

الباب الثالث

الانكسار عند السطوح المستوية والسطوح الكرية وخلال العدسات

٤١ - قانون الانكسار

إذا وقعت أشعة الضوء المستقيمة من وسط شفاف كالهواء مثلاً إلى وسط آخر شفاف كالماء أو الزجاج مثلاً فإن أشعته في الوسط الثاني وإن كانت خطوطاً مستقيمة لا تكون في سمت أشعته في الوسط الأول بل تنعطف عند السطح الفاصل بين الوسطين وانعطافها هذا يسمى انكساراً. وإذا في 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 في الوسط الثاني فيسمى الشعاع المنكسر والزاوية بينه وبين العمود فتسمى زاوية الانكسار.

وينقاد انكسار الضوء إلى قانونين ينص الأول على أن الشعاع الساقط والعمود والشعاع المنكسر في مستوى واحد.

وينص القانون الثاني على أن نسبة جيب زاوية السقوط إلى جيب زاوية الانكسار لشعاع من ضوء ذي لون واحد، واحدة لكل وسطين، وسنرجى التعرض إلى علاقة هذه النسبة بلون الأشعة إلى مواضع أخرى من هذا الكتاب.

وظاهرة الانكسار كانت معروفة من قديم الزمان وقد حاول عبثاً كثير من الأقدمين الكشف عن علاقة زاوية السقوط بزاوية الانكسار وأول من كشف العلاقة الصحيحة بين الزاويتين « سنل »^(١) اذ اهتمدى سنة ١٦٢١ إلى معرفة أن نسبة قاطع التمام لزاوية السقوط إلى قاطع التمام

لزاوية الانكسار ثابتة لكل وسطين وصاغ ديكارت ^(١) هذه العلاقة في صيغتها المعروفة في الوقت الحاضر . ويعرف القانون الثاني أحياناً بقانون « سنل » نسبة الى كاشفه

٤٢ — الاستدلال عملياً على صحة قانوني الانكسار

وتوجد تجارب ومشاهدات تبين صحة هذين القانونين فإذا أخذت كتلة من الزجاج على شكل متوازي مستطيلات ووضعت على قطعة من الورق الابيض قد بسطت على لوح أفقي من الخشب وكان عند منتصف أحد جوانبها الرأسية خط رأسى قد رسم بقلم شمعى ^(٢) (أو كان به خدش رأسى خدش بسن من الماس) أمكن بالنظر الى الجانب الموازى رؤية الخط أو الخدش وتحديد خط البصر بدبوسين رأسيين . فإذا عيّنت على الورقة جوانب متوازي المستطيلات بقلم من الرصاص وعين موضع الخط أو الخدش ووصل سما دبوسين بمستقيم ومد حتى يتقابل والمستقيم الذى يعين جانب متوازي المستطيلات فى نقطة ووصلت هذه النقطة بموضع الخط أو الخدش المذكور كان المستقيم الاخير هذا بمثابة مسير شعاع ساقط داخل متوازي المستطيلات والمستقيم الواصل بين سمى دبوسين بمثابة الشعاع المنكسر . فإذا رسم العمود على السطح عند نقطة السقوط أمكن قياس زاويتي السقوط والانكسار واستخراج جيب كل واحدة منهما من الجداول ثم إيجاد النسبة بين الجيبين . أو اذا ركز عند نقطة السقوط وأخذ بعدان متساويان أحدهما على الشعاع الساقط والآخر على المنكسر ورسم من نهايتهما عمودان على العمود المرسوم على السطح عند نقطة السقوط كانت النسبة بين طولى هذين العمودين مساوية النسبة بين جيبى الزاويتين فإذا 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 هذا دليل على صحة قانون « سنل »

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

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 بمرکز القرص وينطبق سطحها المستوى على المستقيم الواصل بين علامتى درجة التسعين . وتصوب حزمة ضيقة من أشعة الشمس مثلاً بحيث تسقط على هذا السطح عند مرکز القرص فتتكسر الحزمة خلال كتلة الزجاج حتى اذا بلغت سطحها المستدير وقعت عليه على امتداد نصف القطر فتكون زاوية سقوطها صفراً وزاوية انكسارها صفراً فتتخذ 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 قيمتهما 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 والملاحظات 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 بمعامل 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

وإذا كان معامل الانكسار من أحد الوسطين إلى الآخر أكبر من الواحد أى إذا 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 إلى آخر أكبر كثافة فإن 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 مثلاً بمعنى كتلة وحدة الحجم 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

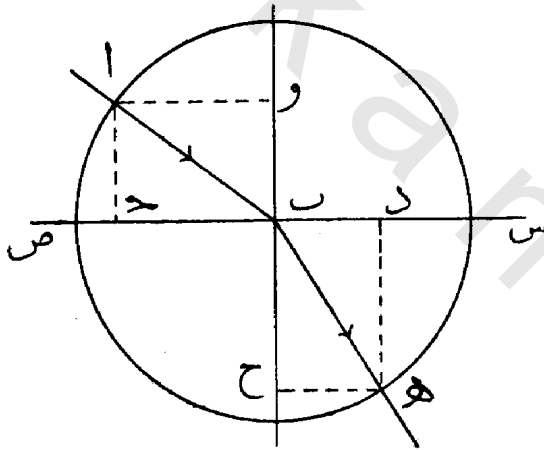
وان كانت الطرق التى يوجد بها معامل الانكسار سياتى شرحها فيما بعد فبالجدول الآتى ذكر معامل انكسار الضوء فى بعض المواد المألوفة . ولما كان معامل الانكسار يتوقف على لون الأشعة الضوئية (وقد أشرنا إلى ذلك فيما سبق) فإن ما هو مدرج بالجدول هو معامل انكسار ضوء لُهب الصود يوم وهو ضوء أصفر بسيط يمكن أن يعتبر ذا لون واحد

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

٤٤ - الطريقة الهندسية لرسم الشعاع المنكسر

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

فإذا فرضنا أن ab (شكل ٣٣) شعاع يسقط على السطح المستوي s عن الفاصل بين الوسطين نركز عند نقطة السقوط b ونرسم دائرة تقطع الشعاع الساقط في نقطة a ثم نسقط من a العمود ac على السطح وتأخذ نقطة مثل d في الجانب الآخر من نقطة b بحيث تكون نسبة $\frac{ab}{bd}$ مساوية معامل الانكسار من الوسط الاول الى الثاني ، ونرسم من d العمود de على السطح بحيث يقطع في الوسط الثاني محيط الدائرة في نقطة e ، ثم نصل بين b و e بمستقيم يكون هو مسير الشعاع المنكسر



(شكل ٣٣)

ولاثبات هذا نرسم العمود على السطح من نقطة السقوط ونسقط عليه العمودين a و e h فتكون

$$\frac{ab}{bd} = \frac{ao}{oh} = \frac{ca}{eh}$$

ويساوى هذا معامل الانكسار من الوسط

الاول الى الثاني وبما أن زاوية ab و زاوية

السقوط تكون زاوية eh ح زاوية الانكسار ويكون b ه مسير الشعاع المنكسر

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

لنفرض أن ab (شكل ٣٤) يمثل مسير الشعاع الساقط من الوسط الاول على السطح المستوي الفاصل بين الوسطين ولكن هذا السطح s ص نركز في نقطة السقوط b ونرسم دائرتين متحدتي المركز والنسبة بين نصفتي قطريهما مساوية معامل الانكسار ولنفرض أن الدائرة الاولى تقطع الشعاع الساقط في نقطة a والثانية تقطعه في نقطة d والنسبة $\frac{ab}{bd}$ مساوية معامل الانكسار من الوسط الاول الى الثاني (ولنرمز له بالحرف m) . ثم نرسم من d العمود de على السطح ونمده

فإذا اتخذنا توازي الشعاعين $ا ب$ و $د ح$ كحقيقة تستنبط عملياً بالتجربة ورسمنا عند $ب$ العمود $ه و$ وعند $ح$ العمود $ح ي$ كانت زاوية $ا ب ه$ مساوية زاوية $د ح ي$ زاوية $ح ب و$ مساوية زاوية $ب ح ح$

فإذا رمزنا لمعامل الانكسار من الوسط الأول الواقع منه الضوء (الهواء مثلاً) الى الثاني (الزجاج مثلاً) بالرمز $٢,١$ ومن الثاني الى الاول بالرمز $١,٢$

$$\frac{\text{ح ا د ا ب ه}}{\text{ح ا د ح ب و}} = ٢,١ \quad \text{فان}$$

$$\frac{\text{ح ا د ح ح}}{\text{ح ا د د ح ي}} = ١,٢ \quad \text{و}$$

$$\frac{١}{٢,١} = ١,٢ \quad \therefore$$

فإذا قيل مثلاً أن معامل انكسار الضوء من الهواء الى الزجاج ٢ فان معامل انكساره من الزجاج الى الهواء يكون $\frac{١}{٢}$

٤٦ - قاعدة قبول العكس

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

وانطبق قاعدة قبول العكس في الانعكاس نتيجة لازمة لقانونى الانعكاس

ولما كانت زاوية ابو = زاوية هـ دن

$$6 \text{ « ح ح » = « ب ح ط »}$$

$$6 \text{ « د ح ي » = « ح د ك »}$$

$$1 = r_{12} \times r_{23} \times r_{34} \dots$$

فاذا عرف معامل الانكسار من وسط ما الى آخر ومن أحدهما الى وسط ثالث أمكن

بتطبيق هذه المعادلة إيجاد معامل الانكسار من الثاني الى الثالث

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

$$1 = r_{12} \times \dots \times r_{n-1,n}$$

٤٨ — الزاوية الحرجة والانعكاس الكلى

اذا رمزنا لزاوية السقوط في وسط كالهواء الحرف u ولزاوية الانكسار في وسط كالماء

بالحرف v ولمعامل الانكسار من الأول الى الثاني بالحرف m فان

$$m = \frac{\sin u}{\sin v}$$

فاذا كان الوسط الأول أقل كثافة ضوئية من الثاني أى كانت $u < v$ فانه وان ازدادت

زاوية الانكسار تبعاً لازدياد زاوية السقوط فان هذه تبلغ القائمة في حين أن زاوية الانكسار

تكون لها قيمة أصغر من القائمة تتعين من المعادلة

$$m = \frac{1}{\sin v}$$

أى تكون قيمتها $\sin^{-1} \left(\frac{1}{m} \right)$

وتسمى زاوية الانكسار في هذه الحالة (أى عند ما تكون زاوية السقوط في الوسط الأقل

كثافة قائمة) تسمى « الزاوية الحرجة » ^(١) ويكون جيها مساوياً لمقلوب معامل الانكسار من

الوسط الأول الى الوسط الثاني

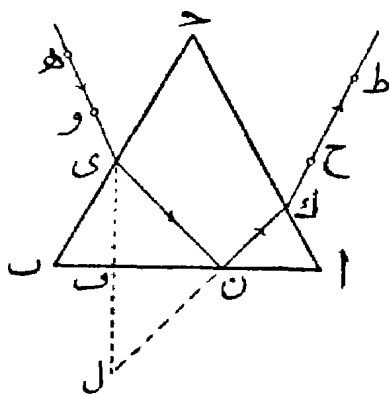
وإذا كان مسير الضوء من الوسط الاكبر كثافة الى الوسط الاقل كثافة وأخذت زاوية السقوط في الاول تزداد بالتدريج من الصفر فان زاوية الانكسار في الثاني تزداد أيضاً تبعاً لذلك حتى اذا بلغت زاوية السقوط في الوسط الاول قيمة الزاوية الحرجة خرج الشعاع في الوسط الثاني وزاوية انكساره قائمة فاذا تجاوزت زاوية السقوط في 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 لقانوني الانعكاس ويسمى « انعكاساً كلياً » (١) تميزاً له عن الانعكاس الذي 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 في الحالات المعتادة حيث يكون مصحوباً بالانكسار ويمكن تعيين قيمة الزاوية الحرجة اذا علم معامل الانكسار. فالزاوية الحرجة في الماء بالنسبة الى الهواء تساوي $48^{\circ} 6'$ بالتقريب وهي في الزجاج بالنسبة الى الهواء $41^{\circ} 6'$ بالتقريب ويترتب على أن الزاوية الحرجة في الماء $48^{\circ} 6'$ انه اذا غمرت العين في الماء يتراعى للرأي أن الكائنات الموجودة خارج الماء محصورة في منطقة معينة هي مخروط رأسه عند العين ونصف زاوية رأسه تساوي الزاوية الحرجة لأن الشعاع الواصل الى العين منطبقاً على سطح هذا المخروط تكون زاوية سقوطه في الهواء قائمة فاذا كانت لزاوية السقوط في الهواء أية قيمة أخرى أقل من القائمة كان الشعاع المنكسر الواصل الى العين واقعاً بين محور المخروط وسطحه المنحني

٤٩ - بعض تطبيقات الانعكاس الكلي

وللانعكاس الكلي تطبيقات عملية فعند ما يراد حرف الاشعة عن مسيرها بزاوية قائمة يؤخذ عادة منشور من الزجاج (شكل ٣٧) قائم الزاوية عند ا وكل من زاويتي ب و ح نصف قائمة فاذا وقع على السطح ا ب شعاع مثل د ه عمودياً عليه فانه ينفذ في مادة المنشور

