

الفصل الخامس

1. المرايا (Mirrors)

المِرْآة هي أداة لها القابلية على عكس الضوء بطريقة تحافظ على الكثير من صفاتها الأصلية. تخضع الصورة المتكونة في المرايا الى قوانين الانعكاس . تمتاز الصور المتكونة في المرايا بخلوها من التأثيرات اللونية (الزيغ اللوني) الذي سوف نتطرق له في الفصل اللاحق . تستخدم المرايا في كثير من الاجهزة البصرية والأدوات المنزلية والصناعية والطبية لما لها من مميزات في تكوين صور بأشكال وأحجام مختلفة .

ان الوظيفة الأساسية للمرايا هي تكوين الصور (image formation) باستخدام خواص انعكاس الضوء ، بالإضافة الى تركيز (concentration) وتشتيت (dispersion) وتسييد (collimation) الضوء . تمتاز المرآة بوجود وسط فعال واحد هو الوسط الذي يسقط منه وينعكس اليه الضوء بخلاف العدسة التي تحتوي ثلاثة اوساط فعالة . يصنع السطح العاكس للمرآة من معدن الالمنيوم غالبا وبعض المعادن التي لها انعكاسية عالية مثل الفضة والزئبق والنيكل .

2. أنواع المرايا (Types of Mirrors)

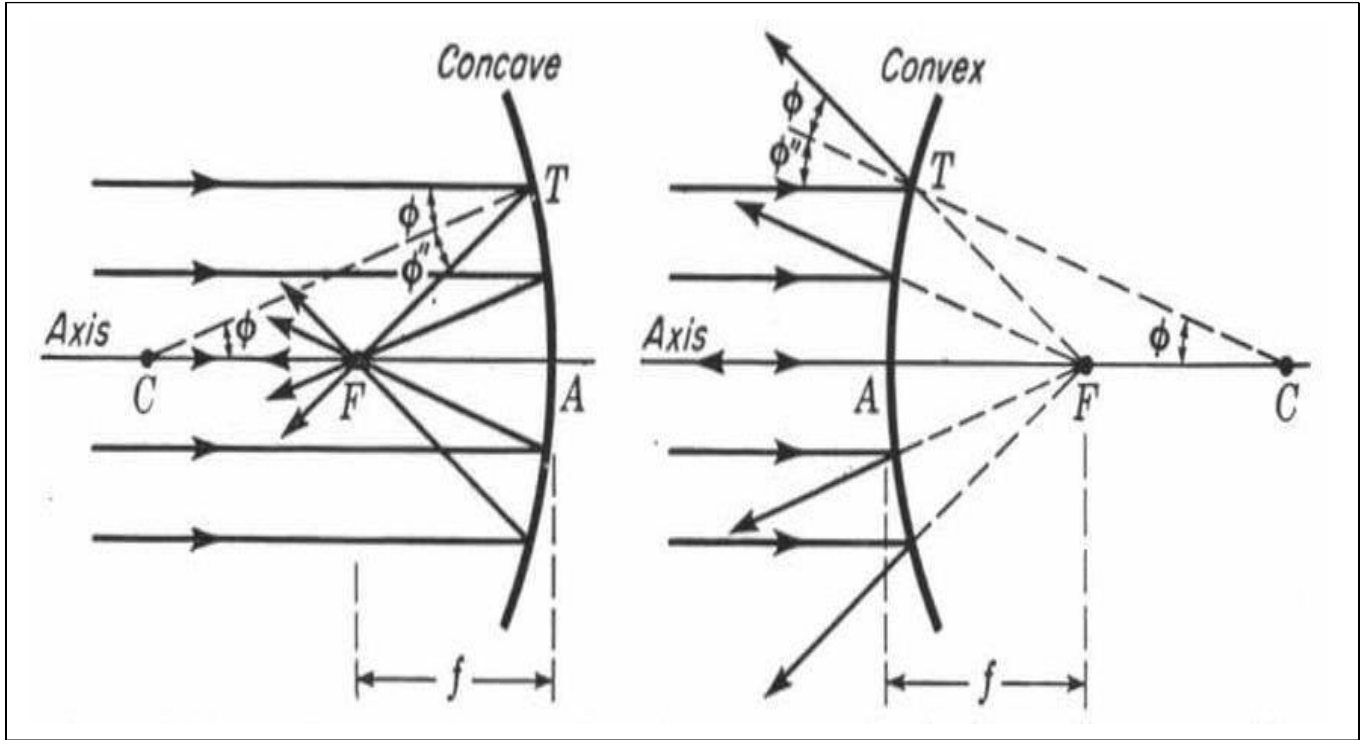
هناك ثلاثة أنواع من المرايا تختلف حسب شكلها وطريقة تكوين الصور فيها هي : المرايا المستوية (plane mirrors) (سطحها غير منحنى) التي تستخدم في مجالات صناعية وطبية ومنزلية، والمرايا الكروية (spherical mirrors) التي يكون سطحها جزء من كرة ولها مركز تكور بنوعها المحدبة (convex) التي لها خاصية تفريق الضوء المنعكس (مرآة مفرقة) ، والمقعرة (concave) التي لها خاصية تجميع الضوء المنعكس (مرآة لامة) التي تستخدم في مجالات صناعية وعلمية وطبية متعددة، بالإضافة الى المرايا غير الكروية (سطحها قطع مكافئ) التي تستخدم في صناعة الأطباق اللاقطة .

