جامعة حماة

كلية الهندسة المدنية

الفيزياء للمهندسين

للسنة الأولى.

بإشراف : د . نبيل درغام

أ.عادل شبلي

المحاضرة (١)

١ . . . مفاهيم أولية

يمثل علم **الفيزياء** حقيقةً تعقل المحسوسات، ويُقَسَّم بحسب الحواس الخمس إلى السمعيات والبصريات واللمسيات والذوقيات والشميات. إن أحد فروع علم اللمسيات علمٌ يسمى الحرارة.

نشأت أوليات معارف الإنسان عما يسمى مجازاً **بالحرارة** من ذلك الشعور الذي يتناوبه مع مرور الزمن: ليلاً فنهاراً، أو شتاء فربيعاً فصيفاً فخريفاً، ومع ترحاله في المكان: وادياً فسهلاً فجبلاً، أو شمالاً فجنوبا، أو ولوجاً في الأرض أو عروجاً. ولدى اقترابه من الأشياء محيطة به أو مسه لها.

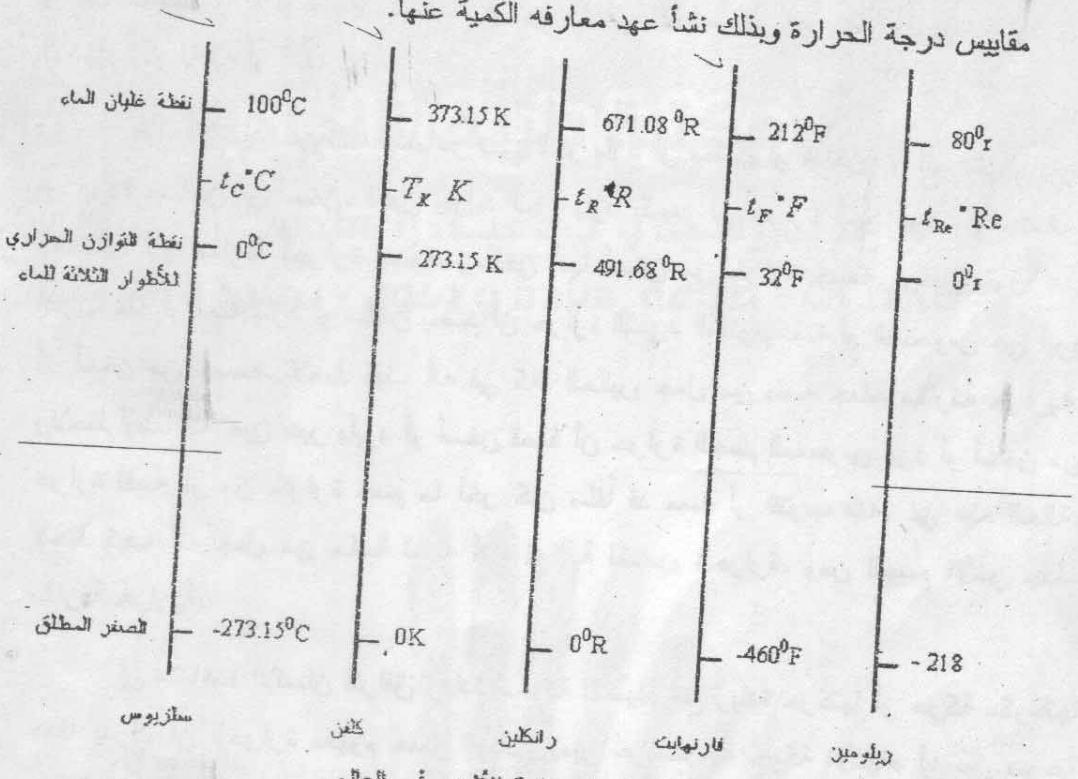
عبَّر الإنسان عن تلك المشاعر بـــ: الجو **بارد أو معتدل أو ساخن**؛ وذلك الشيء بارد أو أبرد؛ وساخن أو أسخن. فحين يقول: الجو بارد يقصد أن حرارة الجو أبرد من جثمانه، ومعتدل، أنها مقاربة لحرارة جسده، وساخن أنها أسخن من حرارة جسمه. وحين يقول عما اقترب منه أو مسه بارد أو ساخن يقصد أن حرارة الشيء المقترَب منه أو الممسوس هي أبرد أو أسخن من جسمه. لاحظ كيف أنه في كلا الحالين جعل من نفسه **جملة مقارنة حرارية**. ولاحظ أيضاً أنه حين عبر بأبرد أو أسخن قصد أن حرارة الجسم الممسوس أبرد أو أسخن من حرارة نفسه أو من حرارة جسم ما آخر كان سلفاً قد مسه أو اقترب منه. في هذه الحالة، لاحظ كيف أنه جعل من حاسة لمسه **أداة نوعية لقياس الحرارة**، ومن الجسم الآخر **جملة مقارنة حرارية**.

إن مشاهدة الإنسان لترافق زيادة سخونة الأشياء مع زيادة حركتها أو حركة مكوناتها جعله يدرك أن الحرارة مفهوم حسي إنساني يعبر عن سرعة حركة الأشياء أو عن سرعة حركة مكوناتها، فكما تَتَالي طَرَق قَدوم على سندان يجعله ساخناً كذلك ذرات المادة الساخنة المهتزة تطرق ملايين المرات في الثانية على جلد الإنسان فتسخنه. وبهذا اتضح له أنه يمتلك منظومة إحساس حتى بالحركة اللطيفة للأشياء المحيطة؛ **أداة حس بالحرارة**.

بصرف الظن عن تعمد الكذب، إن الحكم على قول في قضية حرارية ما أنه صحيحاً يفترض بنا إقراراً بسلامة أداة الحس الحراري لديه، فضلاً عن سلامة عقله، فمثلاً: إن عاهات الجلد وأمراضه تجعل القدرة على نقل الإحساس الحراري غير دقيقة فضلاً عن كونها يمكن

أن تكون جملة مقارنة من شخص لآخر وكذلك إن البيانات الجيدة المتفاوتة تسبب بأزمنة انطباع حراري متفاوتة في مختلف أعضاء الجسم نفسه، ومن إنسان لآخر تتسبب بنقل متفاوت، طبعاً مع افتراض سلامة بقية الأجزاء المتممة لأداة الحس الحراري من مُستحر (نهاية عصبية تتحسس بالحرارة) وعصبون وعصب ومخ ومخيخ وقلب. وحتى أحيانا عند سلامة كافة أدوات حسه الحراري يمكن أن يكون الحكم خاطئاً بسبب نقص في المعارف الأولية العقلية اللازمة للحكم. لكن تجنباً للاختلاف في الحكم الناتج عن الخلل في أي من أجزاء أداة الحس الحراري بين الناس وتداعياته، كانت الحاجة تتزايد من أجل إيجاد أداة حس حراري لا يشك فيها كإنسان كامل مثلاً، أو أداة موثوقة جداً.

لقد بقيت معارف الإنسان عن الحرارة نوعية محصورة بأبرد وأسخن إلى أن صنعت مقاييس درجة الحرارة وبذلك نشأ عهد معارفه الكمية عنها.



الشكل (٠.١): تدريج مقاييس درجات الحرارة الأشهر في العالم.

لقد أوحيَ للإنسان عند ملاحظته لتمدد الأجسام لدى تسخينها فكرة صنع أداة مقارنة حرارية مُبصرة تغنيه عن الحكم اعتماداً على أداة حسه الحراري أو عن الإنسان الكامل، حيث أن مقدار استطالة وانكماش أبعاد جسم ما عند سخونته وبرودته يمثل تعبيراً صريحاً عن كمية الحرارة التي اكتسبها هذا الجسم أو فقدها.

مثال (٠.١): أوجد العلاقة بين تدريج سلزيوس ودرجة الحرارة المطلقة مستنداً على العلاقة:

$$\frac{t_c^\circ C}{100} = \frac{T K - 273.15}{100} \Rightarrow$$

$$T K = t_c^\circ C + 273.15 \cong t_c^\circ C + 273$$

$$t_c^\circ C = T K - 273$$

مثال (٠.٢): أوجد العلاقة بين تدريجي سلزيوس ورانكلين:

$$\frac{t_c^\circ C}{100} = \frac{t_R^\circ R - 491.68}{179.4} \Rightarrow$$

$$t_R^\circ R = \frac{179.4}{100} t_c^\circ C + 491.68 \Rightarrow$$

$$t_R^\circ R = 1.794 t_c^\circ C + 491.68$$

$$t_c^\circ C = .557 t_R^\circ R - 274.06$$

مثال (٠.٣): أوجد العلاقة بين تدريجي سلزيوس وفارنهايت: وهي العلاقة المعتمدة

$$\frac{t_c^\circ C}{100} = \frac{t_F^\circ F - 32}{180}$$

$$t_c^\circ C = \frac{100}{180}(t_F^\circ F - 32)$$

$$t_c^\circ C = \frac{5}{9}(t_F^\circ F - 32)$$

$$t_F^\circ F = \frac{9}{5}(t_C^\circ C + 32)$$

مثال (٠.٤): أوجد العلاقة بين تدريجي سلزيوس وريئومير:

$$\frac{t_c^\circ C}{100} = \frac{t_{\mathrm{Re}}^\circ \mathrm{Re}}{80} \Rightarrow$$

$$t_{\mathrm{Re}}^\circ R = 0.8 t_c^\circ C$$

$$t_c^\circ C = 1.25 t_{\mathrm{Re}}^\circ R$$

مثال (٠.٥): أوجد العلاقة بين تدريجي رانكلين وفارنهايت:

$$\frac{t_R^\circ R - 491.68}{179.4} = \frac{t_F^\circ F - 32}{180} \Rightarrow$$

$$t_R^\circ R = t_F^\circ F + 459.67 \cong t_F^\circ F + 460$$

$$t_F^\circ F = t_R^\circ R - 460$$

الباب الأول

التمدد الحراري

١.١. التمدد الحراري

بصورة عامة، يمكن القول: أنه مهما يكن نوع الجسم (حديد، اسمنت، طوب، زجاج،...)، ومهما تكن بنيته وتركيبته الكيميائية (أحادي، ثنائي،...، أو متعدد الذرات؛ ومتماثل أو متباين الذرات، مشوباً أو صرفاً)، ومهما تكن حالته التجميعية أو الطورية (صلبة، سائلة، غازية، بلازما ،...) فإن قياس أبعاده يزداد مع ارتفاع درجة حرارته وينتاقص مع انخفاضها. وهذا ما يُسمى **بالتمدد الحراري**.

يُصطلح على تعريف **الجسم**: بأنه كمية من المادة مكوناتها ذات طاقة ترابط مختلفة عن طاقة ترابط مكونات الوسط المحيط، مثلاً: زبرة حديد، شظية نحاس، أو كمية من ماء في إناء، أو عمود من هواء في أنبوبة ذات سدادة متحركة كقطرة زئبق.

ويُصطلح على أنه إذا كان أحد أبعاد الجسم أكبر بكثير من البعدين الآخرين لدرجة يهمل عندها التغير في هذين البعدين عند تغير درجة حرارته، فإن هذا الجسم يُسمى **جسماً خطياً**. أما إذا كان أحد أبعاده أصغر بكثير من البعدين الآخرين لدرجة عندها يهمل التغير في هذا البعد عند تغير درجة حرارته، فإنه يسمى **جسماً مسطحاً**. وأما إذا كان التغير في أبعاد الثلاثة غير مهمل عند تغير درجة الحرارة، فإنه يُكتفي بلفظة **جسم**.