ح ط فالمستقيم الواصل بين سمى الدبوسين الاولين وهو ه وى يمثل شعاعاً ساقطاً على السطح
 ب > وهذا ينكسر داخل متوازي 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
 بى ثم وصلت نقطة ل بنقطة ك وقطع المستقيم الواصل بينهما ا ب فى نقطة ن فان مسار
 الشعاع داخل متوازي المستطيلات يكون بى ن ك حيث يسهل بيان أن بى ن ك ن يميلان
 بزوايتين متساويتين على ا ب واذن يميلان بزوايتين متساويتين على العمود المقام على السطح
 ا ب عند ن فيكون بى ن بمثابة الشعاع الساقط ه ن ك بمثابة الشعاع المنعكس ويمكن التحقق
 عملياً من أن نسبة الجيب الزاوية بين هى وبين العمود المقام على السطح ب > عند بى الى جيب
 الزاوية بين هذا العمود وبين المستقيم بى ن مساوية نسبة الجيب 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 انعكاساً كلياً داخل منشور ثلاثى من الزجاج فاذا
 فرضنا أن ا ب > (شكل ٣٩) يمثل منشوراً ثلاثياً قائماً موضوعاً على ورقة مبسوطة فوق
 لوح أفقى من الخشب ورشق دبوسان رأسيان عند ه و و ونظر الى الجانب ا > بحيث ترى صورتنا



(شكل ٣٩)

الدبوسين الحادثتين بالانعكاس عند السطح ا ب تريان
 على استقامة واحدة وعين خط البصر بدبوسين آخرين
 عند ح ط ثم مد المستقيم الواصل بين سمى ه و و
 حتى يتقابل والسطح ب > فى نقطة بى ومد المستقيم
 الواصل بين سمى ح ط حتى يتقابل والسطح ا > فى
 نقطة ك واسقط من نقطة بى العمود بى ف ل على

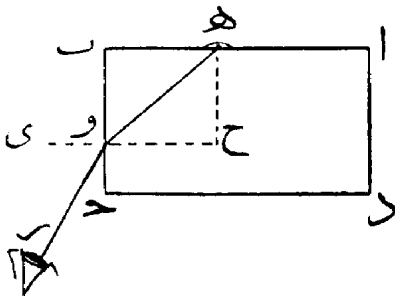
ا ب وأخذت عليه نقطة ل بحيث يكون بى ف مساوياً ف ل ووصلت نقطة ل بنقطة ك ورمز
 لنقطة تقابل المستقيم ل ك والسطح ا ب بالحرف ن كان بى ن مسار الشعاع داخل المنشور

في أثناء سقوطه على السطح ab فإن مسيره بعد الانعكاس عنه
ويلاحظ في كلتي التجربتين أن زاوية سقوط الشعاع y ن على السطح ab يجب أن
تكون أكبر من الزاوية الحرجة لكي يحدث الانعكاس الكلي. فإذا وضع الدبوسان $هـ$ و $و$
حيثما اتفق فقد لا تكون الزاوية كذلك. ولذلك يستحسن عند إجراء التجربة تغيير موضع
متوازي المستطيلات أو المنشور في أثناء البحث عن صورتي الدبوسين حتى ترى الصورتان في
حالة متوازي المستطيلات عند النظر إلى الوجه ad (شكل ٣٨) أو في حالة المنشور عند النظر
إلى الوجه $a >$ (شكل ٣٩)

٥١ — طريقة الزاوية الحرجة لإيجاد معامل انكسار السائل

نفرض أن $ab >$ (شكل ٤٠) يمثل متوازي مستطيلات من الزجاج موضوع على
صحيفة من الورق مبسوطة فوق لوح أفقي من الخشب ولنفرض عند $هـ$ ابرة رأسية ملتصقة
بالسطح ab من متوازي المستطيلات ولتكن الابرة مبللة بالماء (أو بالسائل المطلوب إيجاد
معامل انكساره باعتبار أنه أقل كثافة ضوئية من الزجاج) بحيث تعتبر كأنها مغمورة في قطرة
من السائل

فإذا نظر إلى الوجه $b >$ أمكن في أوضاع خاصة للعين أن ترى صورة الابرة، فمثلاً إذا



(شكل ٤٠)

كان الضوء الصادر منها يقع خلال الماء على السطح
 ab فينكسر خلال الزجاج في استقامة $هـ$ و ثم يقع
على السطح $b >$ وينكسر خارجاً إلى الهواء في استقامة
ورفاته إذا وضعت العين على امتداد هذا المستقيم أمكن
رؤية الصورة ولكن إذا تحركت العين من موضعها

المبين بالشكل نحو الحرف b لمتوازي المستطيلات فإن هذا يترتب عليه أن الأشعة الواصلة
إلى العين تكون زاوية انكسارها عند خروجها من السطح $b >$ إلى الهواء وهي زاوية
 y و أصغر واذن تكون زاوية سقوطها على السطح $b >$ وهي زاوية $هـ$ و ح أصغر واذن

تكون زاوية انكسارها عند نفوذها من القطرة الى داخل متوازي المستطيلات وهي زاوية وه 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 في الزجاج عند ما تكون زاوية السقوط في القطرة قائمة وتكون هي الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى مادة القطرة . واذن يتضح أن الاستمرار في تحريك العين نحو الحرف ب يجعلها تصل الى موضع معين تحتقن عنده الصورة وتظل محتفية بعد ذلك وتكون المواضع التي ترى فيها الصورة محصورة بين هذا الموضع وامتداد السطح ب ح من ناحية ح فاذا فرضنا أن (شكل ٤٠) يمثل الموضع الذي عنده تبدىء الصورة في الاختفاء اذا تحركت العين من ناحية ح نحو ب أو عنده تبدىء في الظهور اذا تحركت العين من ناحية ب نحو ح ورمزنا لمعامل الانكسار من مادة القطرة (الماء مثلاً) الى الزجاج بالرمز $\mu_{\text{ج}}$ يكون

$$\mu_{\text{ج}} = \frac{1}{\text{ح د و ه ح}}$$

$$\mu_{\text{ج}} \times \mu_{\text{ه}} \times \mu_{\text{د}} = 1 \quad \text{ولما كان}$$

باعتبار أن $\mu_{\text{ه}}$ معامل الانكسار من الهواء الى مادة القطرة ، $\mu_{\text{د}}$ معاملته من الزجاج الى الهواء يكون

$$\mu_{\text{ج}} = \frac{1}{\text{ح د و ه ح} \mu_{\text{ه}}}$$

فاذا قيست هذه الزاوية وعرفت قيمة $\mu_{\text{ج}}$ أمكن إيجاد معامل الانكسار لمادة القطرة ولأجراء هذه التجربة يوضع متوازي مستطيلات من الزجاج على صحيفة من الورق مبسوطة فوق لوح أفقي من الخشب وتحدد جوانبه اب ح د بالقلم الرصاص ثم تبلل ابرة بالسائل المراد إيجاد معامل انكساره وليكن الماء مثلاً وتوضع بحيث تلتصق بالسطح اب وقد يكفي التوتر السطحي للسائل لجعلها تلتصق بالسطح والا فيستحسن أن تبل قطعة صغيرة من ورق النشاف أو الترشيح بالسائل ويستعان بها في لصق الابر بالسطح وجعلها مبتلة بالسائل في أثناء

كانت زاوية انكساره صغيرة وتكون زاوية سقوطه على السطح γ صغيرة أيضاً فإذا كانت أقل من الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى الهواء خرج الشعاع $\mathcal{K}$ الى الطبقة الهوائية فينكسر خلال اللوح الثانى وينفذ من الجانب الآخر منه فى استقامة $\mathcal{M}$. ولكن اذا كبرت زاوية سقوط الشعاع $\mathcal{P}$ بالتدريج كبرت أيضاً زاوية سقوط الشعاع $\mathcal{Y}$ $\mathcal{K}$ حتى اذا بلغت هذه ، قيمة الزاوية الحرجة للزجاج بالنسبة الى الهواء امتنع سقوط الشعاع $\mathcal{K}$ على سطح اللوح الثانى وامتنع بذلك نفوذ الشعاع خلال الخلية الى الجانب الآخر . ويمثل $\mathcal{P}$ $\mathcal{Y}$ $\mathcal{K}$ $\mathcal{L}$ مسير شعاع يسقط على السطح γ بزاوية سقوط تساوى الزاوية الحرجة حيث يكون الشعاع $\mathcal{K}$ $\mathcal{L}$ ملاصقاً للسطح γ . ويمثل $\mathcal{P}$ $\mathcal{Y}$ $\mathcal{K}$ $\mathcal{L}$ مسير شعاع يسقط على السطح γ بزاوية سقوط اكبر من الزاوية الحرجة فينعكس انعكاساً كلياً فى استقامة $\mathcal{K}$ $\mathcal{L}$

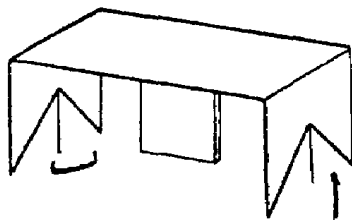
فإذا رمزنا لزاوية سقوط $\mathcal{P}$ $\mathcal{Y}$ على السطح $\mathcal{A}$ $\mathcal{B}$ بالحرف $\mathcal{H}$ ولزاوية انكساره فى الزجاج بالحرف $\mathcal{R}$ ولعامل الانكسار من الماء الى الزجاج بالرمز $\mathcal{M}$ وله من الزجاج الى الهواء بالرمز $\mathcal{H}$ يكون

$$\mathcal{M} = \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}} \quad \mathcal{H} = \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}}$$

$$\mathcal{H} = \mathcal{M} \times \mathcal{H} \times \mathcal{H} = 1 \quad \text{وبما أن}$$

$$\mathcal{H} = \mathcal{M} \times \mathcal{H} \times \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}} = 1 \quad \text{ينتج أن}$$

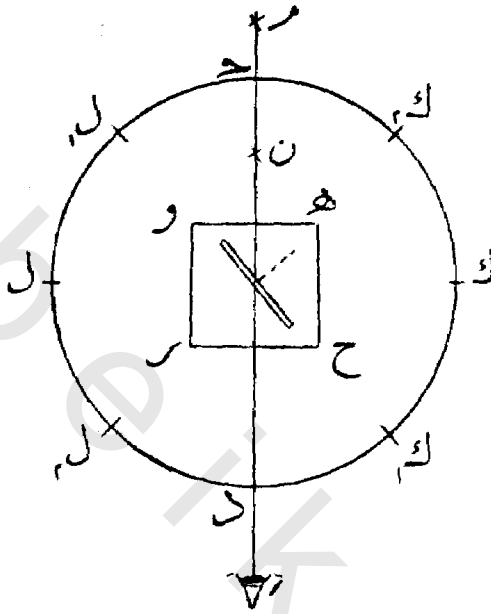
$$\frac{1}{\mathcal{H}} = \mathcal{M}$$



(شكل ٤٢)

ومن أبسط الطرق لتطبيق الفكرة السابقة عملياً أن تكون خلية « وولاستون » مثبتة رأسياً على حامل من الخشب كما بشكل (٤٢) به مساران $\mathcal{A}$ $\mathcal{B}$ يقعان على امتداد الخلية. فيقاس البعدين $\mathcal{H}$ $\mathcal{H}$ وترسم على صفحة من الورق دائرة (شكل ٤٣) قطرها

يساوى هذا البعد ويرسم أحد أقطار هذه الدائرة وليكن $ح د$ ثم تبسط صفحة الورقة على لوح



(شكل ٤٣)

من الخشب ويؤتى ببناء 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 $ح د$ عمودياً على وجهيه $هـ و ر ح$. ويؤتى بخلية وولاستون وتغمر رأسياً فى الاناء ويهيا الحامل بحيث يكون المساران على محيط الدائرة المرسومة وتكون الخلية موازية ما

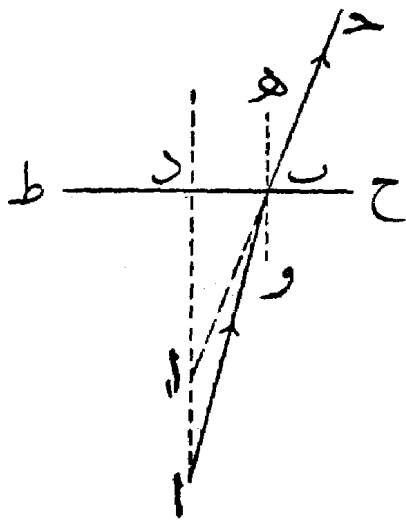
أمكن للوجهين $هـ و ر ح$ فإذا كانت الخلية منطبقة على المستقيم الواصل بين مسمارى الحامل $ا ب$ (شكل ٤٢) أو موازية له كان موضع المسمارين على الدائرة عند $ك ل$ (شكل ٤٣) بحيث يكون القطر $ك ل$ عمودياً على $ح د$. وبعد ذلك يرشق على امتداد القطر $ح د$ من أحد جانبي الاناء دبوسان $م ن$ وينظر من الجانب الآخر (عند $د$ مثلاً) بحيث يرى الدبوسان خلال الاناء فى استقامة واحدة فإذا 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 سمي الدبوسين $م ن$ على سطح الخلية فى الوضع المذكور. فإذا 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 $د$ التى يقدر منها معامل الانكسار كما تقدم

