكون الصورة فى الجانب الذى يقع منه الضوء وانما فى الجانب الآخر حيث يقاس بعد الصورة عن العدسة فى اتجاه الاشعة الساقطة عليها وتكون الصورة حقيقية . أما اذا كانت ع > ل فان الصورة تكون تقديرية

٨٣ — القطعة المركبة من عدستين متلاصقتين

فى كثير من الاجهزة المعتادة ولاسباب خاصة سيأتى بيانها فيما بعد تستخدم قطعة مركبة من عدستين قد تكونان متلاصقتين وقد تكونان منفصلتين بينهما مسافة

فاذا راعينا حالة العدستين المتلاصقتين ورمزنا لبعديهما البؤريين بالرمزين ل$_{١}$ ، ل$_{٢}$ وفرضنا أن جسما موضوعا على بعد من الاولى نرمز له بالحرف ع فانه يتكون من انكسار الضوء خلال العدسة الاولى صورة اذا رمزنا لبعدها عن العدسة الاولى بالحرف س يكون

$$\frac{١}{ل_{١}} = \frac{١}{ع} - \frac{١}{س}$$

$$\therefore \frac{١}{ل_{١}} = \frac{١}{ع} + \frac{١}{س} \quad \ldots\ldots (١)$$

وهذه الصورة تعتبر جسما بالنسبة الى العدسة الثانية ونظراً لأن العدستين متلاصقتان يكون بعده عنها س أيضاً فاذا رمزنا لبعد الصورة التي تحدث من جراء انكسار الضوء خلال هذه العدسة بالرمز ع$_{١}$ يكون

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{س} = \frac{١}{ل_{٢}}$$

وبالتعويض عن س قيمتها من المعادلة (١) ينتج أن

$$\frac{١}{ع_{١}} - \frac{١}{ع} + \frac{١}{ل_{١}} = \frac{١}{ل_{٢}}$$

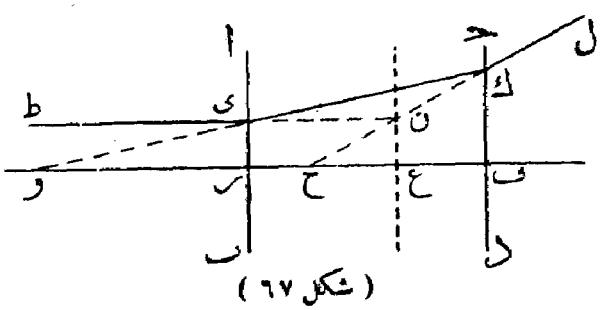
اذن نرى ان العدستين معا يعملان عمل عدسة مفردة بعد ها البؤرى ل يتعين من المعادلة

$$\frac{١}{ل} = \frac{١}{ل_{١}} + \frac{١}{ل_{٢}}$$

٨٤ – القطعة المركبة من عدستين منفصلتين – العدسة المكافئة

أما اذا كانت القطعة مركبة من عدستين منفصلتين وكان محوراهما منطبقين فانها لا تعمل عمل العدسة المفردة من جميع الوجوه أى لا يمكن أن تستبدل بالعدستين عدسة مفردة تقوم مقامهما فى تكوين صورة كالصورة التى تحدث بوساطة العدستين نوعاً ووضعاً أيا كان موضع الجسم . ولكن بالرغم من هذا توجد عدسة مفردة تعمل عمل العدستين من وجهة خاصة وهى أنها تحرف الشعاع الذى يقع موازياً للمحور بقدر ما تحرفه العدستان معا وتسمى « العدسة المكافئة » (١)

فاذا فرضنا أن ا ب ، حـ د (شكل ٦٧) ل العدستان أو بالأحرى مستواهما الرئيسيان ، و ف محورهما المشترك وأسقطنا الشعاع ط ى على الأولى موازيا للمحور فانحرف عند



(شكل ٦٧)

(١) Eguivalent lens

نفوذه منها فى استقامة ى ك ثم انحرف عند نفوذه فى الثانية فى استقامة ك ل وكان امتداد ط ى يقطع امتداد ل ك فى نقطة ن يتبين من الشكل أنه اذا وضعت عدسة مفردة عند ن بحيث يكون مستواها الرئيسى ن ع وكانت بؤرتها نقطة ح (موضع تقابل امتداد ل ك والمحور) فان هذه العدسة على حدتها تحرف الشعاع ط ى عند وقوعه عليها بحيث ينفذ منها فى استقامة ن ك ل فتكون هى العدسة المكافئة