3. هندسة المرايا (Geometry of Mirrors)

تتكون المرآة الكروية من سطح عاكس للضوء يرتد من خلاله الضوء الى الوسط الاول، لذلك تمتلك المرآة بؤرة واحدة فقط ومركز تكور كلا النقطتان تقعان على يمين المرآة المحدبة وعلى يسار المرآة المقعرة ، بينما المرآة المستوية لا تمتلك مركز تكور ولا بؤرة .

يسمى المستقيم العمودي على سطح المرآة والذي يمر في مركز تكورها المحور البصري أو محور المرآة (axis) كما في الشكل (1) ، نقطة تقاطع المحور البصري مع المرآة تسمى السميت (vertex) التي تعتبر النقطة المرجعية التي تحسب منها كل الابعاد البصرية الخاصة بالمرآة ، بما ان المرآة تمتلك بؤرة واحدة لذا يكون لها بعد بؤري واحد يمتد من البؤرة الى سميت المرآة (f) . البؤرة لها خاصية ان اي شعاع صادر منها (المرآة المقعرة) او متجة اليها (المرآة المحدبة) يسير بعد

الانعكاس موازي للمحور البصري ، أو ان اي شعاع موازي للمحور البصري يسير بعد الانعكاس متجه اليها (المرآة المقعرة) او كأنه صادر منها (المرآة المحدبة) .



الشكل (1) : المرايا الكروية . المحدبة (يمين) والمقعرة (يسار)

4. تكوين الصور (Image Formation)

عند انتقال الضوء الصادر من الجسم وانعكاسه من المرآة الى الوسط الاول يحدث تقاطع للأشعة المنعكسة وبالتالي تتكون صورة للجسم لها صفات معينة تحدد من خلال طريقتين : طريقة الرسم (graphical method) التي تتالف من طريقتين الاولى طريقة الشعاع الموازي (ray method parallel) والثانية طريقة الشعاع المائل (method oblique ray) ، والطريقة الرياضية (mathematical method) التي من خلالها اشتقت العلاقة الرياضية الخاصة بتكوين الصور في المرايا التي تسمى صيغة كاوس للمرايا.

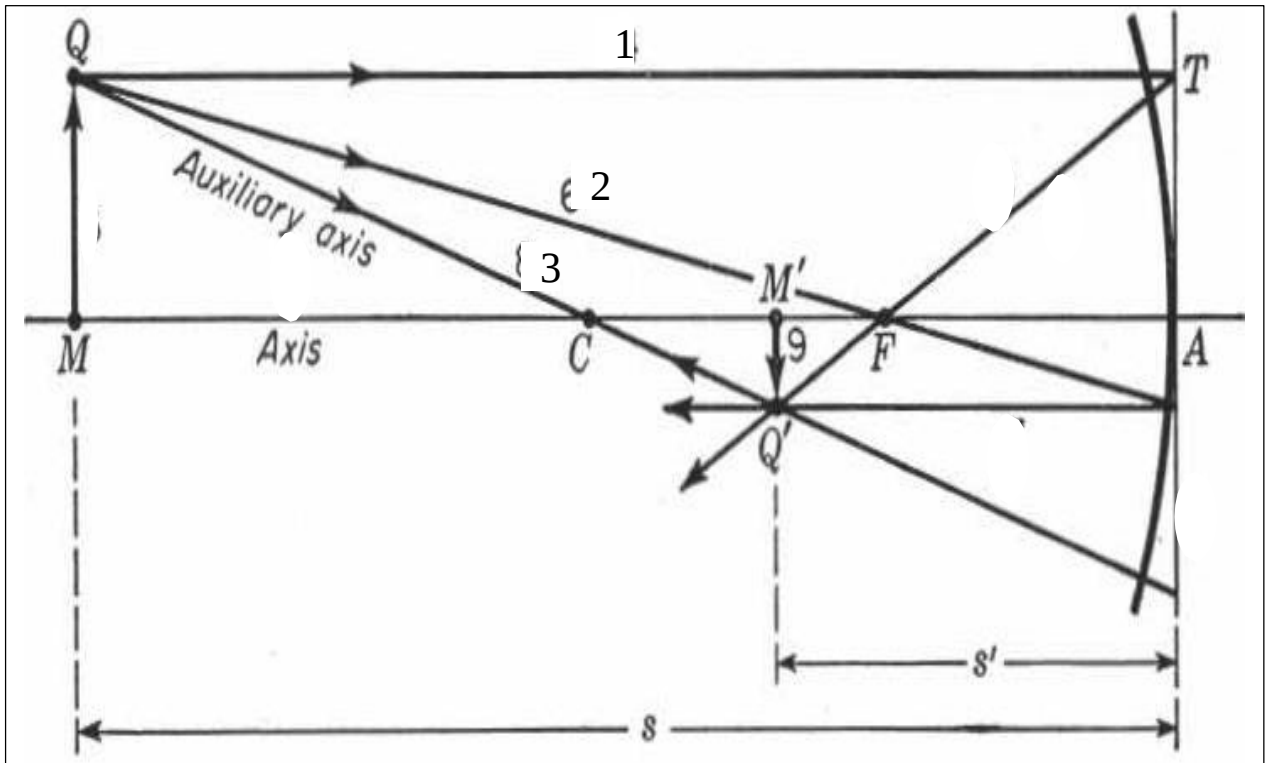
طريقة الرسم (Graphical Method)

(10)

هناك طريقتان للرسم يمكن من خلالها تكوين ثلاث اشعة متقاطعة بعد الانعكاس من المرآة لتكوين نقاط مترافقة ، هي طريقة الشعاع الموازي (parallel ray method) لتكوين الصور للجسام الشاحصة (اجسام لها ابعاد) ، وطريقة الشعاع المائل (oblique ray method) لتكوين صور للجسام النقطية (اجسام لا بعد لها) .