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

٦١ ب (شكل ٤٢) المثبتين على الحامل أو عدم موازاتها له يدار الحامل بعد تعيين الوضع ك_١ ل_١ (شكل ٤٣) في الجهة المضادة حتى يعين الوضع ك_٢ ل_٢ الذي عنده أيضاً يبتدى الدبوسان في الاختفاء فتكون الزاوية بين ك_١ ل_١ وبين ك_٢ ل_٢ مساوية ضعف زاوية ه المطلوبة

٥٣ - إيجاد موضع الصورة التي تحدث بالانكسار عند السطح المستوي

لنفرض أن نقطة مصيثة مثل أ (شكل ٤٤) موجودة في وسط شفاف (كالماء مثلاً) نرسم له بالرقم (١) وليكن أ ب شعاعاً ساقطاً منها على السطح ح ط الفاصل بين هذا الوسط ووسط آخر شفاف (كالهواء مثلاً) نرسم له بالرقم (٢) وليكن ب ح مسير الشعاع بعد انكساره في هذا الوسط ولنرسم لمعامل الانكسار من الوسط الأول الى الوسط الثاني بالحرف م_٢ م_١ فإذا رسم العمود ه و عند نقطة السقوط وأسقطنا من أ العمود اد على السطح ومددنا الشعاع المنكسر حتى يقطع امتداده هذا العمود في نقطة ا فان



(شكل ٤٤)

$$\frac{\text{ح ا د ا ب و}}{\text{ح ا د ح ب ه}} = \text{م}_٢$$

$$\frac{\text{ح ا د ب ا د}}{\text{ح ا د ب ا د}} =$$

$$\frac{\text{ا ب}}{\text{ا ب}} =$$

فإذا فرضنا أن نقطة ب قريبة جداً من نقطة د

أمكن اعتبار

$$\text{ا ب} = \text{ا د}$$

$$\text{ا ب} = \text{ا د}$$

$$\frac{\text{ا ب}}{\text{ا ب}} = \text{م}_٢$$

واذن يكون

واذن تكون نقطة a نقطة ثابتة على العمود ad ما دامت نقط سقوط الأشعة قريبة جداً من d واذن فالأشعة المنكسرة في الوسط (μ) اذا مدت على استقاماتها تتلاقى في نقطة a متى كانت مواضع سقوطها على السطح قريبة جداً من d . فاذا نظر الى النقطة المضيئة من الوسط (μ) وكان خط البصر عمودياً على السطح ai وضعت العين على امتداد العمود ad فان الأشعة المنكسرة الواقعة على العين والصادرة في الحقيقة من a يتراءى للناظر أنها صادرة من a نظراً لأن مخروط الأشعة الواقعة على العين تكون زاوية رأسه صغيرة وتكون نقط سقوط الأشعة على السطح قريبة جداً من d واذن تكون نقطة a هي صورة النقطة a 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 الذي تنفذ اليه الأشعة

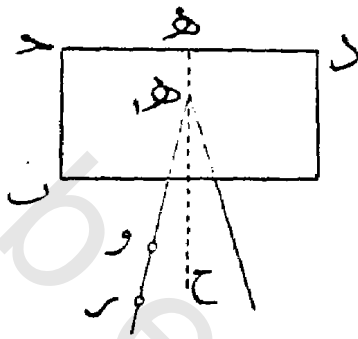
فاذا كان الوسط الموجودة فيه النقطة المضيئة أكبر كثافة ضوئية من الوسط الذي تنفذ اليه الأشعة كانت الصورة أقرب الى السطح وهذا ما يحدث اذا نظر من الهواء الى جسم مغمور في الماء أو الى علامة موجودة داخل كتلة من الزجاج سطحها مستوى أما اذا كان الوسط الموجودة فيه النقطة أصغر كثافة كانت الصورة أبعد عن السطح وهذا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

٥٤ - تعيين موضع الصورة الحادثة عن الانكسار بطريقة عملية

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

(الطريقة الأولى) فاذا أخذ متوازي مستطيلات من الزجاج وليكن ab cd (شكل ٤٥) ووضع على صحيفة من الورق الأبيض مبسوطة فوق لوح أفق من الخشب وكان بأحد جوانب متوازي المستطيلات (عند e على السطح cd مثلاً) خط رأسى قد رسم بقلم شمعى أو خدش بسن من الماس ونظر الى هذا الخط خلال متوازي المستطيلات بحيث يكون خط

البصر منحرفاً قليلاً عن العمود ه ح وعين خط البصر بدبوسين و ٦ ثم أعيد هذا والعين في الجانب الآخر من العمود ه ح فان المستقيم الواصل بين سمي الدبوسين في كل يمثل مسير



(شكل ٤٥)

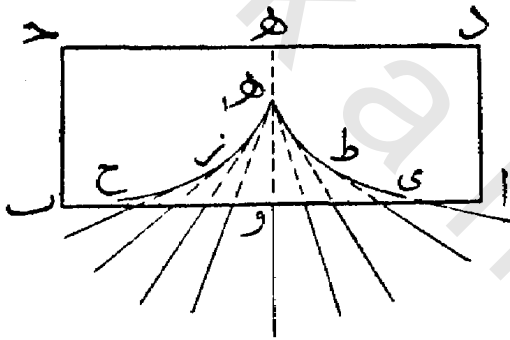
شعاع منكسر نقطة سقوطه قريبة من نقطة تقابل العمود ه ح والسطح ا ب الحادث عنده الانكسار . واذن يكون موضع تقابل امتدادى هذين المستقيمين وهى نقطة ه موضع صورة ه (الطريقة الثانية) ويمكن تطبيق طريقة انطباق المواضع التى سبق شرحها فى الانعكاس . فاذا أخذ متوازى المستطيلات السابق ونظر الى الخط الرأسى عند ه خلاله وعلى امتداد

العمود ه 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 ازيمحت العين قليلاً 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 وذلك 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 عندما تظهر صورته منطبقة على صورة الخط الرأسى وتبقى الصورتان منطقتين اذا ما تحركت العين قليلاً 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

إذا فرضنا أن نقطة هـ (شكل ٤٦) تمثل علامة كخط رأسي على أحد الجوانب الرأسية لمتوازي مستطيلات ا ب ح د ورسمت مسيرات أشعة ساقطة من هـ بزوايا مختلفة داخل متوازي المستطيلات ثم عينت مسيراتها بعد انكسارها خارجة الى الهواء (سواء ا كان ذلك بطريقة الرسم أو بوسيلة عملية كالنظر الى صورة الخط الرأسى المرسوم عند هـ والعين في مواضع مختلفة وتعين خط البصر في كل حالة بدبوسين يمثل المستقيم الواصل بين سميها الشعاع المنكسر) فانه يرى أن امتدادات الأشعة المنكسرة لا تتلاقى جميعها في نقطة واحدة ولكنها تمس خطاً منحنياً يسمى المنحنى الغلافى للأشعة المنكسرة وهو كالخط المنحنى ي ط هـ , رح

المبين بالشكل



(شكل ٤٦)

وان كانت امتدادات الأشعة المنكسرة تمس المنحنى الغلافى فانه اذا روعيت حزمة ضيقة منها أمكن اعتبارها متقابلة في نقطة على هذا المنحنى لذلك تكون نقطة هـ , وهي رأس المنحنى الغلافى واقعة على العمود هـ و

بحيث يكون $\frac{1}{و} = \frac{و}{هـ}$ مساوياً معامل الانكسار من الوسط الأول الى الثانى لأنه يمكن اعتبارها

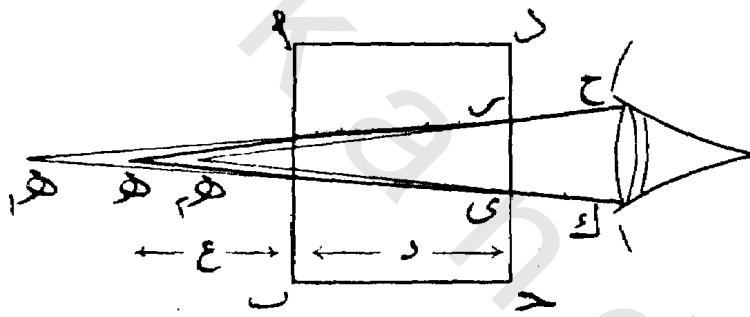
موضع تقابل امتدادات الأشعة المنكسرة التى تكون نقط سقوطها قريبة جداً من نقطة و . كذلك اذا نظر الى النقطة هـ من خارج السطح ا ب فان الحزمة الضيقة الواصلة الى العين أياً كان موضعها يمكن اعتبار امتداداتها متقابلة في نقطة على المنحنى الغلافى واذا أخذت العين تتحرك في مستوى الورقة رويدا رويدا بعيدا عن العمود هـ 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 فوضع الصورة التى تراها العين يتغير تبعاً لتغير زاوية سقوط الأشعة الواقعة من النقطة

التي نعتبرها جسماً

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

نفرض أن $ab > d$ (شكل ٤٧) لوح من مادة شفافة (كالزجاج مثلاً) يحول بين نقطة مضيئة h نعتبرها جسماً وبين العين ولنفرض أن خط البصر عمودى على اللوح ولنرمز لبعد النقطة عن السطح ab بالحرف e ولسمك اللوح بالحرف s ولعامل الانكسار من الوسط الموجودة فيه النقطة (الهواء مثلاً) الى مادة اللوح بالحرف m

فالأشعة التى تكاد تسقط من h عمودية على السطح ab تنكسر خلال اللوح كأنها صادرة من النقطة h' على امتداد العمود الواقع من h على السطح ab وعلى بعد من هذا السطح



(شكل ٤٧)

يساوى e واذن الأشعة

التي تكاد تقع داخل

اللوح عمودياً على السطح

$d > e$ تكون كأنها صادرة

من h' واذن يمكن

بالنسبة الى الانكسار الثانى الذى يحدث عند السطح cd أن نعتبر نقطة h' كأنها جسم ويكون بعده عن السطح cd مساوياً $m \cdot e + s$ 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 الأشعة المنكسرة تتقابل فى نقطة h'' تكون بمثابة صورة للنقطة h ويكون بعدها عن السطح cd مساوياً

$$\frac{1}{m} (s + e m)$$

ويكون بعدها عن السطح ab مساوياً

$$\frac{1}{m} (s + e m) - s = e - (1 - \frac{1}{m}) s$$

واذن يكون البعد بين موضع الصورة h'' التى ترى خلال اللوح وبين الموضع الحقيقى

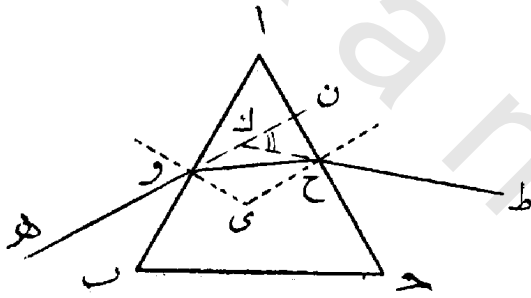
لنقطة المضيئة h مساوياً $s (1 - \frac{1}{m})$

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

٥٧ - الانحراف الحادث عن الانكسار خلال المنشور الثلاثي

تبين فيما سبق (بند ٤٥) أنه إذا اخترق شعاع من الضوء وسطاً محدوداً بسطحين مستويين متوازيين فإن مسيره بعد نفوذه منه يوازي مسيره الاول قبل وقوعه عليه فالشعاع الذي ينفذ في هذه الحالة وإن عانى ازاحة جانبية تقاس بالبعد العمودى بين المسيرين فإنه لا يعانى انحرافاً عن مسيره الأول

ولكن إذا فرضنا أن $ab >$ (شكل ٤٨) يمثل مقطعاً أفقياً لمنشور ثلاثى من الزجاج مثلاً وسقط على ab شعاع مثل $هو$ وانكسر داخل المنشور فى استقامة $وح$ حتى اذا بلغ



(شكل ٤٨)

السطح $ا >$ انكسر خارجاً من المنشور فى استقامة $ح ط$ فإن الشعاع عند نفوذه فى المنشور ينحرف عن مسيره الاول بمقدار الزاوية الواقعة بين امتداد المستقيم $هو$ وبين امتداد المستقيم $ط ح$ وهى زاوية $ن ك ط$ وتسمى زاوية الانحراف

ويمكن تعيين مسير مثل هذا الشعاع هندسياً بتطبيق احدى الطرق لرسم الشعاع المنكسر أولاً عند سقوط الشعاع $هو$ على السطح $اب$ ثم عند سقوط هذا الشعاع المنكسر على السطح $ا >$ وانكساره الى الخارج .