وعموماً، يُعلل التمدد الحراري لجسم ما، بزيادة أبعاده نتيجة **زيادة الطاقة الحركية** لمكوناته. **فزيادة الطاقة الحركية للنوى** يزيد من سعات اهتزازها حول مواضع توازنها مما يجعلها تشغل حيزاً أكبر، وهذا بدوره يسبب انزياح سويات الطاقة التي تشغلها الإلكترونات إلى قيم أعلى، وبالتالي إلى زيادة الحجم الذي تشغله الذرة. **وزيادة الطاقة الحركية للإلكترونات** يجعلها تشغل سويات طاقية أعلى، مما يجعل الحيز الذي تشغله الذرة أكثر كبراً. كما أن **زيادة الطاقة الحركية لذرات (أو جزيئات) غاز أو سائل** يزيد من سرعتها الانسحابية، وبالتالي يزداد مقدار الطاقة الحركية المتبادل أثناء التصادمات فيما بينها مما يجعل هذه الذرات (أو الجزيئات) تتباعد عن بعضها البعض أكثر فأكثر؛ وبالتالي تشغل حيزاً أكثر كبراً.

١.٢. قوانين التمدد الحراري

لنفرض أن جسماً يحقق الاعتبارات التالية: أنه **لا يغير حالة التجميعية**؛ أي يبقى في نفس حالته الطورية، وأن درجة حرارته بعيدة نسبياً عن نقطة أو عن مجال التحول الطوري.

وأنه تجانسي البنية؛ أي أنه مكون من نوع واحد من الذرات أو الجزيئات (غير مشوب، وغير مركب). وأنه **متزن حرارياً**؛ أي أن كافة أجزائه لها نفس درجة الحرارة، وأن كافة أجزائه عند لحظة معينة تبقى عند نفس درجة الحرارة. **وأنه متماثل المناحي حرارياً**؛ أي أن انتقال الحرارة فيه في كافة الاتجاهات يسري بنفس السرعة. **وأنه مثالي النقل للحرارة**؛ أي أن الحرارة تنتقل فيه بسرعة بالغة. **وأنه معزول كتلياً**؛ أي لا تحصل عليه زيادة أو نقص في كتلته. **وأنه منتظم التوزع المادي**؛ أي أن البعد فيه بين كل ذرتين أو جزيئين او بلورتين متماثل (لا يحوي انخلاعات أو تشوهات).

ولنفرض أن عملية **تسخين الجسم منتظمة**؛ أي أن كمية الحرارة التي يكتسبها كل جزء من أجزائه خلال وحدة الزمن متماثلة.

ولنفرض أن **القوى الخارجية المعيقة لتمدده مهملة أمام قوة الناشئة عن تمدده**، كما هو الحال بالنسبة لجسم صلب، أو لسائل في أنبوب شعري مفتوح الطرف، أو لطبقة رقيقة من سائل محصورة بين لوحين زجاجيين، أو كمية من غاز في أنبوب شعري مفتوح الطرف تحصرها قطرة صغيرة من الزئبق، أو كتلة غازية كبيرة كغيمة؛ أي -بصورة عامة- عندما يكون الإجهاد الحراري ثابت تقريباً مع تغير درجة الحرارة (راجع ١.٢.٤).

١.٢.١. قانون تمدد الأجسام الخطية أو الأطوال

لنفرض أن لدينا جسماً يحقق الاعتبارات المذكورة أعلاه، ولنفرض أن قياس أحد أبعاده (وليكن طوله) عند درجة حرارة ابتدائية t_1 هو $L(t_1)$، وقياس طوله عند درجة حرارة نهائية أعلى $t_1 < t_2$ هو $L(t_2)$، الشكل (١.١)، تدل التجربة على أن مقدار الزيادة في طوله $\Delta L = L(t_2) - L(t_1)$ يتناسب:

- طرداً مع طوله الابتدائي $L(t_1)$؛ أي كلما كان طوله الابتدائي $L(t_1)$ أكبر كان مقدار الزيادة في طوله ΔL أكبر،
- وطرداً مع الفرق بين درجتي حرارته $\Delta t = t_2 - t_1$؛ أي كلما كان الفرق في درجتي حرارته النهائية والابتدائية Δt أكبر كان مقدار الزيادة في طوله أكبر.

وفقاً لقانون التزايدات الطردية: إن أي مقدار يتناسب طرداً مع عدة مقادير كل على حدة، فإنه يتناسب طرداً مع جدائها؛ أي:

$$\Delta L \propto L(t_1)\Delta t$$

وبالتالي فإن:

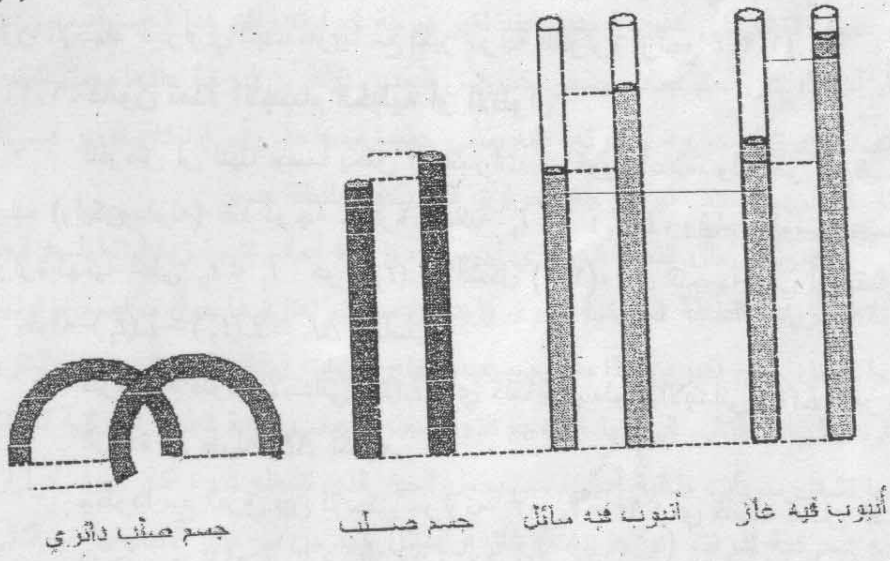
$$\Delta L = \alpha\, L(t_1)\Delta t \qquad (١.١)$$

حيث α هو ثابت التناسب، ويسمى بـ **معامل التمدد الخطي أو الطولي**، وبحسب العلاقة (١.١) يعرَّف على أنه **الزيادة في طول وحدة الأطوال من جسم خطي عندما ترتفع درجة حرارته درجة واحدة**؛ درجة مئوية واحدة بسلمي سليزيوس أو كلفن، واضح أن وحدتيه فيهما: $^{\circ}C^{-1}$ و K^{-1}.

يمكن تعيين قياس الطول النهائي للجسم باستبدال ΔL بـ $L(t_2)-L(t_1)$ في العلاقة (١.١)، فينتج:

$$L(t_2) = L(t_1)\{1 + \alpha\,\Delta t\} \qquad (١.٢)$$

مما يجدر هنا ذكره هو أن المقدار $\alpha\,\Delta t$ أصغر بكثير من الواحد؛ أي من وحدة الأطوال للجسم. تسمي العلاقة (١.١) أو (١.٢) بـ **قانون التمدد الخطي أو الطولي**. إن هذا القانون صحيح: **من أجل أي جسم خطي، ومن أجل أي مسافة بين نقطتين من جسم سطحي أو حجمي بغض النظر عن طريق الواصل بينهما مستقيماً كان أم منحنياً، وأياً يكن شكل الانحناء**. وذلك لأن إحداث تشويه على أي جسم خطي أو جعله بأي شكل هندسي لن يغير بمقدار يذكر من طوله الابتدائي ولا من نوعه ولا من بنيته الكيميائية ولا من حالته التجميعية.



الشكل (١.١): التمدد في الأجسام الصلبة أصغر من التمدد في السوائل، وفي السوائل أصغر من الغازات من أجل نفس الطول الابتدائي ومن أجل نفس الفرق في درجة الحرارة. مقدار التمدد لا يتوقف على شكل الجسم مادام الطول الابتدائي نفسه والفرق في درجة الحرارة هو نفسه.

١.٢.٢. قانون تمدد الأجسام السطحية أو السطوح

لنفرض أن لدينا جسماً يحقق الاعتبارات في الفقرة (١.٢)، ولنفرض أن قياس مساحة سطحه أو جزء من سطحه عند درجة حرارة ابتدائية t_1 هو $A(t_1)$، وقياس مساحة سطحه

أو جزء من سطحه عند درجة حرارة نهائية هي $t_1 < t_2$ هو $A(t_2)$ عندئذٍ يكون مقدار الزيادة في المساحة $\Delta A = A(t_2) - A(t_1)$ متناسباً:

- طرداً مع المساحه الابتدائية $A(t_1)$؛ أي كلما كانت مساحته الابتدائية أكبر كانت الزيادة في مساحته أكبر،
- وطرداً مع الزيادة في درجة حرارته Δt؛ أي كلما كانت الزيادة في درجة حرارته أكبر كانت الزيادة في مساحته أكبر،

وبناء على ما سبق يكون:

$$\Delta A \propto A(t_1) \cdot \Delta t$$

وبالتالي فإن:

$$\Delta A = \beta A(t_1) \Delta t \qquad (١.٣)$$

حيث β هو ثابت التناسب، ويسمى **معامل التمدد السطحي**، وهو **الزيادة في مساحة وحدة المساحة من جسم سطحي عندما ترتفع درجة حرارتها درجة واحدة**؛ درجة مئوية واحدة بسلمي سليزيوس أو كلفن، واضح أن وحدتيه فيهما هما نفس وحدتي معامل التمدد الطولي: $^{\circ}C^{-1}$ و K^{-1}.

يمكن تعيين قياس المساحة النهائية للسطح باستبدال ΔA بـ $A(t_2) - A(t_1)$ في العلاقة (١.٣)، فينتج:

$$A(t_2) = A(t_1)\{1 + \beta \Delta t\} \qquad (١.٤)$$

ما يجدر بالذكر هنا أيضاً هو أن المقدار $\beta \Delta t$ أصغر بكثير من الواحد؛ أي من وحدة المساحة للجسم. تسمي العلاقة (١.٣) أو (١.٤) بـ **قانون التمدد السطحي**. إن هذا القانون صحيح: **من أجل أي جسم سطحي ومن أجل أي مساحة جزئية أو كلية من جسم حجمي أياً يكن شكل السطح: مستوياً، محدباً، مقعراً،...، أو عشوائياً**. وذلك لأن إحداث تشويه على أي جسم سطحي أو جسم لن يغير بشكل يذكر لا من قياس مساحته ولا من نوعه ولا من بنيته الكيميائية ولا من حالته التجميعية.