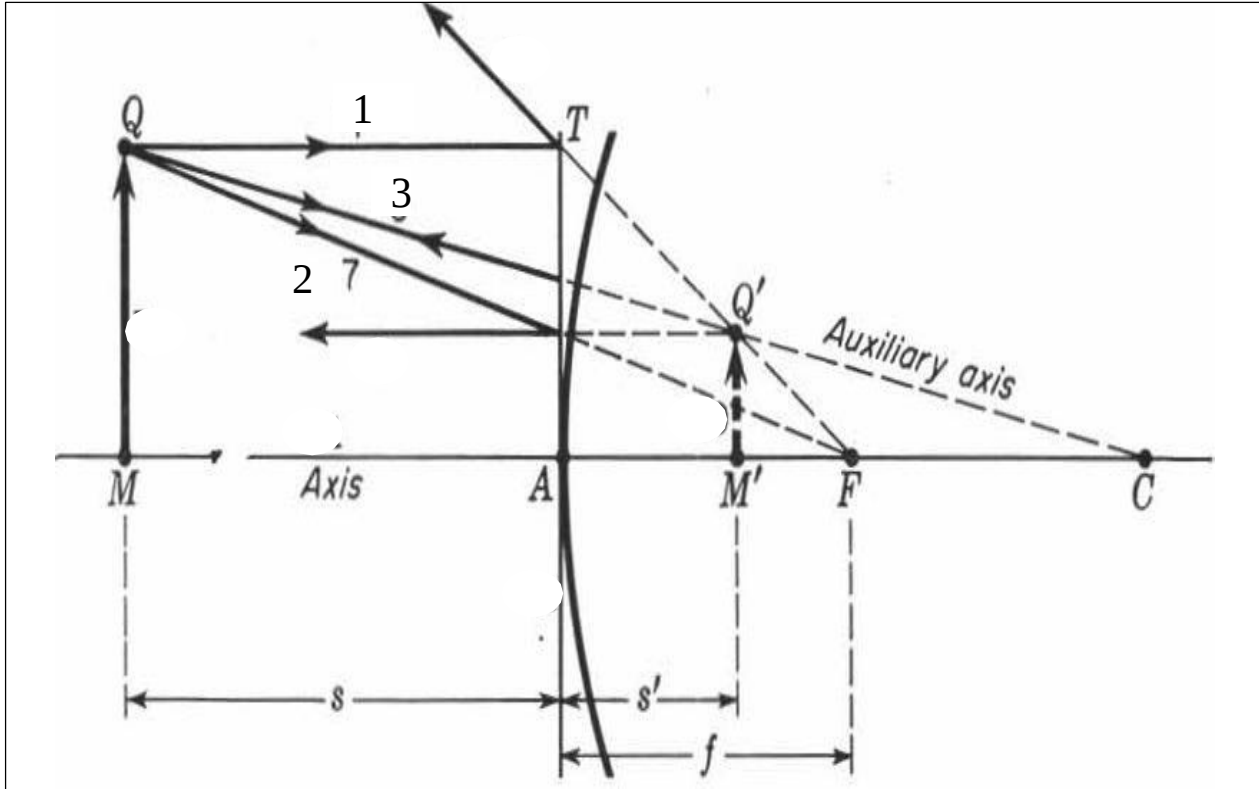
C. طريقة الشعاع الموازي (Parallel Ray Method)

تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للأجسام الشاخصة وكما موضح في الشكل (2). نفرض ان الجسم (MQ) جسم محوري (واقع على المحور البصري) على يسار المرآة المقعرة يبعث ثلاثة أشعة (1,2,3) من النقطة (Q). الشعاع (1) موازي للمحور البصري فيسير بعد الانعكاس باتجاه البؤرة (حسب تعريف البؤرة)، والشعاع (2) يمر بالبؤرة فيسير بعد الانعكاس موازيا للمحور البصري (حسب تعريف البؤرة)، والشعاع (3) يمر بصورة عمودية على المرآة بحيث يمر نحو مركز تكورها ويرتد منعكسا في نفس الاتجاه، يسمى الشعاع (3) الشعاع الأساسي (principal ray)، تتلاقى الأشعة الثلاثة في نقطة واحدة بعد الانعكاس لتكون صورة حقيقية في نقطة (Q')، تسمى زوج النقاط (QQ') بالنقاط المترافقة. النقطة (Q') تمثل صورة لنقطة الجسم (Q)، الجدير بالذكر ان تكوين النقاط المترافقة يتطلب وجود شعاعين متقاطعين أو أكثر. وب نفس الطريقة يمكن تكوين مجموعة من أزواج النقاط المترافقة للجسم والصورة فتتكون صورة مقلوبة (M'Q') للجسم (MQ).



الشكل (2) : طريقة الشعاع الموازي لتكوين الصورة الحقيقية في المرآة المقعرة

يمكن استخدام نفس الطريقة للمرآة المحدبة وباستخدام ثلاثة أشعة وتقاطعها بعد الانعكاس باستخدام تعريف البؤرة للمرآة المحدبة وكما موضح في الشكل (3) فنتكون صورة للنقطة (Q) هي نقطة (Q') تنتج من تقاطع امتدادات الأشعة المنعكسة وبالتالي تكون الصورة خيالية (حسب تعريف الصورة الخيالية) .