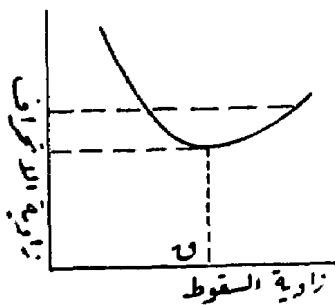
كذلك يمكن تعيين مسيره عملياً فيوضع منشور ثلاثى من الزجاج على صحيفة أفقية من الورق فى وضع قائم بحيث يكون $اب >$ (شكل ٤٨) ممثلاً لحدوده على الورقة ثم يوضع دبوسان يمثلان المستقيم الواصل بين سميها شعاعاً ساقطاً على السطح $اب$ وليكن $هو$ ثم ينظر الى السطح $ا >$ فى وضع يرى فيه الدبوسان خلال المنشور فى استقامة واحدة ويعين خط البصر

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

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

٥٨ — النهاية الصغرى لزاوية الانحراف

وزاوية الانحراف ن ك ط (شكل ٤٨) تتغير قيمتها تبعاً لتغير زاوية سقوط الشعاع ه و على السطح ا ب ويمكن بالتجربة كتجربة الدبابيس السابقة تعيين مسير أشعة مختلفة تسقط بزوايا سقوط مختلفة وقياس زاوية الانحراف المقابلة لزاوية السقوط في كل حالة فاذا



(شكل ٤٩)

اجريت تجربة من هذا القبيل بعناية ودقة وبينت العلاقة بين زاوية السقوط وزاوية الانحراف بالرسم البياني كان الخط البياني الدال على هذه العلاقة كالمبين بشكل (٤٩) ومنه يتضح أن هناك قيمة خاصة واحدة لزاوية السقوط هي المدلول عليها بالحرف u في الشكل تكون فيها زاوية

الانحراف أصغر ما يمكن وتعرف هذه الزاوية بالنهاية الصغرى لزاوية الانحراف ويمكن استخراج

قيمتها من الرسم البياني

ويتبين من الخط البياني أنه إذا كانت لزواوية الانحراف أية قيمة أخرى غير هذه النهاية الصغرى فإنه توجد قيمتان لزواوية السقوط تبلغ عندهما زواوية الانحراف تلك القيمة

فإذا عدنا الى شكل (٤٨) نرى أن الشعاع $هـ$ و الساقط على الوجه $اب$ بزواوية سقوط معينة ينحرف عند نفوذه من المنشور خارجاً في استقامة $ح ط$ بزواوية $ن ك ط$ وتطبيق قاعدة قبول العكس تدل فضلاً عن التجارب العملية على أن الشعاع $ط ح$ الساقط على الوجه $ا ح$ بزواوية سقوط أخرى يخرج عند نفوذه من المنشور في استقامة $و هـ$ (ويكفي لبيان ذلك أنه بعد وضع الدبوسين اللذين يحددان مسار $ح ط$ في تجربة الدبابيس السابقة ينظر نحو الوجه $اب$ بحيث يرى هذان الدبوسان خلال المنشور في استقامة واحدة فيلاحظ أن خط البصر ينطبق على الخط الواصل بين الدبوسين الأولين اللذين يعينان مسار الشعاع $هـ و$ الساقط على $اب$) فهو إذن ينحرف بزواوية تساوي زواوية $ن ك ط$ أيضاً وبما أنه توجد قيمة واحدة لزواوية السقوط يبلغ عندها الانحراف نهايته الصغرى كان حتماً أن تكون الزواوية بين الشعاع الساقط على الوجه $اب$ والعمود مساوية الزواوية بين الشعاع الخارج من الوجه $ا ح$ والعمود على هذا الوجه (ونسُميها زواوية الخروج) في حالة ما تكون زواوية الانحراف عند نهايتها الصغرى والافان توجيه الشعاع بحيث يتبع خلال المنشور مسيره الاول في الاتجاه المضاد يؤدي الى القيمة نفسها للنهاية الصغرى لزواوية الانحراف وتكون هناك زاويتا سقوط مختلفتان يبلغ عندهما الانحراف نهايته الصغرى وهذا تنفيه التجارب

ويمكن بيان أن لزواوية الانحراف نهاية صغرى بتجربة بسيطة فإذا هيء في غرفة مظلمة منشور ثلاثي بحيث كان قابلاً للدوران حول محور مواز لحرفه الخارفي ومار بمركز وجهه المثلث وجعل حرفه الخارفي أفقياً وزواوية المنشور الى أعلى وأسقطت عليه حزمة أفقية ضيقة من الضوء (ويستحسن أن يكون ضوءاً ذا لون واحد ويكفي في مثل هذه التجربة أن يوضع في سبيل أشعة الشمس مثلاً قبل سقوطها على المنشور لوحاً من الزجاج الأحمر مثلاً) فإن الحزمة عند نفوذها من المنشور تنحرف الى أسفل فإذا هيء حاجز أبيض في وضع رأسي بحيث تقع عليه

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

٥٩ — إيجاد النهاية الصغرى لزاوية الانحراف عملياً

ويمكن بتجربة بسيطة تستخدم فيها الدبابيس إيجاد النهاية الصغرى لزاوية الانحراف وذلك أن يوضع المنشور على سطح صحيفة من الورق الأبيض مبسوطة على لوح أفقي من الخشب بحيث يكون حرفه الحاربان رأسياً ويعين مسير شعاع ساقط على أحد سطحيه الحاربان بواسطة دبوسين رأسيين ثم ينظر من الوجه الآخر بحيث يرى الدبوسان على استقامة واحدة ويدار المنشور قليلاً حول نفسه دون أن يبرح مكانه (ولكي يتيسر ذلك يستحسن أن ترسم على الورقة الدائرة التي تحيط بالقاعدة الثلاثية للمنشور ويدار المنشور حول محور رأسى بحيث لا يتجاوز حدود هذه الدائرة وأفضل من هذا أن يلصق دبوس من دبائس الرسم بالقاعدة الثلاثية للمنشور بقليل من شمع الختم ويغرز سن الدبوس في اللوح الخشبي فيتكون منه محور ثابت يسهل دوران المنشور حوله) ويلاحظ الاتجاه الذي يرى المستقيم الواصل بين الدبوسين ينحرف نحوه. ويدار المنشور في الجهة التي تجعل هذا المستقيم ينحرف بعيداً عن رأس المنشور بحيث إذا أريد الاستمرار في رؤية الدبوسين خلال المنشور على استقامة واحدة تطلب ذلك إزاحة العين نحو رأس المنشور ففي هذه الحالة يترتب على دوران المنشور صغر زاوية الانحراف فيستمر في ادارته حتى يبلغ المستقيم الواصل بين الدبوسين موضعاً يبتدىء عنده في الانحراف نحو رأس المنشور

∴ عند ما تكون v عند نهايتها الصغرى يكون

$$(٢) \quad ١ = \frac{١٥}{٥} + \text{صفراً}$$

ومن المعادلة (١) يتضح أن

$$(٣) \quad \text{صفراً} = \frac{١٥}{٥} + \frac{٥}{٥}$$

$$٢ = \frac{\text{حان}}{\text{حار}}$$

ولكن لما كان

$$\text{فان} \quad \text{حان} \text{ و } ٥ = ٢ \text{ حار و } ٥$$

$$\therefore \quad \frac{\text{حان}}{\text{حار}} = \frac{٥}{٥}$$

$$\text{كذلك} \quad \frac{\text{حان}}{\text{حار}} = \frac{١٥}{١٥}$$

$$\text{وبما أن} \quad \frac{١٥}{٥} \cdot \frac{١٥}{١٥} = \frac{١٥}{٥} \quad \text{ينتج بالتعويض في (٣)}$$

$$\text{أن} \quad \text{صفراً} = \frac{١٥}{٥} \cdot \frac{\text{حان}}{\text{حار}} + \frac{\text{حان}}{\text{حار}}$$

$$\text{وبما أن} \quad ١ - = \frac{١٥}{٥} \quad \text{كما يتضح من المعادلة (٢)}$$

$$\text{يكون} \quad \text{صفراً} = \frac{\text{حان}}{\text{حار}} - \frac{\text{حان}}{\text{حار}}$$

$$\therefore \quad \frac{١ - \text{حان}^٢}{١ - \text{حار}^٢} = \frac{١ - \text{حان}^٢}{١ - \text{حار}^٢}$$

$$\therefore \quad \frac{١ - \text{حان}^٢}{١ - \text{حار}^٢} = \frac{١ - \text{حان}^٢}{١ - \text{حار}^٢}$$

$$\therefore \quad (١ - \text{حان}^٢)(١ - \text{حار}^٢) = (١ - \text{حان}^٢)(١ - \text{حار}^٢)$$

$$\therefore \quad \text{ح}^2 = \text{ح}^2 \text{ ح}^2$$

ومنه يتضح أن زاوية $\text{ح} = \text{ح}$

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 لزاوية الخروج أى $\text{ح} = \text{ح}$ وكذلك $\text{ح} = \text{ح}$ فاذا رمزنا لزاوية رأس المنشور بالحرف α فان

$$(1) \quad \alpha = \text{ح}^2$$

واذا رمزنا للنهاية الصغرى لزاوية الانحراف بالحرف β فان

$$\text{ح}^2 - \text{ح}^2 = \beta$$

$$1 - \text{ح}^2 =$$

$$\frac{\beta + 1}{2} = \text{ح} \quad \therefore$$

ولما كان معامل الانكسار

$$\frac{\text{ح}^2}{\text{ح}^2} = \mu$$

$$\frac{\frac{\beta + 1}{2} \text{ ح}^2}{\frac{1}{2} \text{ ح}^2} = \mu$$

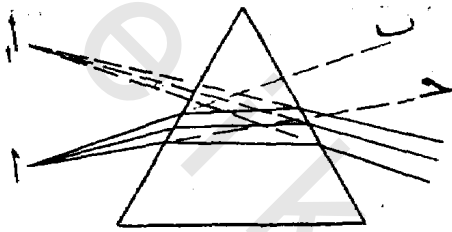
ينتج أن

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

٦٢ - الصورة التي تحدث بالانكسار خلال المنشور عند ما يكون الانحراف

عند نهايته الصغرى

يتبين من شكل (٤٩) أنه وإن كانت هناك قيمة واحدة لزواية السقوط يبلغ عندها الانحراف نهايته الصغرى فإنه إذا تجاوزت زاوية السقوط هذه القيمة إلى ما هو أكبر منها قليلاً أو أصغر منها قليلاً فإن قيمة زاوية الانحراف تبقى أو تكاد تبقى ثابتة لا تتغير. لذلك إذا وقعت



(شكل ٥٠)

من نقطة مثل ا (شكل ٥٠) حزمة مخروطية بحيث يكون انحراف محور هذه الحزمة النهاية الصغرى للانحراف وكانت زاوية رأس المخروط صغيرة فإن جميع أشعة هذه الحزمة تنحرف بزاوية

لا تختلف كثيراً عن النهاية الصغرى لزواية الانحراف ويمكن اعتبارها مساوية لها فيكون نتيجة نفوذها خلال المنشور أن تنحرف جميع هذه الأشعة بمقدار واحد واذن لا يتغير ميلها بعضها بالنسبة إلى الآخر من جراء نفوذها في المنشور وتمازج امتداداتها بنقطة واحدة ا تكون كأنها صادرة منها وتكون هذه النقطة بمثابة صورة واضحة دقيقة للنقطة ا. وتراها العين إذا كان محور مخروط الأشعة الواقعة عليها هو الشعاع الذي يعاني النهاية الصغرى للانحراف

ويمكن التحقق عملياً من أن الصورة التي ترى عند ما يكون الانحراف عند نهايته الصغرى دقيقة واضحة وذلك بأن تهيأ فتحة مستطيلة ضيقة بحيث تكون موازية للحرف الحارفي المنشور قابل للدوران حول محور مواز لهذا الحرف وتضاء هذه الفتحة بضوء ذي لون واحد نظراً لأن نفوذ الضوء الأبيض خلال المنشور يترتب عليه تشتت الأضواء ذات الألوان المختلفة بعضها بالنسبة إلى الآخر. ويمكن الحصول على ضوء يعد ذا لون واحد بإدخال مقدار صغير من ملح الطعام في كوب مصباح بنزن على حرف ملعقة صغيرة من البلاتين أو بأن تلف قطعة من ورق القطن الصخري (الازبستوس) حول الطرف الأعلى لانبوبة مصباح بنزن بحيث يكون حرفها ناتئاً فوق الطرف الأعلى لانبوبة المصباح وتشبع اللقافة بمحلول مشبع من ملح الطعام فإذا أشعل

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

٦٣ - شرط نفوذ الشعاع الضوئى خلال منشور ثلاثى

إذا اعتبرنا h و (شكل ٤٨) شعاعاً ساقطاً على السطح ab من المنشور ورمزنا لزاوية انكساره عند هذا السطح وهي زاوية i وح بالرمز i ولزاوية سقوطه على السطح a وهي زاوية i ح وبالرمز i يتضح كما تقدم أن

$$i = i' + i''$$

باعتبار أن i زاوية رأس المنشور وهي الواقعة بين وجهيه ab و ac ولكى ينفذ الشعاع وح (الواقع على السطح a) خارجاً من المنشور يجب أن تكون زاوية سقوطه i أصغر من الزاوية الحرجة . فإذا رمزنا للزاوية الحرجة لمادة المنشور بالحرف c يتضح أن أصغر قيمة لزاوية الانكسار عند السطح الاول يتفق معها نفوذ الشعاع خلال المنشور هي

$$i = c$$

فتكون أصغر قيمة لزاوية سقوط الشعاع h و على السطح ab يتفق معها نفوذ الشعاع خلال المنشور هي زاوية c فى المعادلة

$$h = c \text{ أو } h = (c - i)$$

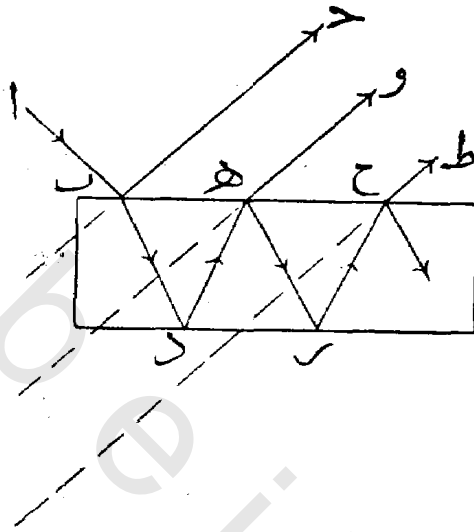
باعتبار أن m رمز لمعامل انكسار الضوء فى مادة المنشور