١.٢.٣. قانون تمدد الأجسام أو الحجوم

لنفرض أن لدينا جسماً يحقق الاعتبارات في الفقرة (١.٢.)، ولنفرض أن قياس حجمه أو جزء من حجمه عند درجة حرارة ابتدائية t_1 هو $V(t_1)$، وأن قياس حجمه أو جزء من حجمه عند درجة حرارة نهائية أعلى $t_1 < t_2$ هو $V(t_2)$، عندئذ يكون مقدار الزيادة في حجمه $\Delta V = V(t_2) - V(t_1)$ متناسباً:

- طرداً مع الحجم الابتدائي $V(t_1)$؛ أي كلما كان حجمه الابتدائي أكبر كانت الزيادة في حجمه ΔV أكبر،
- وطرداً مع الزيادة في درجة حرارته Δt؛ أي كلما كانت الزيادة في درجة حرارته أكبر كانت الزيادة في حجمه أكبر،

وبناء على ما سبق يكون:

$$\Delta V \propto V(t_1) \cdot \Delta t$$

وبالتالي فإن:

$$\Delta V = \gamma V(t_1)\Delta t \qquad (١.٥)$$

حيث γ هو ثابت التناسب، ويسمى **معامل التمدد الحجمي**، وهو **الزيادة في حجم وحدة الحجوم من الجسم عندما ترتفع درجة حرارته درجة واحدة**؛ درجة مئوية واحدة بسلمي سليزيوس أو كلفن، واضح أن وحدتيه فيهما هما نفس وحدتي معامل التمدد الطولي: $^{\circ}C^{-1}$ و K^{-1}.

يمكن تعيين قياس الحجم النهائي للجسم باستبدال ΔV بـ $V(t_2)-V(t_1)$ في العلاقة (١.٥)، فينتج:

$$V(t_2) = V(t_1)\{1+\gamma\Delta t\} \qquad (١.٦)$$

أيضاً ما يجدر هنا ذكره هو أن المقدار $\gamma\Delta t$ أصغر بكثير من الواحد؛ أي من وحدة الحجوم للجسم. تسمى العلاقة (١.٥) أو (١.٦) بـ **قانون التمدد الحجمي**. إن هذا القانون صحيح: **من أجل أي جسم أو أي جزء منه سواء أكان كروياً، أو مخروطاً، أو مكعباً،...، أو عشوائياً**. وذلك لأن إحداث تغيير على الشكل الهندسي لجسم لن يغير بشكل يذكر لا من نوعه ولا من بنيته الكيميائية ولا من حالته التجميعية.

ملاحظات: في قوانين التمدد يُفترض ضمناً أن الإجهاد (التضاغط) الحراري ثابت أثناء عملية التمدد لأنه يمكن بدرجة كبيرة من الدقة اعتبار أن القوى المعيقة للتمدد مهملة. بمعنى أن الإجهاد على الجسم يبقى ثابتاً، وهذا يكافئ قولنا أن التمدد قد حصل عند ثبوت تضاغطه.

تتوقف معاملات التمدد الحراري لجسم ما على نوعه، وبنيته وتركيبه الكيميائي، وحالته التجميعية. بكلام آخر، تتوقف على طاقات الربط فيما بين مكوناته نوعاً وعدداً وشدةً. إن **أنواع الروابط** مرتبة بحسب شدتها هي: الروابط البين بلورية (بلورة مع بلورة)، الروابط البلوروجزيئية (بلورة مع جزيئة)، الروابط البلوروذرية (بلورة مع ذرة)، الروابط البين جزيئية (جزيئة مع جزيئة)، الروابط الجزيئوذرية (جزيئة مع ذرة)، الروابط الجزيئوإلكترونية (جزيئة مع إلكترون)، الروابط البين ذرية (ذرة مع ذرة)، الروابط الذروإلكترونية (ذرة مع إلكترون)،

الروابط النووالكترونية (نواة مع إلكترون)، الروابط البين نووية (نواة مع نواة)، الروابط البين نكليونية (نيكليون مع نيكليون) أو النووية،...، الخ. مع ملاحظة:

- أنه كلما كانت طاقة الربط أصغر كلما كان تأثيرها على معامل التمدد أضعف، وبالتالي يمكن إهمال هذا التأثير.
- وأن انحراف التابعيات التجريبية: $V = V(t),\ A = A(t),\ L = L(t)$ الموصوفة بالعلاقات من (١.١) وحتى (١.٦) عن الخطية يدل على تحطم أو تشكل لأحد الروابط، وأن التغير البطيء لتلك التابعية يدل على حدوث تحطم أو تشكل رابطة بصورة غير شاملة، وأن تغيرها المفاجئ يدل على تحطم أو تشكل لرابطة في كامل الجسم.
- وأن معامل التمدد لجسم ما في حالته الصلبة أصغر منه في حالته السائلة، وفي السائلة له أصغر منه في حالته الغازية. وأن معاملات التمدد للغازات هي على العموم أكبر منها لعموم السوائل، وللسوائل أكبر منها لعموم الأجسام الصلبة؛ أي أنه كلما كان عدد الروابط أقل كان معامل التمدد أكبر.
- وأنه كلما ارتفعت درجة حرارة جسم أصبحت طاقة الربط بين مكوناته أضعف، وبالتالي أصبح مقدار التمدد أكبر.
- وأنه يمكن تصور أن للجسم الصلب ضغطاً داخلياً يزداد مع زيادة درجة الحرارة، في التمددات المتوازنة مع الوسط الخارجي يكون هذا الضغط مساوياً للضغط الجوي.

استنتاجات:

- بما أن الحدود $\gamma\,\Delta t,\ \beta\,\Delta t, \alpha\,\Delta t$ في العلاقات (١.٢) و(١.٤) و(١.٦) على الترتيب هي مقادير أصغر بكثير من الواحد، فإنه بسهولة يُمكن البرهان أنه مهما يكن الشكل الهندسي للجسم فإن:

$$\beta \cong 2\alpha \qquad (١.٧)$$

$$\gamma \cong 3\alpha \qquad (١.٨)$$

ملاحظة:

- في الكثير من المراجع يصطلح على أن الطول والسطح والحجم الابتدائي يجب أن يكون عند درجة حرارة الصفر؛ أي:

$$V(t_1) = V(0),\ A(t_1) = A(0),\ L(t_1) = L(0)$$

وبناء عليه تصبح القوانين (١.٢) و(١.٤) و(١.٦) على الترتيب كما يلي:

$$L(t) = L(0)\{1 + \alpha t\}$$

$$A(t) = A(0)\{1 + \beta t\}$$

$$V(t) = V(0)\{1 + \gamma t\}$$

- يرمز عادة لمعامل التمدد الحجمي بـ β، ولمعامل التمدد السطحي بـ γ.

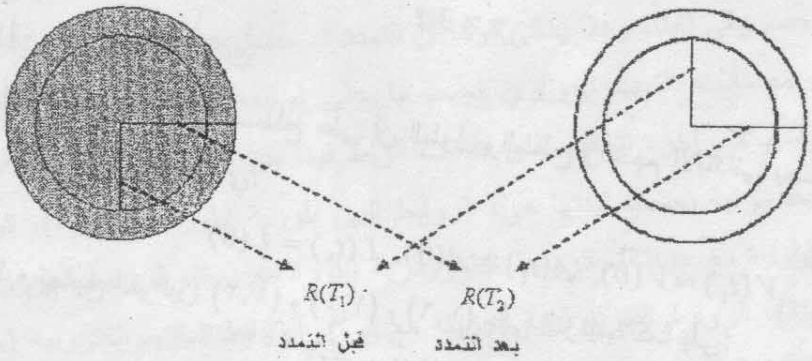
يبين الجدول (١.١) معامل التمدد الخطي الوسطي ومعامل التمدد الخطي الحجمي الوسطي لبعض المواد بالقرب من درجة حرارة الغرفة.

معامل α التمدد الخطي الوسطي ($^\circ C^{-1}$)	المادة	معامل γ التمدد الحجمي الوسطي ($^\circ C^{-1}$)	المادة
24×10^{-6}	Aluminum الألمنيوم	1.12×10^{-4}	Alcohol, ethyl كحول إيثيلي
19×10^{-6}	Brass and bronze صفر وبرونز	1.24×10^{-4}	Benzene بنزين
17×10^{-6}	Copper نحاس	1.5×10^{-4}	Acetone أسيتون
9×10^{-6}	Glass (ordinary) زجاج (عادي)	4.85×10^{-4}	Glycerin غليسرين
3.2×10^{-6}	Glass (Pyrex) زجاج (بورکس)	1.82×10^{-4}	Mercury زئبق
29×10^{-6}	Lead رصاص	9.0×10^{-4}	Turpentine تربنتين
11×10^{-6}	Steel فولاذ	9.6×10^{-4}	Gasoline غازولين
0.9×10^{-6}	Invar (Ni–Fe alloy) إنفار	3.67×10^{-3}	Air at 0°C هواء
12×10^{-6}	Concrete اسمنت	3.665×10^{-3}	Helium هليوم

الجدول (١.١): معامل التمدد الخطي الوسطي ومعامل التمدد الحجمي الوسطي لبعض المواد بالقرب من درجة حرارة الغرفة.

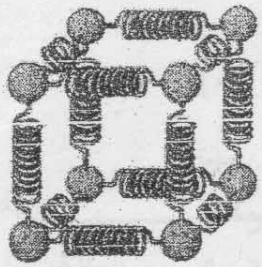
مثال (١.١): برهن أن مقدار الزيادة في محيط قرص دائري يساوي إلى الزيادة في محيط سلك دائري من نفس مادة القرص له نفس نصف القطر عند رفع درجتي حرارتهما بنفس المقدار، الشكل (١.٢).

الحل: فيزيائياً، بما أن للقرص والسلك الدائريين نفس نصف القطر، وبالتالي لهما نفس قياس المحيط، فإن عدد الذرات الموجودة في محيط القرص الدائري سيساوي لعدد ذرات الموجودة في محيط السلك الدائري، ولما كانا من نفس المادة فإن الزيادة في حجم الذرة الواحدة منهما سيكون متماثل، وبالتالي فإن محيطيهما بعد التمدد سيكونان متماثلين.



الشكل (١.٢): قرص وسلك دائريين من نفس المادة لهما نفس نصف القطر، عند رفع درجتي حرارتهما بنفس المقدار، يكون مقدار التمدد في محيطيهما متماثلاً.

الشكل (١.٣): إن يمثل النظر للتمدد والتقلص الحراري ميكانيكي على أنه قابلية الأجسام للاستطالة والتضاغط.



الشكل (١.٣): مشابهة الروابط المرنة بين الجزيئات بنوابض.

إن القوة الناشئة عن التمدد الحراري للأجسام يمكن أن تكون ذات عواقب كارثية إذا لم تؤخذ في الحسبان في المنشآت البيتونية والمعدنية والتمديدات الصحية وأقنية الري، من خلال ترك فراغات تحسب باستخدام قوانين التمدد أو عمل تقوسات تمتص قوة التمدد.

الإجهاد الحراري:

يقابل مفهوم الإجهاد الحراري في الأجسام الصلبة مفهوم الضغط في الغازات. وهذا المقدار يعود لوجود أجسام تحيط بالجسم الصلب تمنع تمدده الحراري. في هذه العجالة سنوضح مفهوم الإجهاد الحراري في أبسط حالاته، وهي حالة تسخين عمود (قضيب) معدني ثُبت طرفيه العلوي والسفلي بإحكام من السقف والأرضية.

لنفرض أن هذا العمود سُخن من درجة t_1 إلى درجة t_2، عندئذ فإنه نتيجة لتمدده الحراري يضغط على السقف بقوة F'، وكذلك السقف – نتيجة لرد فعله- يضغط بقوة F بالاتجاه المعاكس؛ أي عمودياً على سطح مقطع العمود A. إن هاتين قوتين متساويتين ومتعاكستين $F = -F'$. تدل التجربة أن هذه القوة F تتناسب:

- طرداً مع الزيادة في الطول التي كان من الممكن أن يتمددها العمود فيما لو كان حرّ الطرفين ΔL،
- عكساً مع الطول الابتدائي L للعمود، وذلك لكون العمود ذا مرونة معينة فكلما كان العمود أطول زادت إمكانية التوائه وقلت القوة التي يضغط بها على السقف والأرضية، وبالتالي قل رد الفعل،
- طرداً مع مساحة سطح المقطع A، فكلما كان سطح المقطع أكبر كانت القوة الناشئة أكبر. وبناء على ما سبق يمكن أن نكتب:

$$F \propto A\frac{\Delta L}{L}$$

وبالتالي فإن:

$$F = \gamma A\frac{\Delta L}{L} \qquad (١.٩)$$

حيث y هو ثابت التناسب ويسمى معامل المرونة، وهو يختلف من مادة لأخرى، ويتعلق بشكل ضعيف بدرجة الحرارة.