الشكل (3) : طريقة الشعاع الموازي لتكوين الصورة الخيالية في المرآة المحدبة

D. طريقة الشعاع المائل (Oblique Ray Method)

تستخدم هذه الطريقة لتكوين الصور للأجسام النقطية وكما موضح في الشكل (4) . نفرض ان الجسم النقطي (M) هو جسم محوري يبعث شعاع مائل (3) ويقطع المرآة في نقطة (T) . لمعرفة مسار الشعاع (3) بعد الانعكاس على المرآة نرسم شعاع أساسي (4) موازي له يمر في بؤرة المرآة ويرتد منعكسا موازيا للمحور البصري ويتقاطع مع المستوى البؤري في نقطة (P) ، نصل النقطتين (T,P) فيكون مسار الشعاع (3) بعد الانعكاس ، ويمتد المستقيم (TP) الى ان يتقاطع مع المحور البصري في (M') التي تمثل صورة الجسم النقطي (M) .

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{\infty} = -\frac{2}{r}$$

$$\frac{1}{f} = -\frac{2}{r} \quad \text{or} \quad f = -\frac{r}{2} \quad \dots \dots (2)$$

هناك حالة خاصة بالمرآيا المستوية كون سطحها لا يمتلك تكور (أي ان نصف قطر تكور سطحها $r = \infty$) فتكون صيغة كاوس :

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{\infty} = 0$$

$$s = -s' \quad \dots \dots (3)$$

$$\frac{1}{f} = -\frac{2}{\infty} \Rightarrow f = \infty$$

تسمى المعادلة (3) صيغة كاوس للمرآيا المستوية . توضح المعادلة (3) تساوي بعد الجسم مع بعد الصورة في المرآيا المستوية دائما وكذلك الصورة دائما خيالية مهما كان موقع الجسم .

5. التكبير الجانبي (Lateral Magnification)

يعرف التكبير الجانبي للمرآة (m) بأنه النسبة بين البعد المستعرض للصورة (y') الى البعد المستعرض للجسم (y) ، او النسبة بين بعد الصورة الى بعد الجسم .حسب المعادلة :

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \quad \dots \dots (4)$$

6. قدرة المرآة (Power of Mirror)

تتمثل قدرة المرآة (P) في قابلية المرآة على تجميع (converging) او تفريق (diverging) الاشعة الضوئية الساقطة عليها ، وتحسب القدرة من خلال صيغة كاوس ايضا مع مراعاة استخدام الابعاد بالامتار (meter) لتظهر قيمة القدرة بوحدات خاصة تسمى الديوبيتتر (Diopeter) ، وكما موضح في المعادلة :

$$P = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = -\frac{2}{r} \quad \dots \dots (5)$$

7. اصطلاح الإشارات (convention of signs)

ان الطريقة الهندسية المتبعة لمعرفة صفات الصورة في المرآة يجب فيها مراعاة اتجاه انتشار الاشعة الضوئية وموقع الجسم والصورة ونوع المرآة (لامة او مفرقة) ، لكي تتحقق النتائج الحسابية الصحيحة من خلال تطبيقها في صيغة كاوس ، فلذلك يجب الاتفاق على مجموعة فقرات تخص الإشارات الخاصة بالصيغة وكما يلي :

- (11) يرسم مسار الأشعة الضوئية متجها الى الوجه العاكس للمرآة بغض النظر للاتجاه .
- (12) اذا كان الجسم والصورة يقعان امام السطح العاكس للمرآة يعتبران حقيقيان وبعدهما موجب $(s, s' +)$ ، واذا كان الجسم والصورة يقعان خلف السطح العاكس للمرآة يعتبران خياليان وبعدهما سالب $(s, s' -)$
- (13) يعتبر البعد البؤري كمية موجبة $(+f)$ للمرآة المقعرة (concave mirror)، ويعتبر البعد البؤري كمية سالبة $(-f)$ للمرآة المحدبة (convex mirror)
- (14) نصف قطر التكور للمرآة المقعرة كمية سالبة $(-r)$ ، ونصف قطر التكور للمرآة المحدبة كمية موجبة $(+r)$

تختلف صفات الصورة المتكونة في المرآة حسب نوعها ونوع الوسط المحيط بها ، وكذلك حسب بعد الجسم عنها . وكما ذكرنا في الفصل السابق يعتبر في صفات الصورة المتكونة أربعة أمور هي:

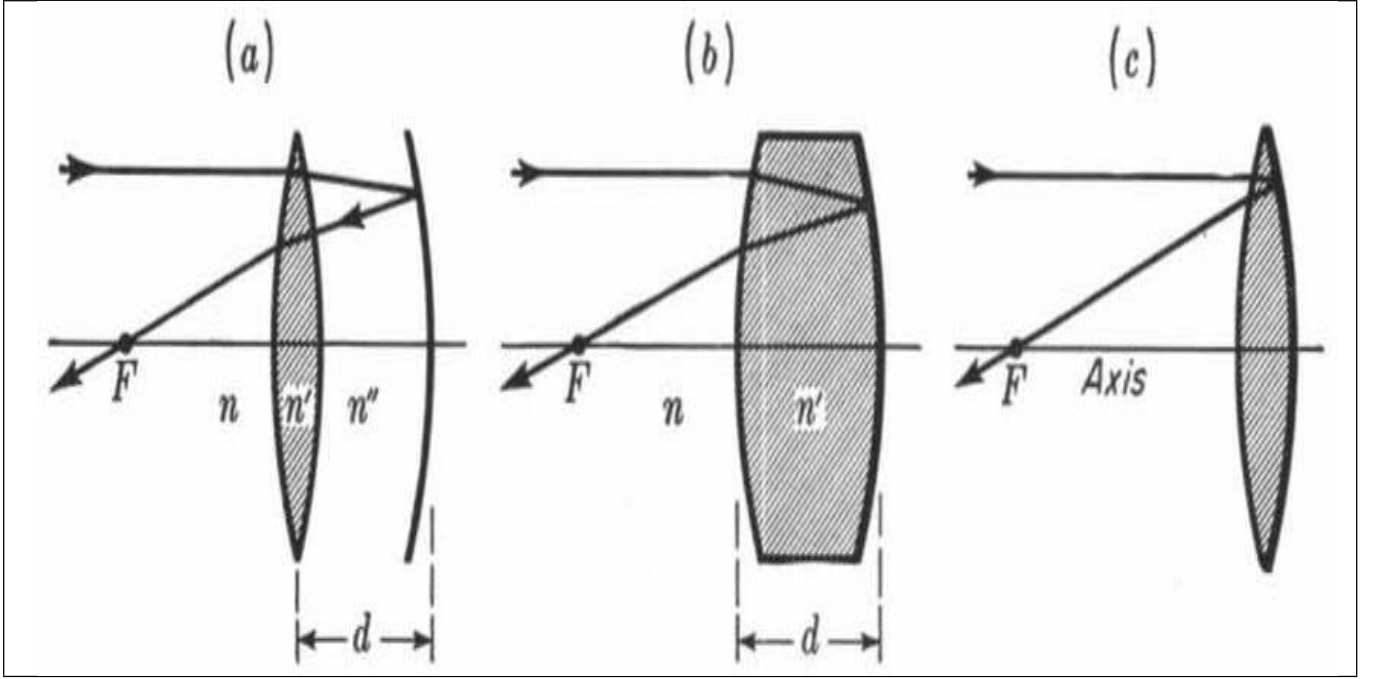
- موقع الصورة (image position)، ويحسب من خلال قيمة (s')
- هل الصورة حقيقية ام خيالية (real or virtual) ، ويحسب من خلال إشارة (s')
- هل الصورة مكبرة ام مصغرة (magnified or minified) ، ويحسب من خلال قيمة (m)
- هل الصورة معتدلة ام مقلوبة (erect or inversed) ، ويحسب من خلال إشارة (m)

لكن هناك بعض النقاط المهمة تتعلق بنوع الصورة المتكونة في المرايا يجب مراعاتها هي:

- ❖ الصورة الحقيقية دائما مقلوبة والصورة الخيالية دائما معتدلة .
- ❖ المرآة المحدبة دائما تكون صورة خيالية مصغرة بغض النظر عن موقع الجسم .
- ❖ المرآة المستوية دائما تكون صورة خيالية بنفس حجم الجسم بغض النظر عن موقع الجسم .
- ❖ المرآة المقعرة تعطي صورة خيالية اذا كان الجسم واقع بين البؤرة والمرآة اي $(s < f)$ ، وتعطي صورة حقيقية اذا كان الجسم ابعد من البؤرة $(s > f)$ ، ولا تتكون صورة اذا كان الجسم واقع في البؤرة اي $(s = f)$ ويمكن التعبير عن الحالة الثالثة بان الصورة واقعة في المالانهاية .

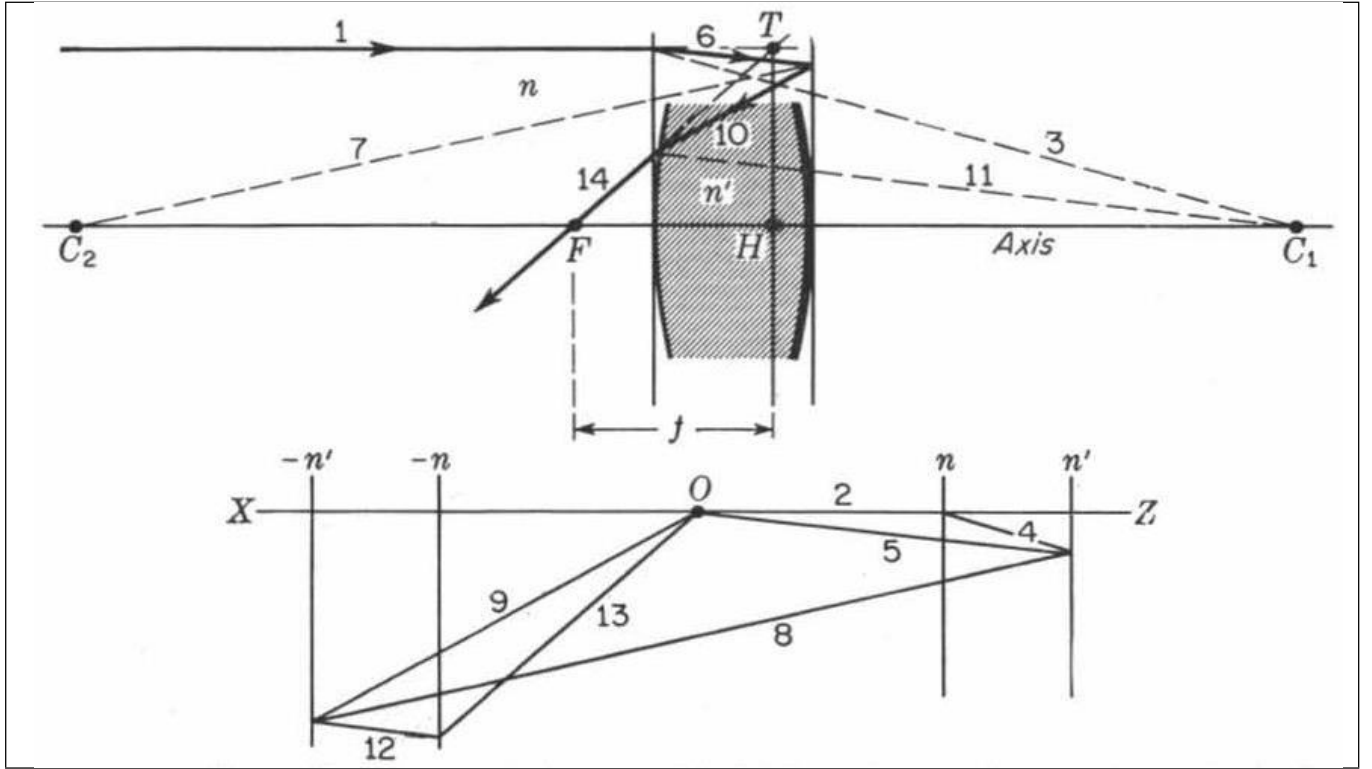
8. المرايا السميكة (Thick Mirrors)