٦٤ - تعدد الصور فى المرآة السميكة

إذا وضع جسم كالاصبع مثلاً أمام السطح العاكس لمرآة سميكة وبجواره ونظر الى صورته أمكن رؤية عدة صور حادثة بالانعكاس . والمرآة المعتادة لوح من الزجاج قد فضض سطحه الخلفى لئلى ينعكس الضوء عنده بشدة

فإذا فرض أن نقطة مضيئة مثل a (شكل ٥١) يسقط منها شعاع ab على السطح الامامى

للرآة فانه ينعكس طبقاً لقانونى الانعكاس شعاع فى استقامة ب و تتكون على امتداد ح ب



(شكل ٥١)

صورة . وينكسر خلال اللوح طبقاً لقانونى

الانكسار شعاع فى استقامة ب د وهذا عند

وقوعه على السطح الخلفى المفضل ينعكس

انعكاساً داخلياً طبقاً لقانونى الانعكاس فى

استقامة د هـ ثم هو عند هـ ينكسر منه شعاع

خارجاً الى الهواء فى استقامة هـ و وينعكس

منه شعاع انعكاساً داخلياً فى استقامة هـ ر

فتكون على امتداد وهـ صورة ثانية وكذلك

سقوط هـ ر على السطح الخلفى يترتب عليه تكرار مثل ما حدث عند سقوط ب د عليه .

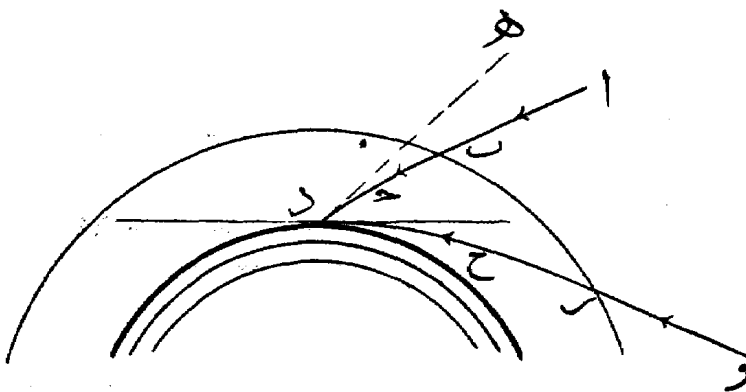
فتكرر الصور مثنى وثلاث

الظواهر الجوية المألوفة 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)



(شكل ٥٢)

مسير شعاع صادر من نجم

بعيد فظالم أن الشعاع يسير فى

الحلاء قبل بلوغه الطبقة الهوائية

فان مسيره يكون مستقيماً واذا

ما بلغ اول هذه الطبقة ينكسر

منحرفاً قليلاً نحو العمود

ومعامل الانكسار فى الغازات كما تدل التجارب العملية ^(١) يزداد تبعاً لزيادة ضغط الغاز او

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

وهذه الظاهرة تسمى « الانكسار الفلكى » (١) واثرها من الامور التى يجب مراعاتها في الارصاد الفلكية وهى ظاهرة عامة يترتب عليها نتائج أخرى منها أن النجم يظهر على الافق قبل أن يكون قد بلغه فعلاً ويتضح هذا من الشكل اذا رسم المماس عند د لكرة الارض فهذا يمثل الافق عند د ويرى أن الشعاع و ر ح د يصل الى د منطبقاً على الافق فاذا كان هذا الشعاع صادراً من نجم على امتداد ر و ظهر النجم على الافق وهو في الحقيقة تحته وهذه حالة عامة تنطبق على جميع الاجرام ومنها الشمس والقمر ويترتب على حدوثها في حالة الشمس أن الشمس ترى على الافق عند الشروق والغروب وهى في الحقيقة تحته في الحالتين واذن تكون المدة بين شروقها وغروبها أطول من المدة بين بلوغها الافق فعلاً عند الشروق وبين بلوغها الافق فعلاً عند الغروب

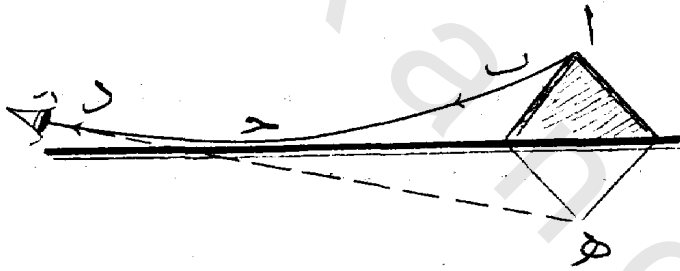
ومن نتائج هذه الظاهرة أن قرص الشمس أو قرص القمر بالقرب من الافق لا يظهر مستديراً بل يظهر بيضياً فاذا اعتبرنا قطراً رأسياً مرسوماً على قرص الشمس مثلاً فان نهايته العليا تكون أقرب الى السمّ من نهايته السفلى ولذلك يكون أثر الانكسار في الطبقة الهوائية أن تكون ازاحة الطرف الأعلى نحو السمّ أقل من ازاحة الطرف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

دائرة حوله فتكون الزاوية التي يصنعها القوس ق ح عند المركز هي عرض المكان الموجود فيه الرقاب فإذا كان الوقت وقت أحد الاعتدالين يكون مسير الشمس في السماء هو ه ورح ه وفي أثناء المدة التي تكون فيها الشمس فوق الأفق أي في أثناء قطعها القوس ورح يكون النهار وتكون نقطة و مشرق الشمس ونقطة ح مغربها فإذا اعتبرنا أن ضوء الشمس المنعكس عما في الجو من الهباء أو ما شابهه يبتدىء في الوصول إلى نقطة ا وهي تحت الأفق بمقدار ١٨ درجة ورسمنا على سطح الكرة القوس ب ط ي بحيث تكون الزاوية التي يصنعها عند المركز هي $90 + 18 = 108$ فإن الشمس عند ي تكون تحت الأفق بمقدار ١٨ درجة وإذن متى بلغت الشمس في مسيرها ليلاً نقطة ي ابتداء الفجر في الانبثاق وتكون مدة دوامه هي المدة التي تستغرقها الشمس في المسير من ي إلى و . وطول القوس ي و يختلف تبعاً لاختلاف ميل الدائرة ه ورح ه على الأفق وهذا يختلف باختلاف عرض المكان فإذا كان الموضع الذي نراعيه عند خط الاستواء مثلاً حيث عرض المكان صفر يكون مسير الشمس عند أحد الاعتدالين الدائرة المارة بالسمت ب وتكون مدة دوام الفجر هي المدة التي تستغرقها الشمس في قطع ١٨ درجة من قوس هذه الدائرة

أما إذا لم يكن الوقت وقت أحد الاعتدالين فإن مسير الشمس يمثل بدائرة مثل ك ل عمودية على المحور القطبي ا ق وعند الانقلاب الصيفي تبلغ الزاوية التي يصنعها القوس ك ه عند المركز مقدار ٥٨ و ٣٣ من الدرجة . وفي هذه الحالة يكون النهار هو المدة التي تستغرقها الشمس في قطع القوس م ل ن ويكون أقصى هبوط تحت الأفق تبلغه الشمس في أثناء الليل لا يتجاوز الزاوية التي يصنعها القوس ك ح عند المركز وهذه الزاوية قد تكون أقل من ١٨ درجة وفي هذه الحالة يندمج الشفق بالفجر فلا يكون ثمة ليل . وميل الدائرة ك ل بالنسبة إلى 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 في الحالات المعتادة تقل اذا سرنا من أسفل الى أعلى ولكن قد يحدث في الصحراوات الحارة أن ترتفع كثيراً درجة حرارة الطبقات الهوائية الملاصقة بسطح الأرض وتصير كثافة الطبقات السفلى أقل من كثافة التي فوقها (لا سيما اذا هبت في الطبقات العليا ريح باردة) بحيث اذا سرنا من أسفل الى أعلى تزداد الكثافة بالتدريج حتى تصل الى نهايتها العظمى ثم تبتدىء في النقص كما في الحالات المعتادة عند ما يتجاوز الارتفاع سمك الطبقة التي يحدث فيها هذا الشنوذ ويترتب على ذلك أن يزداد معامل الانكسار اذا سرنا من أسفل الى أعلى حتى يبلغ نهايته العظمى ثم يأخذ في النقص بعد ذلك كما في الحالات المعتادة



(شكل ٥٤)

فاذا فرض أن شعاعاً صادراً من قمة تل مثلاً بالقرب من الأفق كالشعاع ا ب (شكل ٥٤) فإنه في أثناء نفوذه من الطبقة

العليا الكثيفة الى الطبقة اللطيفة التي تحتها تكون زاوية سقوطه في الأول أصغر من زاوية انكساره في الثانية فينحرف بعيداً عن العمود وعند نفوذه من الطبقة الثانية الى الطبقة الثالثة التي تحتها تكون زاوية السقوط اكبر من زاوية السقوط في الحالة الأولى فتكون زاوية الانكسار اكبر من زاوية الانكسار في الحالة الأولى فيزداد الشعاع انحرافاً وهكذا فيكون مسيره كالمنحنى ا ب ح المبين بالشكل . حتى اذا تجاوزت زاوية السقوط في احدى الطبقات الزاوية الحرجة لهذه الطبقة بالنسبة الى الطبقة التي تحتها انعكس الشعاع وأخذ مسيره يتقوس كما هو مبين بالجزء ح د في الشكل فاذا وقع على عين الرائي عند د تراءى له أنه آت في استقامة د ه فتراءى له صورة مقلوبة للتل شبيهة بالصورة التي تحدث بالانعكاس عند سطح الماء وقد ترى صورة للسماء تحدث بهذه الكيفية أيضاً فيزداد الظن بوجود الماء رسوخاً في الذهن

وقد وصف « وود » (١) تجربة أجراها تقلد بها ظاهرة السراب عملياً في 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 في مستوى أفقى واحد وعلى امتداد واحد ثم تغطى سطوحها العليا بطبقة من الرمل ويوضع عند أحد الطرفين ب (شكل ٥٥) مرآة مستوية - 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 هذه الصحراء ثم يوضع عند الطرف ب على سطح الصفيحة هناك بضعة نماذج يبلغ ارتفاع الواحد منها سنتيمتراً أو اثنين تمثل تلالاً أو جبالاً وتسخن بعد ذلك هذه الصفائح من أسفل بلهب عدة صغيرة يبلغ ارتفاع

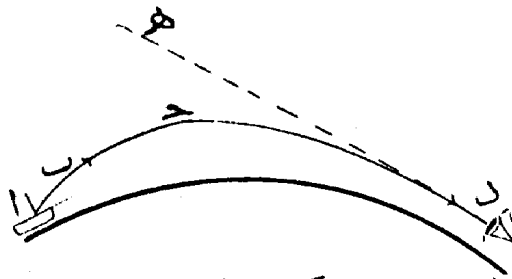


(شكل ٥٥)

الواحد خمسة سنتيمترات وتكون على أبعاد متساوية كما هو مبين بالشكل . فاذا وضعت العين عند ا على ارتفاع ثلاثة أو أربعة سنتيمترات من مستوى الصفائح تراهى للناظر أنه يرى بركة من الماء عند ب تنعكس عن سطحها صور نماذج الجبال والتلال الموضوعة هناك

٦٨ - السراب المعكوس

ونحدث أحياناً ظاهرة أخرى تكون الظروف الاستثنائية فيها عكس الظروف الاستثنائية التى تؤدى الى حدوث السراب وتسمى ظاهرة السراب المعكوس وهى تحدث اذا كانت الطبقات



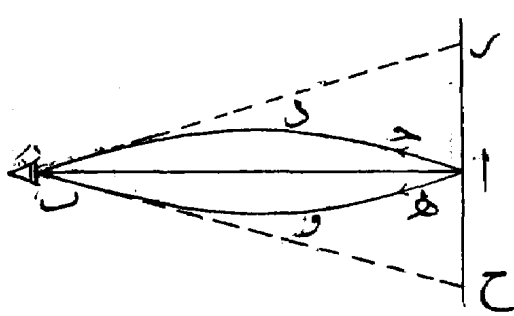
(شكل ٥٦)