يمكن أن نكتب العلاقة (١.٩) أحيانا بالشكل:

$$\frac{F}{A} = y\frac{\Delta L}{L} \qquad (١.١٠)$$

تسمى النسبة F/A **بالإجهاد الحراري** (الانضغاط) وهو يمثل القوة الداخلية المؤثرة على مقطع الجسم من جراء التمدد. عندما تكون القوة -كما في المثال المدروس- ناظمية، فإن المركبة المماسية للإجهاد تكون معدومة. وتسمى النسبة $\Delta L/L$ **بالانفعال الحراري** وهو يمثل الزيادة النسبية الممكنة في الطول. وبحسب قانون التمدد الخطي (١.١) فإن:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta t \qquad (١.١١)$$

بتعويض (١.١١) في (١.١٠) نجد:

$$\frac{F}{A} = y\alpha \Delta t \qquad (١.١٢)$$

وهي العلاقة التي تعطي الإجهاد الحراري على اعتبار أن التمدد الحراري الحاصل على مقطع العمود مهمل، لكن من المفضل أثناء الحسابات أن يُؤخذ ذلك بعين الاعتبار من أجل الدقة فقط.

بناء على العلاقة (١.١٢) يمكن أن نعرف **معامل المرونة بأنه القوة المؤثرة ناظمياً على وحدة السطوح لجسم طوله وحدة الأطوال عندما ترتفع درجة حرارته درجة واحدة.**

١.٣. تطبيقات على قوانين التمدد الحراري

نقبل بداهةً أن تغير أبعاد الجسم بفعل تغير درجة حرارته يسبب تغير كافة المقادير الفيزيائية والكيميائية والهندسية المتعلقة بأبعاده، فمثلاً:

١.٣.١. الكتلة الحجمية أو الكثافة المطلقة

أي كتلة وحدة الحجوم؛ $\rho = m/V$، حيث m هي كتلة الجسم، و V هو حجمه.

لنفرض أن جسماً كتلته m كان حجمه $V(t_1)$ عند درجة حرارة t_1، وبالتالي فإن كثافته ستكون:

$$\rho(t_1) = \frac{m}{V(t_1)}$$

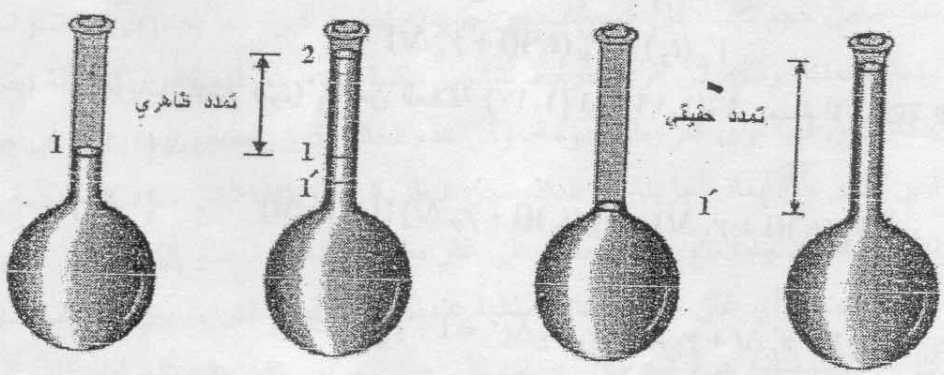
وعند درجة حرارة أعلى له $t_2 > t_1$ يكون حجمه هو $V(t_2)$، وبالتالي تكون كثافته:

$$\rho(t_2) = \frac{m}{V(t_2)}$$

بالاستفادة من العلاقة (١.٦) يمكننا أن نكتب:

١.٤.٢ التمدد الظاهري للسوائل

عندما ترتفع درجة حرارة سائل موجود في وعاء من درجة t_1 إلى درجة t_2، فإن الحافة العليا للسائل (سطحه) ترتفع من سوية ما 1 إلى سوية 2 نتيجة لتمدد السائل، يُسمي هذا التمدد **بالتمدد الظاهري**، لأنه هكذا يظهر للعيان، انظر الشكل (١.٥). وتعود تسمية هذا التمدد بالظاهري دلالة على أنه ليس حقيقياً. وذلك للاعتبار الضمني أن الوعاء لم يتمدد وأن حجمه بقي ثابتاً؛ أي وكأنه لم ترتفع درجة حرارته. لكن بالحقيقة ترتفع درجة حرارة الوعاء من t_1 إلى t_2 مما يجعل حجمه يكبر، فينخفض منسوب السائل من1 إلى 1´ ، وبارتفاع درجة حرارة السائل إلى t_2، فإن السائل يتمدد من 1 إلى 2، يسمي التمدد من 1 إلى 2 بـ **التمدد الحقيقي للسائل**. إذن التمدد الحقيقي للسائل في وعاء هو دوماً أكبر من التمدد الظاهري.



الشكل (١.٥): التمدد الحقيقي والظاهري للسوائل.

(a) - من أجل **التمدد الظاهري** للسائل؛ أي من 1 ← 2:

علم الميكانيك

مقدمة:

يُعرَّف علم الميكانيك بأنه العلم الذي يدرس حركة وسلوك الأجسام وكل ما يتعلق بهما من قوى وطاقة و عزوم وسرعة وتسارع وزمن ومسافات....إلخ. قبل البدء بدراسة علم الميكانيك وأقسامه يجب ادراك مفاهيم الأشعة والعمليات الحسابية التي تجرى عليها بشكل جيد لنتمكن من تحليل المسائل المتعلقة بهذا العلم.

الأشعة:

تمتلك بعض المقادير الفيزيائية في الوقت نفسه اتجاهات وقيماً عددية، وهنا في هذه الحالة تكون الاتجاهات مهمة جداً كأهمية القيم العددية، ومثال على ذلك: إن اتجاه القوة المؤثرة في جسم سوف يحدد لنا بشكل دقيق إلى أين سيتحرك هذا الجسم.

وتقسم المقادير الفيزيائية إلى مجموعتين رئيسيتين:

الأولى: الكميات السلّمية: وهي عبارة عن أشياء تعبر عن كم المقدار الفيزيائي ومن الأمثلة عليها: الكتلة، الزمن، درجة الحرارة والطاقة...إلخ.

الثانية: المتجهية: وهي عبارة عن الكميات التي تعبر بآن واحد عن كم المقدار واتجاهه الفيزيائي. والأمثلة على هذه الكميات المتجهية كثيرة منها: السرعة، التسارع، القوة، العزم، شدة الحقل الكهربائي...إلخ.

تساوي كميتين شعاعيتين:

نقول عن كميتين شعاعيتين $\vec{A}\ \&\ \vec{B}$ إنهما متساويتان إذا تحقق الشرطان:

1 ــ أن يكون لكلا الشعاعين المقدار العددي نفسه (السلمي) أي $|\vec{A}| = |\vec{B}|$

2 ــ أن يكون لكلا الشعاعين الجهة نفسها أي اتجاه $\vec{A}$ = اتجاه $\vec{B}$

جمع الأشعة:

عند جمع شعاعين $\vec{A}$ و $\vec{B}$ فإن الكمية الناتجة عن هذا الجمع هي عبارة عن

شعاع $\vec{C}$، ويُعرَّف هنا الشعاع بأنه محصلة الشعاعين السابقين ويكتب بـ

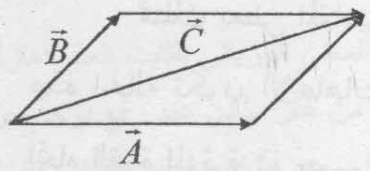
$$\vec{C} = \vec{B} + \vec{A}$$

يوجد طريقتان مختلفتان لجمع شعاعين:

الأولى: طريقة متوازي الأضلاع:

هذه الطريقة يمكن شرحها كالتالي:

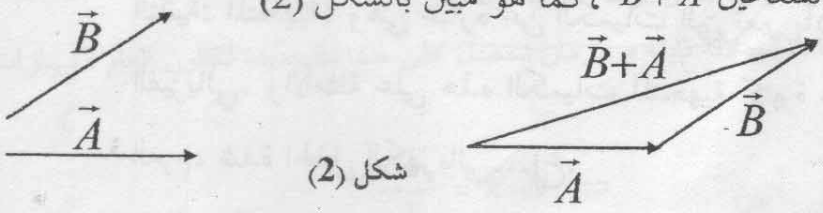
إذا كان لدينا شعاعان $\vec{B}\,\&\,\vec{A}$، فإن جمع هذين الشعاعين هو الشعاع $\vec{C}$ ،وهذا الشعاع هو عبارة عن قطر متوازي الأضلاع الناشئ من رسم هذين الشعاعين $(\vec{B}\,\&\,\vec{A})$ كما هو موضح بالشكل (1)



شكل (1)

الثانية: طريقة مثلث الأشعة:

تقضي هذه الطريقة بأن نرسم من نهاية الشعاع الأول $\vec{A}$ شعاعاً يوازي الشعاع الثاني $\vec{B}$ ويكون الشعاع المحصل ابتداءً من بداية الشعاع الأول وإلى نهاية الشعاع الثاني هي عبارة عن مجموع الشعاعين $\vec{B}+\vec{A}$ ،كما هو مبين بالشكل (2)



شكل (2)

طرح الأشعة:

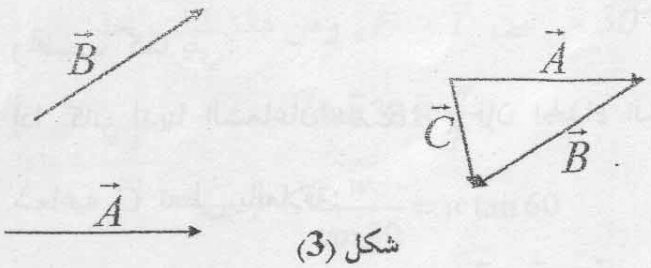
إن عملية طرح الأشعة تتحول إلى جمع أشعة وذلك كالتالي:

إذا كان لدينا شعاعان $\vec{B}\,\&\,\vec{A}$ ، فإن فرقهما هو $\vec{C}$ يحدد كالتالي:

$$\vec{C} = \vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B})$$

أي لإيجاد فرق الشعاعين $\vec{C}$ نرسم الشعاعين الأول $\vec{A}$ ومن نهايته نرسم معاكس الشعاع الثاني أي $-\vec{B}$ ، إن الشعاع الناتج من بداية الشعاع الأول وإلى نهاية معكوس

الشعاع الثاني يمثل الشعاع $\vec{C}$ (الفرق). شكل (3)



شكل (3)

القيمة المطلقة لشعاع:

تعرف القيمة المطلقة لشعاع بأنها الطول الجبري أو القيمة العددية للشعاع، ويمكن حسابها بالشكل التالي:

إذا كان لدينا شعاع $\vec{A}$ الممثل بمركبتيه على المحورين x & y بالشكل التالي

$$\vec{A} = A_x.\vec{i} + A_y.\vec{j}$$

فتكون القيمة المطلقة مساوية إلى

$$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

أي أن القيمة المطلقة لأي شعاع تساوي جذر مجموع مربع مركبتيه.