ويتبين من هذا ان للعدسة المكافئة بعداً بؤرياً معيناً ولها موضع معين يلزم وضعها فيه ولأيجاد بعدها البؤرى نرمز للبعد البؤرى للعدسة الاولى ا ب بالرمز $د_١$ وللثانية بالرمز $د_٢$ وللبعد بين العدستين بالحرف ء ونمد ك ى حتى يقطع المحور فى نقطة و (حيث تكون هذه النقطة بؤرة العدسة الاولى) فالشعاع ى ك الواقع على العدسة الثانية يقع عليها كأنه صادر من نقطة و وينفذ منها كأنه صادر من نقطة ح ولذلك يمكن اعتبار نقطة و جسما بالنسبة الى العدسه الثانية ونقطة ح الصورة التى تتكون بوساطتها فاذا رمزنا لبعدها عنها بالحرف $ع_١$ يكون

$$\frac{١}{ع_١} - \frac{١}{د_١ + ء} = \frac{١}{د_٢}$$

$$\therefore \quad \frac{١}{ع_١} = \frac{د_١ + د_٢ + ء}{د_٢ (د_١ + ء)}$$

$$\therefore \quad ع_١ = \frac{د_٢ (د_١ + ء)}{د_١ + د_٢ + ء} \quad \ldots\ldots (١)$$

فاذا رمزنا للبعد ع ح وهو البعد البؤرى للمكافئة بالحرف د يتضح من تشابه المثلثين ح ن ع ، ح ك ف أن

$$\frac{د}{ع_١} = \frac{ع ن}{ف ك}$$

ومن تشابه المثلثين و ى ر ، و ك ف أن

$$\frac{\text{ر ى}}{\text{ف ك}} = \frac{\text{ل}_{١}^{٢}}{\text{ل}_{١} + \text{ء}} \quad \text{وبما أن} \quad \text{ر ى} = \text{ع ن}$$

$$\text{يكون} \quad \frac{\text{ل}}{\text{ع}_{١}} = \frac{\text{ل}_{١}^{٢}}{\text{ل}_{١} + \text{ء}}$$

وبالتعويض عن $\text{ع}_{١}$ قيمتها من المعادلة (١) ينتج أن

$$\text{ل} = \frac{\text{ل}_{١}^{٢}\,\text{ل}}{\text{ل}_{١} + \text{ل}_{٢} + \text{ء}} \quad \ldots\ldots \quad (٢)$$

$$\text{أو} \quad \frac{١}{\text{ل}} = \frac{١}{\text{ل}_{١}} + \frac{١}{\text{ل}_{٢}} + \frac{\text{ء}}{\text{ل}_{١}\,\text{ل}_{٢}} \quad \ldots\ldots \quad (٣)$$

وبعد المكافئة عن العدسة الثانية حـ د هو

$$\text{ف ع} = \text{ع}_{١} - \text{ل}$$

ومن معادلتى (١) ، (٢) ينتج أن

$$\text{ف ع} = \frac{\text{ل}_{٢}^{٢}\,\text{ء}}{\text{ل}_{١} + \text{ل}_{٢} + \text{ء}} = \frac{\text{ل}\,\text{ء}}{\text{ل}_{١}} \quad \ldots \quad (٤)$$

ومن المعادلة (٤) يتضح أن بعد المكافئة عن العدسة الثانية يساوى حاصل ضرب البعد البؤرى للمكافئة فى البعد بين العدستين مقسوماً على البعد البؤرى للعدسة الأولى

والعدسة المكافئة لها خاصة طبيعية تتضح اذا تصورنا أن الشعاع ط ى ك ل قد عكس مسيره ، اذن هو ينفذ من العدستين أو من المكافئة وحدها فى استقامة ى ط فاذا كان الشعاع واقعاً على العدسة حـ د من رأس جسم كانت صورة رأس الجسم واقعة على استقامة ط ى سواء أكانت الصورة حادثة بفعل العدستين أم بفعل العدسة المكافئة وحدها واذن يكون ارتفاع الصورة التى تتكون بوساطة المكافئة وحدها كارتفاع الصورة التى تتكون بوساطة العدستين أى أن العدسة المكافئة تحدث صورة تساوى فى الكبر الصورة النهائية التى تحدث بوساطة العدستين