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

١ ب (شكل ٥٦) يصدر من جسم عند ١ على سطح الأرض ويخترق الطبقات السفلى الى أعلى فانه ينحرف بالنفوذ من الطبقة السفلى الكثيفة الى الطبقة اللطيفة التي فوقها بعيداً عن العمود فينحني الشعاع بالكيفية المبينة بالشكل حتى اذا تجاوزت زاوية سقوطه في الطبقة الكثيفة الزاوية الحرجة لهذه الطبقة بالنسبة الى التي فوقها انعكس الشعاع وأخذ ينحني بالكيفية المبينة بالجزء ح د فاذا وقع على عين الرائي عند د تراهي له أن الشعاع آت من اتجاه ه د فيرى صورة للجسم الموجود على سطح الأرض تكون مقلوبة كأنها معلقة في السماء وقد يكون الجسم محتفياً تحت الأفق (كما هو مبين بالشكل) وتظهر صورته عالية مقلوبة في السماء

٥٦ - 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 التي تكون كثافتها عند النهاية العظمى يكون معامل انكسار الضوء فيها اكبر ما يمكن ويقل اذا ارتفعنا فوق هذه الطبقة أو اذا نزلنا تحتها . فاذا فرضنا أن المستقيم ١ ب (شكل ٥٧) يمثل هذه الطبقة فالشعاع الصادر من جسم صغير عند ١ ومسيره في استقامة ١ ب ينطبق مسيره على سمت ١ ب حيث ينفذ في طبقة ذات كثافة غير متغيرة . أما الشعاع الصادر في اتجاه ١ ح فانه ينفذ من طبقة الى أخرى أقل كثافة منها فيتقوس مسيره رويداً رويداً حتى ينعكس متى توافر شرط الانعكاس ويصير مسيره كالمنحني ١ ح د ب المبين بالشكل . وبالمثل فان الشعاع ١ ه



(شكل ٥٧)

ينفذ من طبقة الى أخرى أقل كثافة منها فيتقوس وينعكس ويصير مسيره كالمنحني ١ ه و ب . فاذا حدث ذلك وكانت عين الناظر عند ب تراهي له أن الشعاع ١ ح د ب كأنه آت في استقامة رت وتراهي له الشعاع ١ ه و ب كأنه

آت في استقامة ح ب واذن يتراهي له الجسم الصغير عند ١ كأنه قد استطال في الاتجاه الرأسى

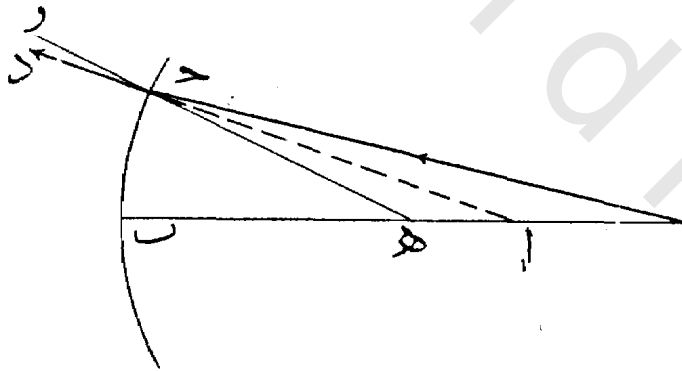
الى أن بلغ ما بين ٦ ح

وان كان الشكل يبين انحناء الاشعة بشيء من المبالغة فان هذه الظاهرة شوهدت في برزخ « مسينا » فرؤيت الصخور على الشاطئ 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



(شكل ٥٨)

عند ح فيكون ه ح و

العمود المرسوم من نقطة

السقوط ونرسم ح د

بحيث يكون مسير الشعاع ا

عند انكساره في الوسط

الثاني ونمد المستقيم د ح

على استقامته حتى يقطع المحور في نقطة ا

فاذا رمزنا لزاوية السقوط ا ح ه بالحرف ν ولزاوية الانكسار د ح و بالحرف μ ولزاوية ح ا ب بالحرف α ولزاوية ح ا ه بالحرف β ولزاوية ح ا ب بالرمز γ ولزاوية ح ه ب بالحرف δ يكون

$$\nu + \alpha = \mu + \beta = \delta$$

(١) Fata Morgana نسبة الى جنبة في اساطير الفرون الوسطى بهذا الاسم

وبما أن $m = \frac{h\nu}{h\nu}$ ينتج إذا كانت نقطة h قريبة جداً من القطب b ان تكون كل

من الزاويتين ν و ϕ صغيرة وأن يكون $\nu = m$

$$(1) \dots \nu + 1 = h \quad \therefore$$

$$(2) \dots \nu + 1 = h \quad \phi$$

وبضرب المعادلة (٢) في m وطرح المعادلة (١) من حاصل الضرب ينتج أن

$$(3) \dots 1 - \nu = (1 - m) h$$

فاذا رمزنا لبعده نقطة a عن القطب b بالحرف e ولبعد m عنه بالرمز ν ولنصف

قطر تكور السطح بالرمز s فنطراً لأن نقطة h قريبة جداً من نقطة b يكون

$$\frac{b}{e} = 1$$

$$\frac{b}{\nu e} = \nu \quad \phi$$

$$\frac{b}{s} = h \quad \text{كما أن } h$$

فبالتعويض في المعادلة (٣) وباختصار h ينتج أن

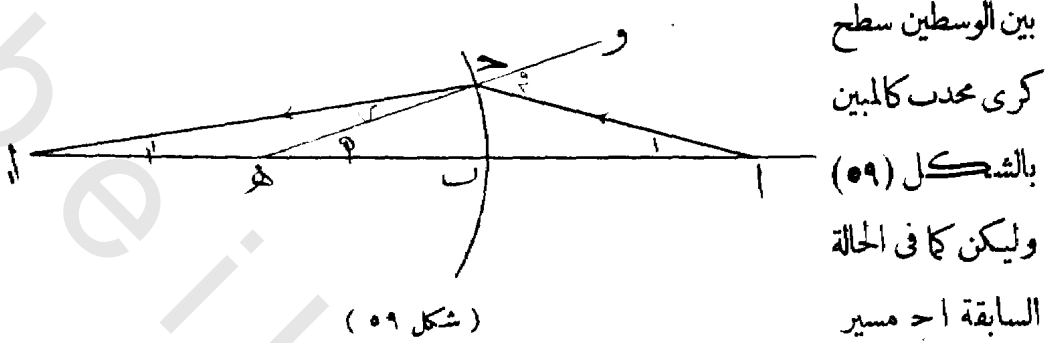
$$(4) \dots \frac{1}{e} - \frac{\nu}{\nu e} = \frac{1 - \nu}{s}$$

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

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

٧١ - الانكسار عند السطح الكروي المحدب

نفرض في هذه الحالة أن الضوء يقع من وسط كالهواء على آخر كالزجاج وان الحد الفاصل



شعاع ساقط $u > v$ مسيره بعد الانكسار حيث يكون $u > v$ والعمود عند نقطة السقوط
والرمز للابعاد والزوايا المقابلة لنظيراتها في الحالة السابقة بالرموز نفسها فيكون

$$u + v = r$$

$$u + v = r \quad \text{أي } m$$

$$u + v = r \quad 6$$

$$u + v = r = (1 - m) \quad \therefore$$

$$\therefore \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1-m}{r} \quad (1)$$

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

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1-m}{r}$$

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

٧٢ - بؤرة السطح الكرى وبعده البؤرى

يتبين من المعادلة

$$\frac{1}{s} - \frac{r}{1.4} = \frac{1-r}{s}$$

أنه اذا كانت قيمة r لا نهاية لها يكون

$$\frac{1-r}{s} = \frac{1}{s}$$

وتسمى النقطة التى توضع عندها النقطة المضئة 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 $\frac{s}{1-r}$

فاذا كان الضوء واقعاً من وسط أقل كثافة ضوئية ومنكسراً فى وسط أكبر كثافة فان قيمة r تكون أكبر من الواحد فاذا كان السطح مقعراً تكون اشارة s 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 r لا نهاية لها أى فى حالة ما تكون الاشعة الساقطة متوازية فان

$$\frac{1-r}{s} = \frac{r}{1.4}$$

واذن تنكسر هذه الاشعة مارة بنقطة على بعد يساوى $\frac{s}{1-r}$ 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 في الجانب الواقع منه الضوء وللسطح المحدب حقيقة في الجانب الآخر

٧٣ - الانكسار خلال العدسة الكرية الرقيقة

العدسات التي ندرسها هنا هي العدسات المحدودة بسطحين كربين والتي يكون سمكها صغيراً وسنقتصر هنا على الحالات التي تكون فيها مواضع سقوط الاشعة على أحد سطحي 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 الثاني وكأن هذه الصورة بالنسبة اليه جسم فتتكون بالانكسار عن السطح الثاني الصورة النهائية وتكون هذه هي الصورة الحادثة بفعل العدسة . فان رمزنا لمعامل الانكسار من الوسط الواقعة منه الاشعة الى مادة العدسة بالحرف μ ولنصف قطر تكور السطح الاول للعدسة وهو السطح الواقع عليه الضوء أولاً بالرمز s_1 ولبعد النقطة المضيئة الموجودة على محور هذا السطح بالحرف e فان الصورة الحادثة بالانكسار الاول تكون على المحور وعلى بعد s من قطب السطح الاول طبقاً للمعادلة

$$(1) \quad \frac{1}{e} - \frac{\mu}{s_1} = \frac{1 - \mu}{s}$$

فاذا كان محور السطح الثاني منطبقاً على محور السطح الاول تكون الاشعة الواقعة على السطح الثاني كأنها صادرة من نقطة على المحور تبعد بمقدار s عن قطب السطح الاول فاذا كان سمك العدسة صغيراً جداً أمكن اعتبار بعد هذه النقطة عن قطب السطح الثاني هو s أيضاً ونظراً لأن الضوء وهو منكسر عند هذا السطح ينفذ من مادة العدسة الى الوسط الاول فان معامل الانكسار يكون $\frac{1}{\mu}$ فبالرمز لنصف قطر تكور هذا السطح بالرمز s_2 ولبعد الصورة الحادثة عن هذا الانكسار بعدها من قطب هذا السطح بالرمز e يكون

$$(2) \quad \frac{1}{e} - \frac{1}{s_2} = \frac{1 - \frac{1}{\mu}}{s}$$

ومن معادلة (١) يتضح أن

$$\left(\frac{1}{e} + \frac{1-r}{1.5} \right) \frac{1}{r} = \frac{1}{r}$$

فبالتعويض في المعادلة (٢) ينتج أن

$$\left(\frac{1}{e} + \frac{1-r}{1.5} \right) \frac{1}{r} - \frac{1}{1.5} = \frac{1-r}{1.5}$$

$$\therefore (1-r) \left(\frac{1}{1.5} - \frac{1}{r} \right) = \frac{1}{e} - \frac{1}{1.5} \quad (3)$$

وتكون هذه المعادلة هي المعادلة العامة الدالة على علاقة بعد النقطة المضيئة عن العدسة الرقيقة وبعد صورتها عنها ويلاحظ أن e رمز لبعد النقطة المضيئة عن قطب السطح الاول e_1 رمز لبعد الصورة التي تتكون بفعل العدسة عن قطب السطح الثاني وبما أن القطبين متقاربان وإهمل البعد بينهما فإن e يعتبر رمزاً لبعد النقطة المضيئة عن العدسة e_2 رمزاً لبعد صورتها عن العدسة

٧٤ - بؤرة العدسة وبعدها البؤرى

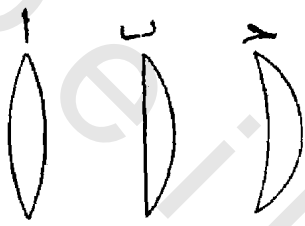
ويتبين من المعادلة (٣) في البند السابق انه اذا كانت قيمة e لا نهاية لها أى اذا كانت الأشعة الواقعة على العدسة متوازية وموازية للمحور ورمزنا لبعد الصورة بالحرف r فإن

$$\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{1.5} \right) (1-r) = \frac{1}{r}$$

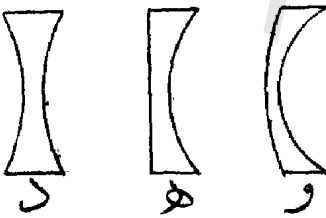
ويسمى موضع الصورة في هذه الحالة «البؤرة» ويسمى بعدها عن العدسة «البعد البؤرى» ويكون موضع البؤرة من العدسة في الجانب الذى يقع منه الضوء أو في الجانب الآخر تبعاً للإشارة النهائية للمقدار الجبرى السابق فاذا كانت اشارته موجبة كان موضع البؤرة من العدسة في الجانب الذى يقع منه الضوء وفي هذه الحالة تكون البؤرة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

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

ولزيادة توضيح هذا نفرض أن العدسة من الزجاج وموضوعة في الهواء فقيمة m تكون معامل الانكسار من الهواء الى الزجاج وأ كبر من الواحد . واذن يكون المقدار $(m - 1)$ موجباً فاذا



كانت العدسة محدبة الوجهين (كما في شكل ١ - ٢٠) وكان الضوء واقعاً عليها من الجانب الأيمن منها فان m وهو نصف قطر تكور السطح الواقع عليه الضوء تكون اشارته طبقاً لقاعدة الاشارات سالبة في حين أن اشارة m تكون موجبة واذن المقدار