جداء شعاعين:

يوجد نوعان (طريقتان) لجداء الأشعة وتختلفان بالطريقة وبالنتيجة:

الأولى : تعبر عن الجداء السلمي للأشعة، ويمكن حسابها بطريقتين وذلك كالتالي:

إذا كان لدينا شعاعان $\vec{A}$ & $\vec{B}$ ، فإن جدائهما هو كمية سلمية C يحدد كالتالي:

$$C = \vec{A}.\vec{B} = |\vec{A}||\vec{B}|.\cos\theta$$

حيث تمثل θ الزاوية الكائنة بين الشعاعين $\vec{A}$ & $\vec{B}$. أو يمكن حسابها بطريقة مختلفة اعتماداً على مركبتي كلا الشعاعين $\vec{A}$ & $\vec{B}$. إذا كان لدينا الشعاعان

$$\vec{A} = A_x\vec{i} + A_y.\vec{j}$$

$$\vec{B} = B_x.\vec{i} + B_y.\vec{j}$$

يمكن حساب الجداء السلمي لهذين الشعاعين ونكتب

$$\vec{C} = \vec{A}.\vec{B} = \vec{A}_x.\vec{B}_x + \vec{A}_y.\vec{B}_y$$

الثانية: تسمى الطريقة الثانية جداء الأشعة بالجداء الشعاعي أو الجداء الخارجي وتحسب كما يلي:

إذا كان لدينا الشعاعان $\vec{A}\ \&\ \vec{B}$، فإن الجداء الشعاعي لهما هو عبارة عن كمية شعاعيه $\vec{C}$ تعطى بالعلاقة:

$$\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$$

بحيث يكون $\vec{C}$ عمودياً على المستوي الذي يحوي كلاً من الشعاعين $\vec{B}\ \&\ \vec{A}$

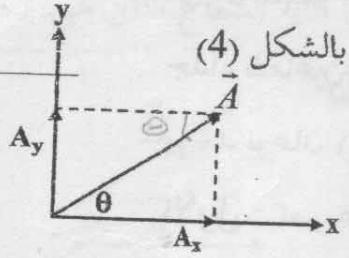
،وتعطى القيمة الجبرية لهذا الشعاع بالعلاقة

$$\left|\vec{C}\right| = \left|\vec{A} \times \vec{B}\right| = \left|\vec{A}\right|\left|\vec{B}\right|.\sin\theta$$

حيث تمثل θ الزاوية الكائنة بين الشعاعين $\vec{B}\ \&\ \vec{A}$.

تحليل الأشعة:

يمكن تحليل أي شعاع مثل $\vec{A}$ إلى مركبتين متعامدتين على محورين متعامدين x و y وذلك بإسقاط هذا الشعاع على كلا المحورين كما هو مبين بالشكل (4)



شكل (4)

وتكون كلتا المركبتين معطاة بالشكل

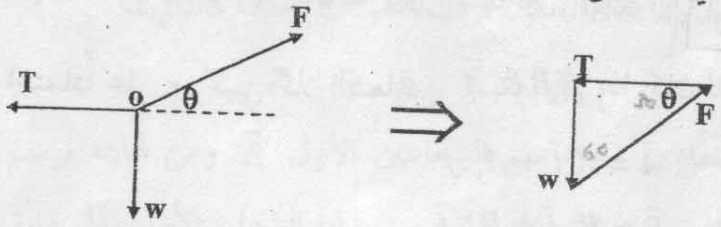
$$A_x = \left|\vec{A}\right|.\cos\theta$$

$$A_y = \left|\vec{A}\right|.\sin\theta$$

مثال (1)

تخضع النقطة o في الشكل (5) إلى ثلاث قوى وهي ساكنة. أوجد شدة القوة T في هذا الشكل.

الحل:



شكل (5)

$$\tan 30 = \frac{w}{T}$$

$$\tan 60 = \frac{T}{w}$$

$$\Rightarrow \tan 30 = \frac{1}{\tan 60}$$

باستخدام مثلث القوى بحيث من نهاية T نرسم W ومن ثم تكون $\vec{F}$ هي من نهاية W وإلى بداية T، والزاوية 30 هي بين $\vec{T}$ و $\vec{F}$، ومن هذا المثلث نجد:

$$\tan 30 = \frac{w}{T}$$

$$\Rightarrow T = \frac{w}{\tan 30} = w \tan 60$$

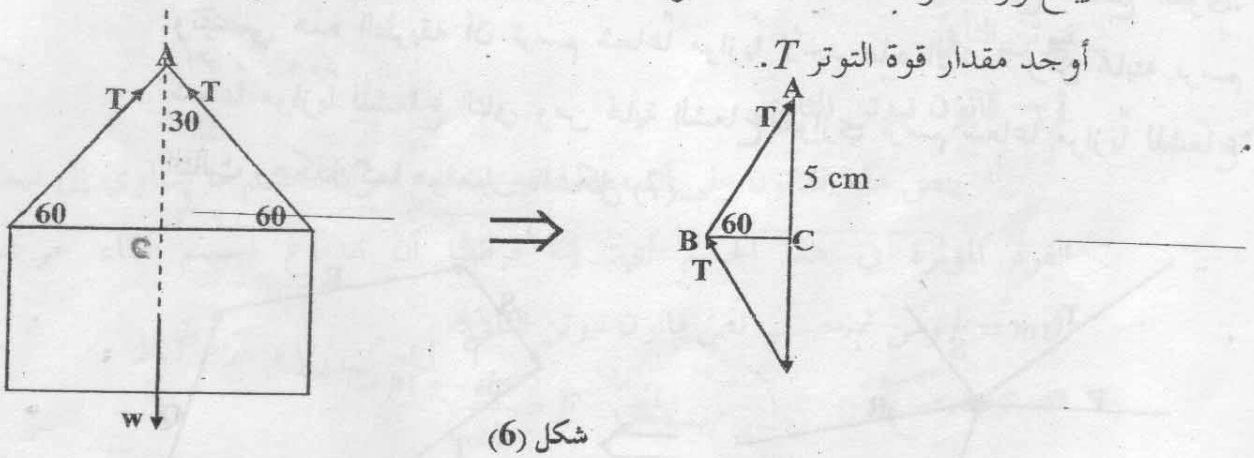
ويمكن حلها أيضاً بطريقة تحليل القوة F إلى مركبتين متعامدتين على X و Y وتكون

$$\left.\begin{aligned} Fx = T \Rightarrow F\cos 30 = T \\ Fy = w \Rightarrow F\sin 30 = w \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{T}{w} = \frac{F\cos 30}{F\sin 30} = \cot 30$$

$$\Rightarrow \frac{w}{T} = \tan 30 \Rightarrow T = \frac{w}{\tan 30} = w \tan 60$$

مثال (2):

يبلغ وزن اللوحة $W = 10N$ وقد علقت بخيطين كما في الشكل (6) إلى النقطة A أوجد مقدار قوة التوتر T.



شكل (6)

$$\sin 60 = \frac{Ac}{T} = \frac{5}{T} \Rightarrow T = \frac{5}{\sin 60} = \frac{5\times 2}{\sqrt{3}} = 5.77N$$

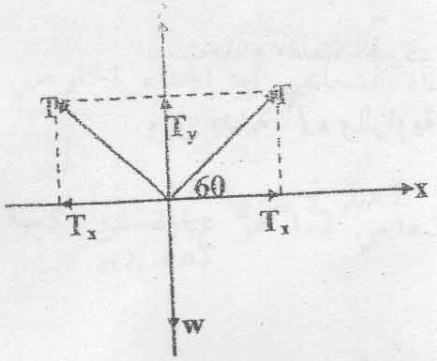
أو بطريقة الإسقاط (تحليل القوى):

يمكن تحليل T إلى مركبتين على x و y

على المحور x: القوى معدومة لأن $T_X = T_X$ ولكن لهما اتجاهان متعاكسان ومن

ثم محصلتهما معدومة (شكل (6))

على المحور y :



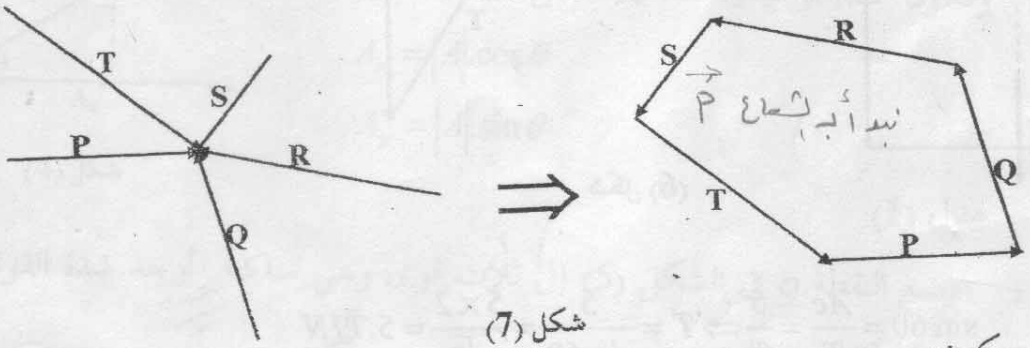
شكل (6)

$$T\cos 30 + T\cos 30 = w$$

$$2T\cos 30 = w \Rightarrow T = \frac{w}{2\cos 30} = \frac{10}{2\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.77N$$

مضلع القوى:

عندما تخضع نقطة إلى قوى عددها أكثر من اثنتين وهذه القوى جميعها تقع في مستوي واحد ~~ومحصلتها معدومة~~، فلإيجاد محصلة هذه القوى نتبع مضلع القوى: وتقتضي هذه الطريقة أن نرسم شعاعاً موازياً لأحد هذه الأشعة ومن نهايته نرسم شعاعاً موازياً للشعاع الثاني ومن نهاية الشعاع الموازي نرسم شعاعاً موازياً للشعاع الثالث وهكذا كما هو مبين ~~بالشكل (7)~~.



شكل (7)

ويكون:

$$\vec{P}+\vec{Q}+\vec{R}+\vec{S}+\vec{T}=0$$

إذا كانت محصلة هذه القوى ليست معدومة فإن قيمتها سوف تكون من نهاية الشعاع الأخير إلى بداية الشعاع الأول أي أن: $\vec{N} = \vec{P} + \vec{Q} + \vec{R} + \vec{S} + \vec{T}$

علم الميكانيك

عند دراسة علم الميكانيك سوف نقوم بتقسيم هذه الدراسة إلى ثلاثة محاور أساسية وهي:

1) علم التحريك.
2) علم الحركة.
3) علم التوازن السكوني (علم السكون).