يشير مصطلح المرآة السميكة الى العدسة التي تحتوي على سطح عاكس واحد ، حيث ينفذ الضوء خلال العدسة (ينكسر) ويرتد عن طريق السطح العاكس الى الوسط الأول . هناك ثلاثة أنواع من المرايا السميكة موضحة بالشكل (5) . النوع الأول (الشكل (5-a)) يتألف من عدسة رقيقة لامة (محدبة الوجهين) ومرآة مقعرة سطحها العاكس يواجه العدسة اللامة تفصلهما مسافة (d) ويشتركان بمحور بصري واحد . اما النوع الثاني (الشكل (5-b)) فيتألف من عدسة سميكة لامة (محدبة الوجهين) سمكها (d) احد سطحيها مرآة مقعرة ، بينما النوع الثالث (الشكل (5-c)) يتألف من عدسة رقيقة لامة (محدبة الوجهين) احد سطحيها مرآة مقعرة .



الشكل (5) : أنواع المرايا السميكة

يحتوي النوع الأول والثاني من المرايا السميكة على نقطة أساسية (principal point H) واقعة أمام السطح العاكس ، نقطة تقاطع امتداد الشعاع الساقط مع امتداد الشعاع المنكسر والمنعكس تكون في المستوي الأساسي (principal plane)، يتقاطع المستوي الأساسي مع المحور البصري في النقطة الأساسية (H) . تحتوي المرآة السميكة (بكل أنواعها) على بؤرة واحدة (F) واقعة أمام السطح العاكس ، تتعين من سقوط شعاع موازي للمحور البصري على السطح الأول فينفذ منكسرا الى السطح الثاني ، ومن ثم ينعكس مرتدا الى السطح الاول منكسرا مرة اخرى فينفذ الى الوسط الاول متقاطعا مع المحور البصري في نقطة البؤرة (F) كما موضح في الشكل (6) . يكون البعد البؤري (f) موجبا في كل أنواع المرايا السميكة ويحسب من خلال البعد (FH) .



الشكل (6) : نقطة البؤرة والنقطة الأساسية في المرآة السميكة

9. صيغة المرآة السميكة (Thick Mirror Formula)

تستخدم صيغة المرآة السميكة بدلالة القدرة البصرية ، تحتوي المعادلة العامة للقدرة الكلية للمرآة السميكة على القدرة البصرية لكل جزء ، وأنصاف أقطار التكور للسطوح الكروية مع الأخذ بنظر الاعتبار الأوساط التي يمر بها الضوء خلال مسيره داخل المرآة السميكة .

A. صيغة النوع الاول (Type 1 formula)

ان الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الاول هي :

$$P = \frac{1}{f} = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2) \quad \dots \dots (6)$$

باعتبار $(n=n'')$ فتكون (P_1) تمثل قدرة العدسة الرقيقة ، (P_2) قدرة المرآة المقعرة وكما يلي

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots \dots (7)$$

$$P_2 = -\frac{2n}{r_3} \quad \dots \dots (8)$$

$$c = \frac{d}{n} \quad \dots \dots (9)$$

حيث تمثل (r_2, r_1) انصاف اقطار تكور سطحي العدسة الرقيقة اللامة ، (r_3) نصف قطر تكور المرآة المقعرة ، (d) المسافة من العدسة اللامة الى المرآة المقعرة ، (n) معامل انكسار الوسط بين العدسة الرقيقة والمرآة ، (n') معامل انكسار العدسة الرقيقة .

لايجاد موقع النقطة الاساسية للمرآة السميكة نستخدم العلاقة :

$$H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} \quad \dots \dots (10)$$

ولايجاد موقع البؤرة للمرآة السميكة نستخدم العلاقة :

$$FH = f - H_1H \quad \dots \dots (11)$$

B. صيغة النوع الثاني (Type 2 formula)

ان الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الثاني هي :

$$P = \frac{1}{f} = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

تمثل (P_1) تمثل قدرة السطح الاول للعدسة السميكة ، (P_2) قدرة المرآة المقعرة وكما يلي:

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n) \left(\frac{1}{r_1} \right) \quad \dots \dots (12)$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} \quad \dots \dots (13)$$

d

$$c = \frac{d}{n'} \quad \dots \dots (14)$$

حيث تمثل (r_1) نصف قطر تكور السطح الاول للعدسة السميكة ، (r_2) نصف قطر تكور

المرآة المقعرة ، (d) سمك العدسة السميكة ، (n) معامل انكسار الوسط المحيط بالمرآة السميكة (غالبا