(شكل ٦٠)

$$(1 - m) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

يكون مقداراً سالباً وتكون البؤرة حقيقية في الجانب الآخر

من العدسة

واذا كانت العدسة محدبة مستوية (شكل ٢٠ - ٣) فانه يتضح طبقاً لقاعدة الاشارات أنه سواء أ كان السطح المعرض للضوء هو المحدب أم المستوي فان المقدار السابق يكون سالباً أيضاً ولذلك اذا كانت العدسة محدبة مقعرة (شكل ٢٠ - ٤) بمعنى أن أحد سطحيها محدب والآخر مقعر ونصف قطر المحدب أصغر من نصف قطر المقعر (أى التحجب يغلب التقعر) فان المقدار المذكور يكون سالباً أيضاً

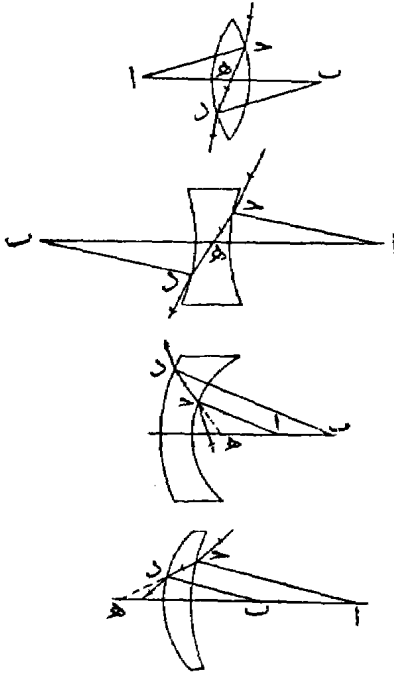
وفي هذه الحالات الثلاث تكون البؤرة حقيقية في الجانب الآخر من العدسة

أما اذا كانت العدسة مقعرة الوجهين (شكل ٢٠ - ٥) أو مقعرة مستوية (شكل ٢٠ - ٦) أو مقعرة محدبة (شكل ٢٠ - ٧) بمعنى أن تقعرها يغلب تحدبها فانه بتطبيق قاعدة الاشارات بالنسبة الى المقدارين m و r يتبين أن المقدار الجبرى المذكور يكون مقداراً موجباً فتكون البؤرة تقديرية في الجانب الواقع منه الضوء

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

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

٧٥ - المركز البصرى وخاصته الطبيعية



(شكل ٦١)

إذا فرضنا أن نقطتي $أ$ و $ب$ (شكل ٦١) مركز تكور سطحين كربين يحددان عدسة ورسمنا $أ$ و $ب$ د نصفى قطرين متوازيين وكان المستقيم الواصل بين نقطتي $أ$ و $ب$ د هو أو امتداده يقطع المحور في نقطة $هـ$ فإنه ينتج من تشابه المثلثين $أهـ$ و $ب$ د $هـ$ أن

$$\frac{أهـ}{ب} = \frac{أ}{ب} = \frac{أ}{ب}$$

باعتبار أن $أ$ رمز لنصف قطر تكور السطح الاول و $ب$ رمز لنصف قطر تكور السطح الثانى

واذن تكون نقطة ه نقطة ثابتة كيفما رسم نصف القطرين ما داما متوازيين لانها تقسم المستقيم الواصل بين المركزين من الداخل أو من الخارج بنسبة نصفي 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 مواز لمسيره قبل وقوعه عليها

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

٧٦ — إيجاد صورة نقطة مضئئة ليست على المحور

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

والخاصة الطبيعية للمركز البصرى تلك الخاصة التى بينها فيما سبق تعيين مسير أحد الأشعة الصادرة من أية نقطة مضئئة بعد نفوذه من العدسة ويتبين مما سبق أنه اذا كانت العدسة لامة أى كان بعدها البؤرى سالباً فالأشعة الواقعة عليها

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

فتكون نقطة ا_١ وهي موضع تقابل امتدادى الشعاعين الخارجين من العدسة هي 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 هي صورة نقطة ب كما يأتى

فالمثلثان ح ا_١ ب_١ و ح د ه متشابهان

$$\therefore \frac{ا ب}{د ه} = \frac{ح ب}{ح د} = \frac{ا ه - د ه}{د ه} \quad \text{باعتبار أن د رمز للبعد البؤرى للعدسة}$$

والمثلثان ه ا_١ ب_١ و ه ا ب متشابهان

$$\therefore \frac{ا ب}{ه ب} = \frac{ا ا_1}{ه ا_1}$$

وبما أن ا ب = د ه

$$\text{يكون} \quad \frac{ا ب}{ه ب} = \frac{ا ه - د ه}{د ه}$$

وبضرب الطرفين ثم قسمة المعادلة على ه ب . ه ب . د ه ينتج أن

$$\frac{1}{د} = \frac{1}{ه ب} - \frac{1}{ا ب}$$

دالا ذلك على أن نقطة ب_١ هي صورة نقطة ب

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

ويمكن أن نرسم من نقطة ا مسير شعاع مثل ار يقع وامتداده مار بنقطة و فاذا

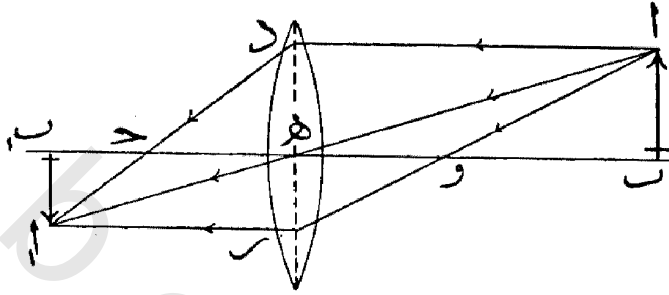
كانت نقطة ر موضع تقابله والمستوى الرئيسى فان مسيره بعد نفوذه من العدسة يمر بنقطة ر

ويكون موازياً للمحور فنقطة تقابل امتداد هذا الشعاع وامتداد احد الشعاعين الآخرين تكون

هي أيضاً صورة النقطة ا وسنرى فيما بعد أن امتدادات الاشعة الثلاثة تتقابل في نقطة واحدة

٧٨ — إيجاد الصورة التي تتكون بواسطة العدسة اللامة لجسم امامها

(أولاً) اذا كانت الصورة حقيقية



(شكل ٦٣)

لنفرض الفروض التي تقدمت في البند السابق مع ملاحظة أن بؤرة العدسة وهي نقطة $ح$ (شكل ٦٣) تكون في الجانب الثاني من العدسة ونقطة $و$ (وهي البؤرة الرئيسية الأولى)

في الجانب الموجود فيه الجسم وليكن $د هـ$ المستوى الرئيسي وليكن موضع الجسم $ا ب$ على بعد من العدسة أكبر من بعدها البؤري

نرسم من $ا$ مسار الشعاع $ا هـ$ المار بالمركز البصري فهذا ينفذ على استقامة $ا هـ$ ثم نرسم مسار الشعاع $ا د$ الساقط موازياً للمحور فيكون مسيره بعد النفوذ من العدسة في استقامة $د ح$. وهذان الشعاعان يتقابلان فعلاً في نقطة $ا'$ تكون هي صورة $ا$ واذا اسقط من $ا'$ العمود $ا' ب'$ على المحور تكون نقطة $ب'$ صورة نقطة $ب$ ويمكن بيان ذلك كما في الحالة السابقة حيث ينتج أن

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{u} + \frac{1}{f}$$

وهذا يتفق والمعادلة العامة نظراً لان البعد البؤري في الحالة التي نحن بصدها مقدار سالب وكذلك بعد الصورة بمقدار سالب

ويمكن رسم مسار الشعاع الذي يمر عند سقوطه بالنقطة $و$ فهذا عند نفوذه من العدسة يكون مسيره موازياً للمحور وسنرى فيما يلي أن الأشعة الثلاثة تتقابل في نقطة $ا'$ ويتبين من الرسم أن الصورة التي تحدث في هذه الحالة صورة حقيقية مقلوبة في الجانب الآخر من العدسة

(ثانياً) اذا كانت الصورة تقديرية

يوضع الجسم $ا ب$ في هذه الحالة بحيث يكون واقعا بين نقطة $و$ (شكل ٦٣) والعدسة أي

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

٧٩ - إيجاد نسبة طول الصورة الى طول الجسم - التكبير

يعرف التكبير كما في حالة المرايا الكرية بأنه نسبة طول الصورة الى طول الجسم أو بوجه عام نسبة أى بعد طولى في الصورة الى البعد الطولى الذى يقابله من الجسم
وإذا راعينا حالة العدسة المفرقة (شكل ٦٢) يتضح من تشابه المثلثين Δ ab_1h_1 و Δ ab_2h_2

$$\text{أن } \frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{h_1}{h_2} \dots \dots (١)$$

ومن تشابه المثلثين Δ ab_1h_1 و Δ ab_2h_2

$$\text{أن } \frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{h_1}{h_2} = \frac{u - e}{u} = \frac{e - u}{u} = \frac{v}{u} = \frac{a_1}{a_2}$$

وبما أن $a_1 = a_2$ يكون

$$\dots \dots (٢) \quad \frac{u - e}{u} = \frac{a_1}{a_2}$$

ومن تشابه المثلثين Δ ab_1h_1 و Δ ab_2h_2 أن

$$\frac{u}{e + u} = \frac{v}{u} = \frac{a_1}{a_2}$$

وبما أن $a_1 = a_2$ يكون

$$\dots \dots (٣) \quad \frac{u}{u + e} = \frac{a_1}{a_2}$$

ويمكن بالتعويض بدلا من u في المعادلتين (٢) و (٣) قيمتها المستخرجة من المعادلة

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{v} - \frac{1}{f}$$

بيان أن النسب الثلاث متساوية واذن تكون نقطة A_1 هي نقطة تقابل امتدادات الأشعة النافذة من العدسة

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

٨٠ - الصور التي تتكون بواسطة العدسة الرقيقة . مواضعها وصفاتها

(أولا) العدسة اللامة

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

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{v} - \frac{1}{f} \quad \text{و التكبير} = \frac{v}{u}$$

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

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{f} = \frac{1}{v}$$

(١) الجسم على بعد لا نهاية له من العدسة

$$\frac{1}{u} = 0 \quad \therefore \infty = \frac{1}{v} - \frac{1}{f}$$

واذن الصورة تكون في البؤرة وهي في الجانب الآخر من العدسة وحقيقية

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

$$\text{أى} \quad \infty > v > 2f$$

$$\therefore \frac{1}{e} > \frac{1}{u_2} < \text{صفر}$$

$$\therefore \frac{1}{e} - < \frac{1}{u_2} - > \frac{1}{u}$$

$$\therefore \frac{1}{e} - > \frac{1}{u_2} - < u -$$

واذن الصورة تقع في الجانب الآخر من العدسة فهي حقيقية وعلى بعد يتراوح بين البعد البؤرى وضعفه وهي مصغرة ومقلوبة

(٣) الجسم على بعد يساوى ضعف البعد البؤرى

$$\text{أى } u = 2e$$

$$\therefore \frac{1}{e} - = \frac{1}{u_2} -$$

واذن الصورة تقع في الجانب الآخر من العدسة فهي حقيقية وعلى بعد يساوى ضعف البعد البؤرى وهي مساوية للجسم ومقلوبة

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

$$\text{أى } e < u_2 < u$$

$$\therefore \frac{1}{e} < \frac{1}{u_2} < \frac{1}{u}$$

$$\therefore \frac{1}{e} - > \frac{1}{u_2} - < \text{صفر}$$

$$\therefore \frac{1}{e} - < \frac{1}{u_2} - > \infty -$$

واذن الصورة تقع في الجانب الآخر فهي حقيقية وعلى بعد اكبر من ضعف البعد البؤرى وأقل من ما لا نهاية له وهي مكبرة ومقلوبة

(٥) الجسم في البؤرة

$$\text{أى } u = e$$

$$\therefore \frac{1}{e} = \frac{1}{u}$$

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

(٦) الجسم بين البؤرة والعدسة

أى $e > f$ < صفر

$$\therefore \frac{1}{e} < \frac{1}{f} < \infty$$

$$\therefore \frac{1}{e} \text{ مقدار موجب أقل قيمة من } \frac{1}{f}$$

$$\therefore e \text{ مقدار موجب أكبر قيمة من } f$$

واذن الصورة في الجانب الموجود فيه الجسم فهي تقديرية وعلى بعد أكبر من بعد الجسم

وهي مكبرة ومعتدلة

(ثانياً) العدسة المفرقة

في هذه الحالة المعادلة الدالة على علاقة بعد الجسم عن العدسة وبعد صورته عنها هي

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{f} - \frac{1}{v} \quad \text{حيث تكون إشارة } v \text{ موجبة}$$