1) علم التحريك:

يعرف علم التحريك بأنه العلم الذي يدرس مسببات الحركة والسكون (القوى)، ويركز هذا العلم على قوانين نيوتن الثلاثة ،وسنشرح هذه القوانين الثلاثة مبتدئين بالقانون الثاني لنيوتن وذلك لأن القانون الأول هو حالة خاصة من قانون نيوتن الثاني

1)- قانون نيوتن الثاني:

ينص هذا القانون على أن معدل تغير اندفاع حركة جسم ما يساوي إلى قيمة القوة المؤثرة في هذا الجسم أي: إذا فرضنا أن اندفاع الجسم أثناء حركته $P = m\vartheta$ ومن ثم حسب نص قانون نيوتن الثاني:

$$\frac{dp}{dt} = F$$

ويمكن إيجاد شكل آخر لقانون نيوتن الثاني وهو:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vartheta)$$

$$F = m\frac{d\vartheta}{dt} = ma$$

حيث F هي محصلة القوى المؤثرة في الجسم ،و m كتلة الجسم، و a تسارع حركة الجسم، واعتماداً على هذه النتيجة يمكن أن نصوغ قانون نيوتن الثاني بشكل آخر:

قانون نيوتن الثاني

إن محصلة القوى المؤثرة في أي جسم يتحرك بحركة متغيرة بانتظام تساوي جداء كتلة هذا الجسم بتسارعه، أي:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

وبإسقاط هذه العلاقة على المحورين x و y نجد

$$F_x = ma_x$$
$$F_y = ma_y$$

في الجملة الدولية، واحدة الكتلة هي الكيلوغرام، وواحدة التسارع كما سوف نرى لاحقاً هي من واحدة السرعة على الزمن أي: m/sec^2 ومن ثم واحدة القوة F هي:

$$[F] = [m].[a]$$
$$= kg.m/sec^2$$

ويمثل هذا المقدار في الجملة الدولية بالنيوتن أي:

$$1N = 1kgmsec^{-2}$$

2)- قانون نيوتن الأول:

وهو كما ذكرنا سابقاً حالة خاصة من قانون نيوتن الثاني و ينص على:

إذا انعدمت محصلة القوى المؤثرة في جسم، فإن هذا الجسم سيتحرك بحركة مستقيمة منتظمة إذا كان بالأصل متحركاً وسيبقى الجسم ساكناً إن كان بالأصل ساكناً. أي، إذا كانت:

$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow$$
$$\sum F = 0 = ma \Rightarrow$$
$$a = 0 \quad \text{لأن} \quad m \neq 0$$

وهذا يعني أن تسارع الجسم معدوم، وهذا ينطبق على حالتين أساسيتين:

إما ثابت $= \vartheta$ أي سرعة الجسم ثابتة، والحركة مستقيمة منتظمة.

أو $\vartheta = 0$ أي سرعة الجسم معدومة، فالجسم ساكن عندئذٍ.

أو يمكن القول بشكل آخر إذا كانت

$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$0 = \Sigma F = \frac{dp}{dt} \Rightarrow \frac{d}{dt}(m\vartheta) = 0 \Rightarrow$$

$$m\vartheta = \text{ثابت} = C$$

بما أن m كتلة الجسم ثابتة فهذا يعني وجود احتمالين:

1)-إن كان الثابت C مساوياً للصفر ،فالجسم ساكن. 2)-إن كان الثابت C لا يساوي الصفر $\Leftarrow \vartheta$ تكون ثابتة ،والحركة مستقيمة منتظمة.

3)- قانون نيوتن الثالث: (الفعل ورد الفعل)

ينصُّ هذا القانون على أنه إذا أثر جسم أول بقوة في جسم ثانٍ، فإن الجسم الثاني سيرد على الجسم الأول بقوة تساوي بالشدة قوة الجسم الأول ولكن تعاكسها بالجهة ويسمى هذا القانون بقانون الفعل ورد الفعل.ومثال على ذلك: أي جسم موضوع على الأرض سوف يؤثر في الأرض بقوة ثقله W، فالأرض سوف ترد على الجسم الموضوع عليها بقوة $\vec{R}$ تساوي بالشدة $\vec{W}$،ولكن تعاكسها بالجهة (إلى الأعلى).

قوى الاحتكاك:

تعرف قوى الاحتكاك: بأنها قوى تؤثر في الجسم المتحرك وعناصرها هي:

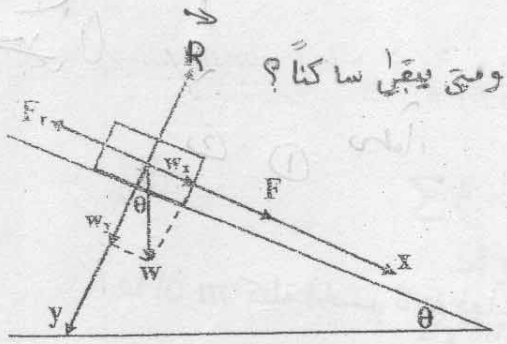
1. جهتها: بعكس جهة حركة الجسم.
2. نقطة تأثيرها: مركز ثقل الجسم.
3. شدتها: تختلف من جسم لآخر.

مثال:

إذا كان لدينا جسم يترلق على مستوي يميل على الأفق بزاوية θ وإذا افترضنا أن الجسم تؤثر فيه قوة مقاومة احتكاك F_r ويؤثر في هذا الجسم قوة جر F فبين:

1) المخطط التمثيلي للقوى المؤثرة في هذا الجسم.

2(متى يتحرك هذا الجسم ومتى يبقى ساكناً ؟



شكل (8)

الحل:

يخضع هذا الجسم كما هو مبين بالشكل (8) إلى أربع قوى:

1. قوة الجر F اتجاهها (باتجاه حركة الجسم).
2. قوة رد الفعل R عن المستوي المائل جهتها عمودية على المستوي.
3. قوة الثقل W عمودية على الأرض.
4. قوة الاحتكاك جهتها بعكس جهة الحركة (أي بعكس جهة F).

1) يمكن تحليل قوة الثقل إلى مركبتين، على المحور x تكون W_x وعلى المحور y تكون W_y

أ- إن قيمة W_y تعاكس بالجهة القوة $\vec{R}$ وتساويها بالشدة ومن ثم محصلتهما معدومة.

ب- على المحور x إن محصلة القوى على المحور x هي:

حسب قانون نيوتن الثاني $\sum F_x = F + W_x - F_r = ma$

يبقى الجسم ساكناً إذا كان

$$a = 0 \text{ أي } \sum F_x = 0$$

$$\Rightarrow \quad F + W_x = F_r$$

$$\Rightarrow \quad F + W.\sin\theta = F_r$$

يبدأ الجسم بالتحرك عندما

$$\boldsymbol{a \neq 0} \text{ أي } \boldsymbol{\sum F \neq 0}$$ باتجاه x أي

$$F + W_x = ma + F_r \Rightarrow F + W.\sin\theta = ma + F_r$$

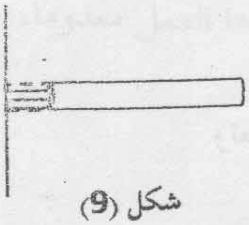
$$\Rightarrow F + W.\sin\theta - F_r = ma > 0$$

أو عندما يكون:

$$F+W.\sin\theta - F_r > 0 \quad \Rightarrow \quad F+W.\sin\theta > F_r$$

الضغط المطبق باستخدام السائل المنفوث:

عندما يضرب سائل منفوث بقوة سطحاً ما كما هو موضح بالشكل (9)، إذا افترضنا أن سرعة هذا السائل هي ϑ ومن قانون نيوتن الثاني:



شكل (9)

$$F = \frac{dp}{dt}$$

$$= \frac{d}{dt}(m\vartheta) = \vartheta\frac{dm}{dt}$$

حيث هنا سرعة السائل ϑ ثابتة وتمثل القيمة (dm/dt) بأنها كتلة السائل التي تضرب الجدار بالثانية أي:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho V) = \rho\frac{d}{dt}(A\cdot x)$$

$$= \rho A\frac{dx}{dt} = \rho A\vartheta$$

حيث V حجم السائل، إذاً يكون:

$$F = \vartheta\frac{dm}{dt} = \vartheta\rho A\vartheta$$

$$= \rho A\vartheta^2$$

حيث F القوة المؤثرة في الجدار، ρ الكتلة الحجمية للسائل، ϑ سرعة السائل، A مساحة الأنبوب الذي يخرج منه السائل ومنه فالضغط p يعرف بالعلاقة:

$$p = \frac{F}{A} = \rho\vartheta^2$$

مثال:

في يوم ماطر سقط كمية من المطر تقدر بـ $40m.m$ خلال ساعة واحدة، إذا افترضنا أن حبات المطر تضرب سطحاً ما عمودياً بسرعة متوسطة $10ms^{-1}$.

أوجد الضغط المطبق على هذا السطح (الكتلة الحجمية للماء $\rho_w = 10^3\ Kgm^{-3}$).

الحل:

لنفترض أن مساحة السطح الذي يسقط عليه المطر هو A. إن كتلة الماء التي تسقط على السطح خلال ساعة هي:

$$m = \rho V = h \cdot A\rho = 40\times10^{-3} A\rho$$

إن معدل سقوط المطر على السطح:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m}{t} = \frac{40\times10^{-3} A\rho}{60\times60}$$

وتعطى القوة التي يؤثر بها المطر بالعلاقة:

$$F = \vartheta\frac{dm}{dt} = \frac{40\times10^{-3}\rho\vartheta}{60\times60}.A$$

ويكون الضغط P مساوياً إلى:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{40\times10^{-3}\rho\vartheta}{60\times60} = \frac{40\times10^{-3}\times10^{-3}\times10}{60\times60}$$
$$= 0.11 pascal$$

العمل والطاقة:

أولاً العمل:

يُعرَّفُ العمل W بأنه تغير طاقة الجسم عند تطبيق قوة F على هذا الجسم فينتقل الجسم مسافة معينة x، ومنه نجد:

$$W = \vec{F}.\vec{x}$$

ومن هذه العلاقة نلاحظ أنه لا يكون هناك أي عمل إلاّ إذا تحقق شرطان:

الأول: يجب أن تكون هناك قوة تؤثر في الجسم F.

الثاني: يجب أن يتغير موضع الجسم (يسير مسافة ما x)

حالة خاصة: إذا كان حامل القوة المطبقة في الجسم ينطبق على حامل الانتقال (المسافة التي يقطعها الجسم) فإن العمل يصبح:

$$W = |\vec{F}||\vec{x}| = F.X$$

إذا كان حامل القوة المطبقة على الجسم لا ينطبق على حامل الانتقال، أي يوجد بينهما زاوية θ، يكون العمل W في هذه الحالة:

$$W = \vec{F}.\vec{x} = |\vec{F}|.|\vec{x}|.\cos\theta = F.x.\cos\theta$$

إذا كان حامل القوة عامودياً على الانتقال أي $\theta = \frac{\pi}{2}$ ويكون عندها العمل معدوماً، أي

$$W = \vec{F}..\vec{x} = F.x.\cos\theta = F.x\cos\frac{\pi}{2} = 0$$

إذا قدمنا لجسم ما عملاً مقداره dW فإن هذا الجسم سوف ينتقل بمقدار ds ،ويكون

$$dw = F.ds \quad \Rightarrow$$

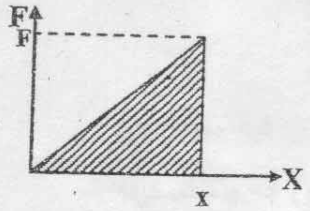
$$w = \int_{s_0}^{s_1} F.ds$$

تطبيق (1):

إن الطاقة (العمل) المقدمة للنابض عند استطالة هذا النابض بمقدار x تعطى العلاقة:

$$w = \int_0^x F.dx$$

ولكن القوة الناشئة في النابض نتيجة استطالته $F = k.x$ حيث k معامل النابض، ومن ثم فإن العمل كما هو مبين بالشكل (10) يساوي مساحة المنطقة المظللة.



شكل (10)

$$w = \int_0^x kx\,dx = k\left[\frac{x^2}{2}\right]_0^x$$

$$= \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}F.x$$

أي أنها تساوي مساحة المثلث القائم المظلل أو نصف مساحة المستطيل كما هو مبين بالشكل.