هواء) ، (n') معامل انكسار المرآة السميكة . اما موقع النقطة الاساسية والبؤرة للمرآة السميكة نستخدم العلاقتين (10) ,

C. صيغة النوع الثالث (Type 3 formula)

ان استخدام عدسة رقيقة في النوع الثالث من المرايا السميكة يجعل قيمة سمكها صفر ($d=0$) ، وبالتالي قيمة ($c=0$) ، لذلك تختزل الصيغة العامة للمرآة السميكة للنوع الثالث كالآتي :

$$P = 2P_1 + P_2 \quad \dots \dots (15)$$

تمثل (P_2, P_1) قدرة السطح الاول والثاني للعدسة الرقيقة على الترتيب، وكما يلي:

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n' - n) \left(\frac{1}{r_1} \right)$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2}$$

حيث تمثل (r_2, r_1) انصاف اقطار تكور سطحي العدسة الرقيقة الاول والثاني على الترتيب ، (n) معامل انكسار الوسط المحيط بالعدسة الرقيقة (غالبا هواء) ، (n') معامل انكسار العدسة الرقيقة جدير بالذكر انه لا توجد نقطة اساسية في النوع الثالث من المرايا السميكة بسبب اهمال السمك ($d=0$) ، بينما البؤرة تحسب بطريقة الرسم .

10. مسائل الفصل الخامس (Problems)

1) مرآة مقعرة نصف قطر تكورها (30 cm) . وضع جسم ارتفاعه (4 cm) على مسافة (60 cm) أمام المرآة . جد (a) صفات الصورة المتكونة ، (b) . ارتفاع الصورة .

$$a) \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{r}$$

$$\frac{1}{60} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{-30} \Rightarrow s' = 20 \text{ cm}$$

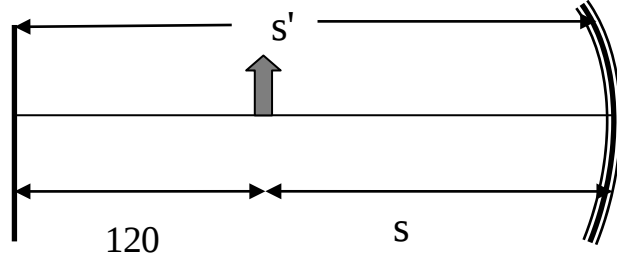
$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{20}{60} = -0.33$$

اذن الصورة حقيقية تقع امام المرآة بمسافة (20 cm) ، كذلك الصورة مصغرة ومقلوبة

$$y' \quad b) m = \quad y$$

$$\Rightarrow -0.33 = \frac{y}{4} \Rightarrow y' = \frac{|-1.33|}{1.33} = \underline{\hspace{1cm}}$$

(2) مرآة مقعرة استخدمت لتكوين صورة لجسم يبعد عن شاشة بمقدار (120 cm) . فإذا كان المطلوب تكوين صورة حقيقية مقلوبة ومكبرة بمقدار (16) مرة على الشاشة . ما هو نصف قطر التكرور المناسب لهذه المرآة ؟



$$s' = 120 + s$$

$$m = -\frac{s'}{s}$$

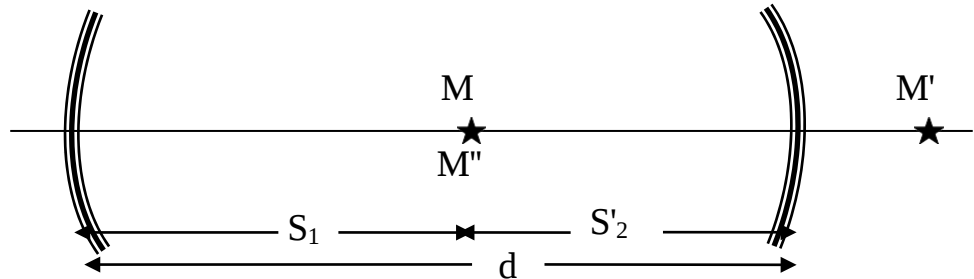
$$-16 = -\frac{120 + s}{s}$$

$$16s = 120 + s \Rightarrow s = \frac{120}{15} = 8 \text{ cm}$$

$$s' = 120 + 8 = 128 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{r} \Rightarrow \frac{1}{8} + \frac{1}{128} = -\frac{2}{r} \Rightarrow r = -15 \text{ cm}$$

(3) مرآتين مقعرتين أنصاف أقطارهما (24 cm) ، (28 cm) ، وضعا بحيث كان سطحيهما العاكسين متقابلين ، ثم وضع جسم على بعد (15 cm) عن المرآة الأولى بحيث انطبق موقع الصورة النهائية على موقع الجسم . جد مقدار المسافة بين المرآتين .



$$d = s_1 + s'_2 = 15 + s'_2 \Rightarrow s'_2 = d - 15$$

$$(mirror 1) \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = -\frac{2}{r_1} \Rightarrow \frac{1}{15} + \frac{1}{s'_1} = -\frac{2}{-24} \Rightarrow s'_1 = 60 \text{ cm}$$

نفرض ان الصورة المتكونة في المرآة الاولى هي بمثابة جسم بالنسبة للمرآة الثانية :

$$s_2 = d - s'_1 = d - 60$$

$$(mirror\ 2) \quad \frac{1}{\frac{s}{2}} + \frac{1}{\frac{s'}{2}} = -\frac{2}{\frac{r}{2}} \Rightarrow \frac{1}{(d-60)} + \frac{1}{(d-15)} = -\frac{2}{-28}$$