واذن أياً كانت قيمة e فما دامت موجبة فإن قيمة $\frac{1}{e}$ موجبة وأكبر من قيمة $\frac{1}{f}$ واذن قيمة

e تكون موجبة وأصغر من قيمة f

واذن الصورة تكون في الجانب الموجود فيه الجسم فهي تقديرية وتكون مصغرة معتدلة

٨١ - رسم مسير الأشعة التي ترى العين بها صورة تحدث بوساطة عدسة

(أولاً) اذا كانت العدسة لامة والصورة حقيقية

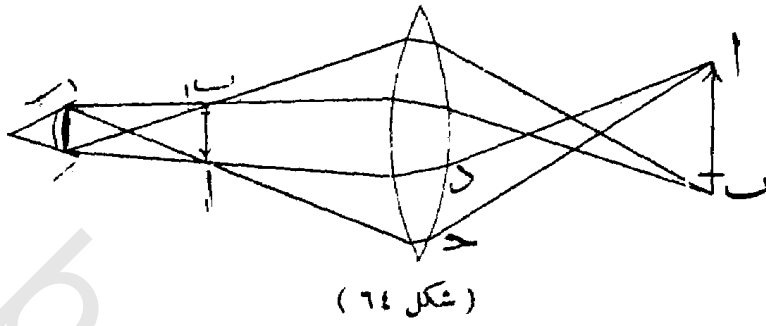
نفرض أن ab (شكل ٦٤) الجسم ولتعين صورته $a'b'$ اما بالرسم واما بتطبيق القانون

فالعين في وضعها المبين بالشكل ترى نقطة مثل a من جراء وقوع مخروط الأشعة الذي رأسه عند

a عليها فاذا مدت هذه الأشعة حتى تقطع سطح العدسة أو بالأحرى المستوى الرئيسى ثم وصلت

نقط تقابلها وهذا المستوى بنقطة a' تكون المخروط a' حد فهذا بعد نفوذه من العدسة يلم في نقطة

١ سم يقع على العين واذن يمثل الأشعة التي ترى العين بها الصورة



وبالمثل يمكن رسم

مخروط الأشعة التي ترى

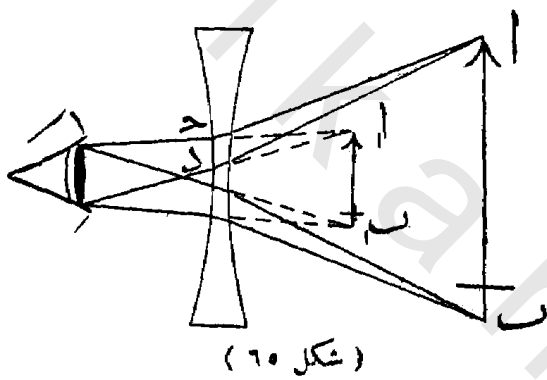
العين بها صورة أية نقطة

أخرى

(شكل ٦٤)

(ثانياً) إذا كانت الصورة تقديرية

نفرض أن الصورة التقديرية تتكون بواسطة عدسة مفرقة وليكن ا ب الجسم (شكل ٦٥)



ثم نعين صورته ا ب اما بالرسم واما بتطبيق

القانون

فالعين في موضعها المبين بالشكل ترى الصورة

ا بمخروط من الأشعة يمر امتداده بنقطة ا فاذا رسم

هذا المخروط تقابل العدسة أو بالأحرى مستواها

(شكل ٦٥)

الرئيسي في نقط اذا وصلت بنقطة ا تكون المخروط ا ح فلهذا بعد نفوذه من العدسة يقع على

العين كأنه صادر من نقطة ا فهو يمثل اذن الأشعة التي ترى العين بها الصورة ا وبالمثل يمكن

رسم مخروط الأشعة التي ترى العين بها صورة أية نقطة أخرى

٨٢ — الصور الحقيقية التي قد تتكون بالانعكاس عن سطح مرآة مستوية أو محدبة

أو بفعل عدسة مفرقة

الصور التي تتكون بالانعكاس عن سطح مرآة مستوية أو مرآة كرية محدبة أو بفعل عدسة

مفرقة للأجسام المله جودة أمامها والتي تصدر منها فعلا الأشعة الساقطة تكون دائماً صوراً تقديرية

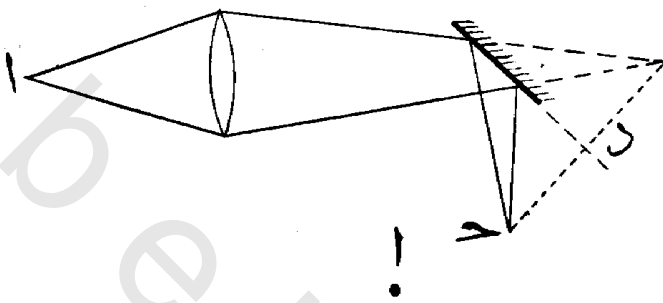
ولكن قد يحدث أحيانا أن الأشعة تسقط على سطح المرآة المستوية أو المحدبة أو على سطح العدسة

المفرقة ولا تكون صادرة من نقطة أمامها وإنما تمر امتداداتها بنقطة خلف سطح المرآة أو في

الجانب الآخر من العدسة وتكون هذه النقطة بمثابة « جسم تقديري » فتكون لهذا الجسم

التقديرى صورة حقيقية

فإذا فرضنا أن عدسة لامة أحدثت لجسم وليكن نقطة مضيئة عند ا (شكل ٦٦) صورته حقيقية عند ب ووضعنا مرآة مستوية مثلاً بين الصورة والعدسة اللامة وكان السطح



العاكس للمرآة متجهاً قبل ب العدسة فلاشعة الواقعة على المرآة كانت تتقابل عند ب لولا وجود المرآة فنقطة ب

يمكن أن نعدها جسماً تقديرياً

(شكل ٦٦)

بالنسبة الى المرآة . فإذا اسقطنا من ب العمود ب د على سطح المرآة أو امتداده ومددنا العمود الى نقطة ح بحيث يكون ب د = د ح فإن نقطة ح تكون الصورة الحادثة بالانعكاس للجسم التقديرى ب وهذه الصورة حقيقية أمام السطح العاكس . ونحن اثبات أن نقطة ح 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 ح

وإذا وضعنا بدلاً من المرآة المستوية مرآة كرية محدبة سطحها العاكس قبل العدسة بحيث يكون محورهما منطبقاً على محور العدسة أو يكاد، أمكن فى هذه الحالة أيضاً اعتبار نقطة ب جسماً 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

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{v} + \frac{1}{f}$$

حيث تكون اشارة u أيضاً سالبة

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad \therefore$$

فاذا كانت $e > r$ تكون قيمة e موجبة واذن تكون الصورة الحادثة حقيقية أما اذا كانت $e < r$ فان قيمة e 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 مقدارا سالبا وتكون علاقة بعد الجسم عن العدسة ببعد الصورة طبقا للمعادلة

$$\left(\text{حيث يلاحظ أن البعد البؤرى موجب} \right) \quad \frac{1}{e} = \frac{1}{r} - \frac{1}{s}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{e} - \frac{1}{r} = -\frac{1}{s}$$

فتكون قيمه e سالبة اذا كانت $e > r$ وفي هذه الحالة لاتكون الصورة في الجانب الذى يقع منه الضوء وانما في الجانب الآخر حيث يقاس بعد الصورة عن العدسة في اتجاه الاشعة الساقطة عليها وتكون الصورة حقيقية . أما اذا كانت $e < r$ 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 راينا حالة العدستين المتلاصقتين ورمزنا لبعديهما البؤريين بالرمزين r_1 و r_2 وفرضنا أن جسما موضوعا على بعد من الاولى نرمز له بالحرف e فانه يتكون من انكسار الضوء خلال العدسة الاولى صورة اذا رمزنا لبعدها عن العدسة الاولى بالحرف s يكون

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{e} - \frac{1}{r_1}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{s} + \frac{1}{r_1} = \frac{1}{e} \quad \dots \dots (١)$$

وهذه الصورة تعتبر جسماً بالنسبة الى العدسة الثانية ونظراً لأن العدستين متلاصقتان يكون بعده عنها s أيضاً فإذا رمزنا لبعد الصورة التي تحدث من جراء انكسار الضوء خلال هذه العدسة بالرمز s_2 يكون

$$\frac{1}{s_2} = \frac{1}{s} - \frac{1}{f_2}$$

وبالتعويض عن s قيمتها من المعادلة (١) ينتج أن

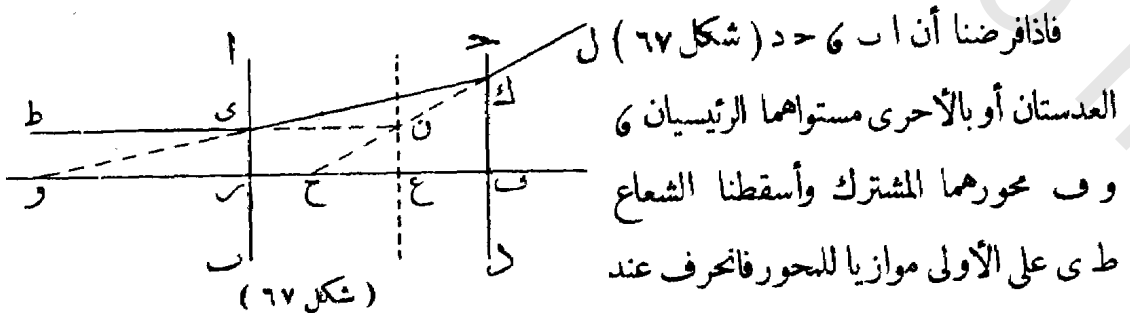
$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{s} - \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

اذن نرى ان العدستين معا يعملان عمل عدسة مفردة بعدها النورى s يتعين من المعادلة

$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{s}$$

٨٤ - القطعة المركبة من عدستين منفصلتين - العدسة المكافئة

أما اذا كانت القطعة مركبة من عدستين منفصلتين وكان محوراها 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 بواسطة العدستين نوعاً ووضعاً أى 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)



نفوذه منها في استقامة ϵ ك ثم انحرف عند نفوذه في الثانية في استقامة ϵ ل وكان امتداد ϵ يقطع امتداد ϵ ل في نقطة ϵ يتبين من الشكل أنه اذا وضعت عدسة مفردة عند ϵ بحيث يكون مستواها الرئيسي ϵ وكانت بؤرتها نقطة ϵ (موضع تقابل امتداد ϵ ل والمحور) فان هذه العدسة على حداثها تحرف الشعاع ϵ ل عند وقوعه عليها بحيث ينفذ منها في استقامة ϵ ل فتكون هي العدسة المكافئة

ويتبين من هذا ان للعدسة المكافئة بعداً بؤرياً معيناً ولها موضع معين يلزم وضعها فيه ولايجاد بعدها البؤري نرسم للبعد البؤري للعدسة الاولى ϵ ب بالرمز ϵ وللثانية بالرمز ϵ وللبعدين العدستين بالحرف ϵ ونمد ϵ ل حتى يقطع المحور في نقطة ϵ و (حيث تكون هذه النقطة بؤرة العدسة الاولى) فالشعاع ϵ ل الواقع على العدسة الثانية يقع عليها كأنه صادر من نقطة ϵ و ينفذ منها كأنه صادر من نقطة ϵ ولذلك يمكن اعتبار نقطة ϵ جسماً بالنسبة الى العدسة الثانية ونقطة ϵ الصورة التي تتكون بواسطتها فاذا رمزنا لبعدها عنها بالحرف ϵ يكون

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon}$$

$$\frac{\epsilon + \epsilon + \epsilon}{(\epsilon + \epsilon) \epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \quad \therefore$$

$$\therefore \frac{(\epsilon + \epsilon) \epsilon}{\epsilon + \epsilon + \epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \quad \dots\dots (1)$$

فاذا رمزنا للبعد ϵ ح وهو البعد البؤري للمكافئة بالحرف ϵ يتضح من تشابه المثلثين

ϵ ح ϵ ك ف أن

$$\frac{\epsilon}{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon}$$

ومن تشابه المثلثين ϵ ر ϵ و ك ف أن

$$\frac{r}{f} = \frac{r}{s + f} \quad \text{وبما أن } r = e \text{ نـ}$$

$$\frac{r}{s + f} = \frac{r}{e} \quad \text{يكون}$$

وبالتعويض عن e قيمتها من المعادلة (١) ينتج أن

$$(٢) \quad \dots \dots \frac{r}{s + f + f} = \frac{r}{e}$$

$$(٣) \quad \dots \dots \frac{r}{s + f} + \frac{r}{f} + \frac{r}{f} = \frac{r}{e} \quad \text{أو}$$

وبعد المكافئة عن العدسة الثانية $d > 0$ هو

$$f - e = d$$

ومن معادلتى (١) و (٢) ينتج أن

$$(٤) \quad \dots \dots \frac{r}{s} = \frac{r}{s + f + f} = f - e$$

ومن المعادلة (٤) يتضح أن بعد المكافئة عن العدسة الثانية يساوى حاصل ضرب البعد

البؤرى للمكافئة في البعد بين العدستين مقسوماً على البعد البؤرى للعدسة الأولى

والعدسة المكافئة لها خاصية طبيعية تتضح إذا تصورنا أن الشعاع ط ي كل قد عكس

مسيره، اذن هو ينفذ من العدستين أو من المكافئة وحدها في استقامة ط فاذا كان الشعاع

واقعا على العدسة d من رأس جسم كانت صورة رأس الجسم واقعة على استقامة ط سواء

أ كانت 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 في الكبر الصورة النهائية التى تحدث بوساطة العدستين