الباب الرابع

أسس التحريك الحراري

مقدمة

إن موضوع **الترموديناميك أو التحريك الحراري** هو دراسة تحريك الأشياء بفعل الطاقة الحرارية. ويرتكز على دراسة انتقال كمية الحرارة وتحولها إلى عمل في الآلات الحرارية وما يرافق ذلك من تحول العمل إلى كمية الحرارة، وكذلك دراسة نقل كمية الحرارة بوساطة العمل. تعتبر المحركات الحرارية كالمحرك البخاري ومحرك الديزل ومحرك الغازولين من أهم المنظومات التي تتحول فيها الحرارة إلى عمل. كما تعتبر المضخات الحرارية كالبرادات والمكيفات والماصات والمشعات الحرارية من أهم منظومات نقل كمية الحرارة بوساطة العمل.

٤.أ. تحول وانتقال كمية الحرارة

بداية يجدر بنا التنويه إلى أنه - في هذا الفصل - سنرمز لدرجة الحرارة بـ θ بدلاً من الرمز t وذلك تفادياً لالتباس الأخير مع رمز الزمن t . وفيه ندرس الطاقة الحرارية للأجسام المادية، وتحولها من شكل إلى آخر، وأسباب وآليات انتقالها خلال الأوساط المادية، وما يمكن أن يتعلق بذلك. لقد جرت العادة على تسمية الطاقة الحرارية التي يكتسبها جسم عند تسخينه أو يفقدها عند تبريده بكمية الحرارة. فكمية حرارة جسم مقدارٌ يعبر عن مدى سخونة أو برودة هذا الجسم.

٤.١.أ. كمية الحرارة

لنفرض أن لدينا جسماً يحقق الاعتبارات التالية: أنه في حال يكون فيه بعيداً عن نقطتي تحوله الطوري، وأنه أصلاً متزن حرارياً، وأنه معزول كتلياً. ولنفرض أنه يتم تسخينه ككل بصورة منتظمة غاضين النظر عن زمن انتقال الحرارة إلى كافة أجزائه.

تدل التجارب على أنه كلما كانت الزيادة في درجة حرارة ذلك الجسم $\Delta\theta$ أكبر، كلما كان هذا الجسم أسخن، وبالتالي كانت كمية حرارة التي اكتسبها ΔQ أكبر. والضد بالضد. بناء على ذلك يمكن أن نكتب:

$$\Delta Q \propto \Delta\theta$$

حيث $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ هي التغير في درجة حرارة الجسم، و θ_1 درجة حرارته الابتدائية، و θ_2 هي درجة حرارته النهائية.

على ضوء ذلك يكون:

$$\Delta Q = C\,\Delta\theta \qquad (أ.٤.١)$$

حيث C هو ثابت التناسب، ويسمى **بالسعة الحرارية للجسم**، وهي **كمية الحرارة التي يكتسبها جسم عند ارتفاع درجة حرارته درجة واحدة.**

كما تدل التجارب أيضاً، أنه من أجل أجسام عديدة من نفس المادة ذات كتل مختلفة كانت قد سخنت بصورة متماثلة، تكون كميات الحرارة التي تكتسبها هذه الأجسام متناسبة مع كتلها. وأنه كلما كانت كتلة أحد هذه الأجسام m أكبر، كلما كانت كمية الحرارة التي يكتسبها هذا الجسم أكبر؛ أي:

$$\Delta Q \propto m$$

على ضوء ما سبق يمكننا أن نكتب:

$$\Delta Q \propto m\Delta\theta$$

$$\Delta Q = c\,m\,\Delta\theta \qquad (أ.٤.٢)$$

حيث c ثابت التناسب، ويسمى **بالحرارة النوعية**، وهي **كمية الحرارة التي تكتسبها وحدة الكتل من مادة معينة عندما ترتفع درجة حرارتها درجة واحدة.** وهي تختلف من مادة لأخرى. ومن العلاقتين (أ.٤.١) و (أ.٤.٢) نجد أن $C = cm$ ؛ أي أن الحرارة النوعية تمثل **السعة الحرارية لوحدة الكتل من مادة معينة**، لذلك تسمى أحياناً **بالسعة الحرارية النوعية.**

من أجل تقدير كمية الحرارة اختيرت لها وحدة قياس سُميت **الحريرة** *calorie* ورُمز لها اختصاراً *cal*، وعُرّفت على أنها **كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد غرام من الماء المقطر درجة مئوية واحدة.** وعلى ضوء ذلك تكون وحدة الحرارة النوعية هي $cal/g°C$.

لقد عُينت الحرارة النوعية للعديد من المواد، يبين الجدول (أ.٤.١) الحرارة النوعية لبعض المواد الصلبة والسائلة والغازية عند درجة حرارة الغرفة والضغط الجوي باستثناء ما أشير عندها إلى غير ذلك.

لقد بينت القياسات الدقيقة للحرارة النوعية أنها -في كافة المواد المقاسة- تتعلق بشكل ضعيف بدرجة الحرارة. فمثلاً يبين الجدول (أ.٤.٢) الحرارة النوعية للماء المقطر كتابع لدرجة الحرارة الابتدائية، وفيه يظهر تناقص الحرارة النوعية للماء من درجة الحرارة $0\,°C$ إلى $50\,°C$، ثم تزايدها من $50\,°C$ إلى $100\,°C$. كما يظهر فيه أن تغير الحرارة النوعية

للماء المقطر على كامل المجال صغير لا يتجاوز 0.001، لهذا بتقريب جيد يمكننا اعتبار أن الحرارة النوعية للماء المقطر في التطبيقات العملية مساوية إلى $c = 1 cal/g^{\circ}C$.

المادة		الحرارة النوعية J/kg.°C	الحرارة النوعية cal/g.°C
Elemental Solids	عناصر صلبة		
Aluminum	ألمنيوم	900	0.215
Beryllium	بيريليوم	1 830	0.436
Cadmium	كادميوم	230	0.055
Copper	نحاس	387	0.092
Germanium	جرمانيوم	322	0.077
Gold	ذهب	129	0.030
Iron	حديد	448	0.107
Lead	رصاص	128	0.030
Silicon	سيليكون	703	0.168
Silver	فضة	234	0.056
Other Solids			
Brass	نحاس أصفر	380	0.092
Glass	زجاج	837	0.200
Ice (−5°C)	جليد	2 090	0.50
Marble	رخام (مرمر)	860	0.21
Wood	خشب	1 700	0.41
Liquids	سوائل		
Alcohol (ethyl)	كحول إيثيلي	2 400	0.58
Mercury	زئبق	140	0.033
Water (15°C)	ماء	4 186	1.00
Gas	غاز		
Steam (100°C)	بخار ماء	2 010	0.48

الجدول (١.٤.أ): الحرارة النوعية لبعض المواد مقدرة بـ $J/kg^{\circ}C$ عند درجة الحرارة $25^{\circ}C$ والضغط الجوي. عدا تلك التي قد أشير بجوارها إلى درجة حرارتها الابتدائية.

درجة الحرارة °C	الحرارة النوعية للماء المقطر cal/g.°C	درجة الحرارة °C	الحرارة النوعية للماء المقطر cal/g.°C
0	1.0076	50	0.9988
10	1.0015	60	0.9996
15	1.00	70	1.0009
20	0.9997	80	1.0025
30	0.9982	90	1.0046
40	0.9983	100	1.0072

الجدول (٢.٤.أ): الحرارة النوعية للماء المقطر كتابع لدرجة حرارته الابتدائية.

إن كون الحرارة النوعية للماء المقطر عند درجة الحرارة $15^{\circ}C$ تساوي إلى الواحد جعل المكتب الدولي للمعايير والموازين يعيد تعريف الحريرة على أنها **كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد غرام من الماء المقطر درجة مئوية واحدة، من الدرجة $14.5^{\circ}C$ إلى $15.5^{\circ}C$.** ويعيد تعريف الحرارة النوعية على أنها **كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد غرام من المادة درجة مئوية واحدة، من الدرجة $14.5^{\circ}C$ إلى الدرجة $15.5^{\circ}C$.**

تقدر كمية الحرارة في جملة الوحدات البريطانية بوحدة هي البي تي يو Btu، وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد باوند من الماء المقطر درجة فارنهايت واحدة، لهذا فإن:

$$1Btu = 252cal$$

إن ملاحظة أن انتقال كمية الحرارة من أو إلى جسم أثناء تحولاته الطورية لا يتسبب بتغير درجة حرارة الجسم، لأن الطاقة الحرارية المقدمة عندئذ تصرف على تحطيم الروابط بين مكونات الجسم، جعل بعض الفيزيائيين يعدل تعريف كمية الحرارة على أنه **مقدار الطاقة الحرارية التي يكسبها أو يفقدها جسم مسببة زيادة أو نقصاً في درجة حرارته أو تغيراً في أي مقدار آخر.** إنما قيل ذلك، من أجل المحافظة على قانون مصونية الطاقة، راجع **الحرارة الكامنة.**

في كثير من التجارب يكون تعيين الحرارة النوعية للآنية المملوءة بالماء من الصعوبة بمكان، لهذا من أجل تجنب الخطأ الكبير الذي يمكن أن يحصل أثناء تعيينه أدخل مقدار اصطلاحي هو **المكافئ المائي** m_K **للجسم**، وعُرِّف على أنه **كتلة كمية من الماء تكتسب نفس ما يكتسبه هذا الجسم من كمية الحرارة مقدرة** cal **عندما ترتفع درجة حرارتيهما درجة سليزيوس واحدة.** وعليه تكون كمية الحرارة التي يكتسبها جسم (إناء) تعطى بالعلاقة:

$$\Delta Q = m_K \Delta\theta \qquad (أ.٤.٣)$$

حيث m_K هي كتلة الماء المكافئة لكتلة الجسم مقدرة بالغرام.

بالتالي، إذا كانت كتلة الجسم هي m، وكانت الحرارة النوعية له هي c، فإن:

$$\Delta Q = m_K \Delta\theta = cm\Delta\theta \Rightarrow$$

$$m_K = cm \qquad (أ.٤.٤)$$

من هذا يتضح أن المكافئ المائي لجسم ما هو **سعته الحرارية.** وبهذا يتضح أن وحدة المكافئ المائي هي أيضاً $cal/°C$. وفي الجملة الدولية إما kg أو kJ/K.

مسألة (أ.٤.١): بفرض أن لديك خليطة معدنية كتلتها m وكتل مكوناتها m_1 و m_2 و ... m_n، وكانت الحرارت النوعية للمكونات هي c_1 و c_2 و ... c_n، فما هي الحرارة النوعية للخليطة c؟.

الحل: بحسب تعريف الحرارة النوعية يكون:

$$\Delta Q_1 = c_1 m_1 \Delta\theta \;،\; \Delta Q_2 = c_2 m_2 \Delta\theta \;،\; \ldots \;،\; \Delta Q_n = c_n m_n \Delta\theta \qquad (١)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \cdots + \Delta Q_n \qquad (٢)$$

$$\Delta Q = cm\Delta\theta \qquad (٣)$$

بتعويض (١) و (٣) في (٢) نجد:

$$cm\Delta\theta = c_1 m_1 \Delta\theta + c_2 m_2 \Delta\theta + \cdots + c_n m_2 \Delta\theta \Rightarrow$$

$$cm = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \cdots + c_n m_2 \Rightarrow$$

$$c = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2 + \cdots + c_n m_2}{m}$$

٢.٤.أ. تحول العمل إلى حرارة

الحرارة بالنسبة لحاسة اللمس هي الشعور بسخونة الأشياء وبرودتها، وبالنسبة لحاسة البصر هي الزيادة أو النقصان في طاقتها الحركية. فالحرارة والطاقة الحركية مفهومان متكافئان.