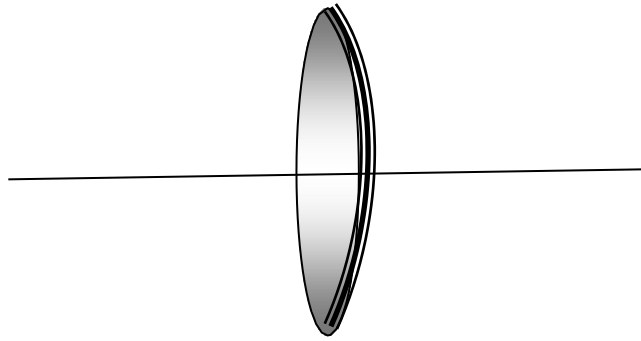
$$\frac{(d-15) + (d-60)}{(d-60)(d-15)} = \frac{1}{14}$$

$$d^2 - 103d + 1950 = 0$$

$$(d-78)(d-25) = 0$$

$$\therefore d = 78\ cm \quad or \quad d = 25\ cm$$

(4) عدسة رقيقة لامة (متساوية التكور) معامل انكسارها (1.6) وانصاف اقطار تكور سطحها (cm) (12) . فضض احد سطحها بحيث اصبح مرآة مقعرة . جد قدرة هذا النظام



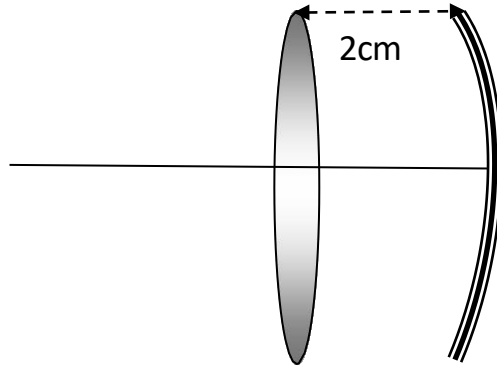
$$P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5\ D$$

$$2n' \quad 2 * 1.6$$

$$P_2 = -\frac{1}{r_2} = -\frac{1}{-12 * 10^{-2}} = 26.6\ D$$

$$P = 2P_1 + P_2 = 2 * 5 + 26.6 = 36.6\ D$$

5) عدسة رقيقة لامة بعدها البؤري (12 cm) موضوع امامها بمسافة (2cm) مرآة مقعرة نصف قطر تكورها (20 cm) . جد : (a) . قدرة المرآة السميكة ، (b) . البعد البؤري للمرآة السميكة ، (c) . موقع النقطة الاساسية وموقع البؤرة .



$$a) P_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{12 * 10^{-2}} = 8.33 D$$

$$P_2 = -\frac{2n}{r} = -\frac{2 * 1}{-20 * 10^{-2}} = 10 D$$

$$c = \frac{d}{n} = \frac{2}{1} = 2 * 10^{-2} = 0.02 m$$

$$P = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

$$P = (1 - 0.02 * 8.33)(2 * 8.33 + 10 - 0.02 * 8.33 * 10) = 20.8 D$$

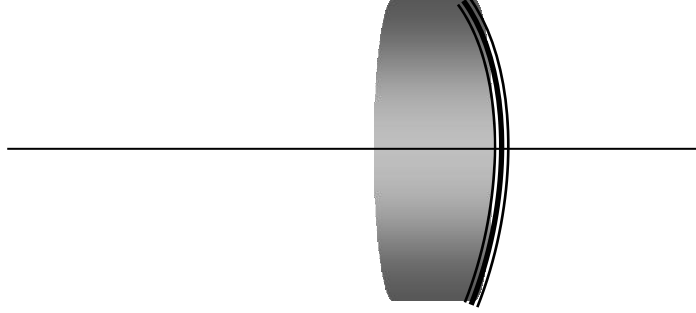
$$b) f = \frac{1}{P} = \frac{1}{20.8} = 0.048 m$$

$$c) H_1H = \frac{1}{1 - cP_1} = \frac{0.02}{1 - 0.02 * 8.33} = 0.024 m$$

$$FH_1 = f - H_1H = 0.048 - 0.024 = 0.024 m$$

(6) عدسة لامة محدبة الوجهين سمكها (3 cm) ومعامل انكسار زجاجها (1.6) وانصاف

اقطار تكور سطحها (r₁=12 cm) ، (r₂=32 cm) ، فضض احد سطحها بحيث اصبح مرآة مفخرة .
جد : (a) . قدرة المرآة السمكة ، (b) . البعد البؤري للمرآة السمكة ، (c) . موقع النقطة الاساسية وموقع البؤرة .



$$a) P_1 = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{1.6 - 1}{12 * 10^{-2}} = 5 D$$

$$P_2 = -\frac{2n'}{r_2} = -\frac{2 * 1.6}{-32 * 10^{-2}} = 10 D$$

$$c = \frac{d}{n'} = \frac{3}{1.6} = 1.8 * 10^{-2} = 0.018 m$$

$$P = (1 - cP_1)(2P_1 + P_2 - cP_1P_2)$$

$$P = (1 - 0.018 * 5)(2 * 5 + 10 - 0.018 * 5 * 10) = 17 D$$

$$b) f = \frac{1}{P} = \frac{1}{17} = 0.06 m$$

$$c) H_1H = \frac{c}{1 - cP_1} = \frac{0.018}{1 - 0.018 * 5} = 0.02 m$$

$$FH_1 = f - H_1H = 0.06 - 0.02 = 0.04 \, m$$