تتحول الطاقة الكامنة الخارجية لجسم التي تمثل عمل قوى الثقالة إلى طاقة ميكانيكية (حركية)، والطاقة الحركية للأجسام تتحول نتيجة الاحتكاك والتصادم إلى طاقة حرارية، وتتحول الطاقة الكهربائية نتيجة تصادم الإلكترونات الحرة المتحركة مع الإلكترونات المرتبطة إلى طاقة حرارية. كما تتحول الطاقة الحرارية نتيجة للتمدد إلى طاقة ميكانيكية، والميكانيكية بتدوير عنفة مولدة كهربائية إلى طاقة كهربائية. وتتحول الطاقة الكامنة الداخلية أو الكيميائية للذرات أو النوى أثناء تحطم الروابط إلى طاقة حركية في التفاعلات الذرية والنووية والعكس صحيح، وبذلك تكون التفاعلات الذرية والنووية عبارة تحول للطاقة الكامنة إلى حرارية والعكس صحيح؛ أي أن هذه التفاعلات إما مصدرة للطاقة الحرارية أو ماصة لها. وهكذا فإن كافة أنواع الطاقة يمكن أن تتحول بين بعضها البعض مع بقاء حقيقة أن الطاقة في كافة هذه التحولات تكون محفوظة؛ قانون انحفاظ الطاقة.

فمثلاً عندما يسقط جسم كتلته m من ارتفاع h إلى الأرض فإن طاقته الكامنة mgh؛ أي عمل قوى الثقالة عليه (حيث g تسارع الجاذبية الأرضية) تتحول إلى طاقة حركية. وأثناء سقوطه يحتك مع جزيئات الهواء وبارتطامه بالأرض وتوقفه تكون طاقته الحركية قد تحولت كلية إلى طاقة حرارية سخنته بشكل رئيس وسخنت جزيئات الهواء ونقطة الارتطام. إذا ما أهملنا الطاقة الحرارية التي اكتسبتها جزيئات الهواء ونقطة الارتطام لضآلتها مقارنة بما اكتسبه الجسم، فإنه وفقاً لقانون انحفاظ الطاقة تكون الطاقة الحرارية التي اكتسبها الجسم الساقط تساوي الطاقة الكامنة لذلك الجسم؛ أي:

$$(mgh = cm\Delta\theta) \qquad (أ.٤.٥)$$

حيث c هي الحرارة النوعية للجسم، و $\Delta\theta$ هو التغير في درجة حرارة الجسم، مع افتراض أنه لم ينتقل إلى جزيئات الهواء ونقطة الارتطام بالأرض أي شيء من كمية الحرارة.

[1 cal = 4.18 J]

[1 (cal) = (4.18) J] وقد وجد (جول) بالتجارب الدقيقة العلاقة

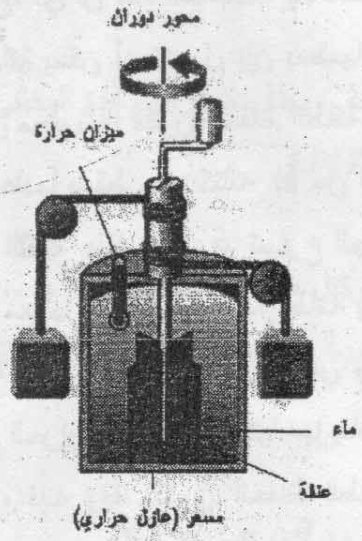
أنه لم يتنقل إلى جزيئات الهواء ونقطة الارتطام بالأرض أي شيء من كمية الحرارة؛ أي أن العمل قد تحول إلى طاقة حرارية للجسم؛ وهذا يعني أن هنالك علاقة بين الحريرة كوحدة لكمية الحرارة والجول كوحدة للعمل. من أجل تعيين ذلك أجرى جول التجربة التالية من أجل **تعيين المكافئ الميكانيكي (التحريكي) للحريرة:**

يبين الشكل (٤.١.أ) رسم تخطيطي لتجربة جول، تربط الكتلة بسلك مهمل الكتلة يمر عبر بكرة مهملة الاحتكاك وملفوف حول محور دوران مهمل الاحتكاك، المحور متصل بعنفة موجودة في وعاء معزول حرارياً يحوي ماء، تقاس درجة حرارة الماء بميزان حرارة.

عندما تهبط الكتلتان m تديران العنفة التي بدورها تحرك الماء في وعاء معزول حرارياً (مسعر) فترتفع درجة حرارة الماء؛ أي أن الطاقة الكامنة تتحول إلى طاقة حركية التي بدورها تتحول إلى كمية حرارة. وعندما يمكننا إهمال الاحتكاك مع جزيئات الهواء وفي البكرات والمحاور وإهمال ما اكتسبته من حرارة، وعندما لا يتبادل الماء كمية حرارة مع الوسط المحيط، ولا تكتسب العنفة أي طاقة حرارية، فإن كامل الطاقة الكامنة تكون قد تحولت إلى زيادة الطاقة الحرارية للماء، كما في المعادلة (٤.٥.أ). وبإجراء القياسات اللازمة وجد "جول" أن:

$$1cal = 4.1868J \qquad (٤.٦.أ)$$

أي أن كل $4.1868J$ من الطاقة الميكانيكية ترفع درجة حرارة $1g$ من الماء بمقدار درجة سليزيوس واحدة.



الشكل (٤.١.أ): رسم تخطيطي لتجربة؛ تعيين العمل المكافئ للحريرة أو ما يسمى بالمكافئ الميكانيكي للحرارة.

ملاحظة: عندما تقدر كمية الحرارة بالجول J، فإن الحرارة النوعية تقدر بـ: $\frac{kJ}{kg\cdot K}$ أو $\frac{J}{g.K}$.

٤.٣.أ. تعيين الحرارة النوعية

هنا نقدم إحدى أفضل الطرق لتعيين الحرارة النوعية للأجسام الصلبة والسائلة والغازية، علماً أن جميع الطرق تعتمد على مبدأ انحفاظ الطاقة.

حيث m_2 هي كتلة المسعر، و c_2 حرارته النوعية، و m_1 هي كتلة العينة المراد قياس حرارتها النوعية المجهولة، c_1 حرارتها النوعية.

٥.٤.أ. الحرارة الكامنة

تدل التجارب على أنه لدى تسخين جسم صلب تزداد كمية الحرارة التي يكتسبها مع ارتفاع درجة الحرارة. إلى أن يصل إلى درجة انصهاره، وعندئذ تتوقف درجة حرارة الجسم عن الارتفاع رغم استمرار التسخين؛ أي رغم الاستمرار بتقديم الحرارة له، ورغم أن بعضه قد انصهر، ويكون للصُهارة نفس درجة حرارة الجسم الصلب. فمثلاً عند تسخين كمية من الجليد إلى $0°C$ فإن درجة حرارة الجليد تثبت عند هذه الدرجة من الحرارة رغم الاستمرار بالتسخين؛ أي رغم الاستمرار بتقديم الحرارة للجليد، ويكون للجليد والماء الناتج عن ذوبان الجليد نفس درجة الحرارة $0°C$. ويستمر الأمر على هذا الحال إلى أن ينصهر الجليد كلياً، ثم تبدأ درجة حرارة الماء الناتج بالارتفاع. كما تدل التجارب أيضاً أنه عند تسخين سائل إلى درجة حرارة تبخره، فإن درجة حرارة هذا السائل تتوقف عن الارتفاع رغم أن بعضه قد تبخر. فمثلاً عند تسخين كمية من الماء إلى درجة غليانه؛ أي إلى درجة الحرارة $100°C$، فإن درجة حرارة الماء تثبت عند هذه الدرجة من الحرارة رغم الاستمرار بالتسخين، ويكون للسائل ولبخاره نفس درجة الحرارة $100°C$. ويستمر الأمر على هذا الحال إلى أن يتبخر الماء كلياً، وعندئذ تبدأ درجة حرارة البخار بالارتفاع من جديد.

عند أي تحول طوري يحصل تحطم لأحد الروابط الكائنة بين مكونات المادة، وبالاتجاه المعاكس تتشكل هذه الرابطة. ففي حالة التسخين تصرف كمية الحرارة المقدمة على **فك الرابطة** فلا ترتفع درجة حرارة الجسم المسخن أثناء ذالك، وتكون عندئذ كمية الحرارة المقدمة تساوي إلى الطاقة اللازمة لفك الرابطة، التي هي في الحقيقة ليست سوى طاقة كامنة.

كما تدل التجارب أيضاً كمية الحرارة المقدمة لجسم عند تحوله الطوري تتناسب فقط مع كتلته، فكلما كانت كتلة الجسم أكبر، فإنه يحتاج إلى أن نقدم له كمية أكبر من حرارة لكي يتحول كلياً إلى الطور الجديد؛ أي أن:

$$\Delta Q \propto m \Rightarrow \Delta Q = L m \qquad (أ.٤.٢٢)$$

حيث L هو ثابت التناسب، ويسمى **بالحرارة الكامنة**، وهي **كمية الحرارة اللازم تقديمها لتحويل وحدة الكتل من المادة من حالة طورية إلى حالة طورية أخرى**، كتحول الأجسام الصلبة إلى سائلة أو السائلة إلى غازية من دون أن تتغير درجة حرارة الجسم المتحول.

المادة		نقطة الانصهار (°C)	الحرارة الكامنة للانصهار (J/kg)	نقطة الغليان (°C)	الحرارة الكامنة للتبخر (J/kg)
Helium	هليوم	−269.65	5.23×10^3	−268.93	2.09×10^4
Nitrogen	أزوت	−209.97	2.55×10^4	−195.81	2.01×10^5
Oxygen	أكسجين	−218.79	1.38×10^4	−182.97	2.13×10^5
Ethyl alcohol	كحول إيتيلي	−114	1.04×10^5	78	8.54×10^5
Water	ماء	0.00	3.33×10^5	100.00	2.26×10^6
Sulfur	كبريت	119	3.81×10^4	444.60	3.26×10^5
Lead	رصاص	327.3	2.45×10^4	1 750	8.70×10^5
Aluminum	ألمنيوم	660	3.97×10^5	2 450	1.14×10^7
Silver	فضة	960.80	8.82×10^4	2 193	2.33×10^6
Gold	ذهب	1 063.00	6.44×10^4	2 660	1.58×10^6
Copper	نحاس	1 083	1.34×10^5	1 187	5.06×10^6

الجدول (٣.٤.أ): نقطة الانصهار والحرارة الكامنة للانصهار أو حرارة الانصهار النوعية. نقطة الغليان الحرارة والحرارة الكامنة للتبخر أو حرارة التبخر النوعية.

بناء على هذا التعريف، إذا كان التحول تبخراً كانت **الحرارة الكامنة للتبخر** هي:

$$L_v = \frac{\Delta Q}{m} \qquad (٢٣.٤.أ)$$

وإذا كان التحول انصهاراً كانت **الحرارة الكامنة للانصهار** هي:

$$L_f = \frac{\Delta Q}{m} \Rightarrow \qquad (٢٤.٤.أ)$$

$\Delta Q = L_f \cdot m_{ic}$

يبين الجدول (٣.٤.أ) الحرارة الكامنة للتبخر ونقطة الغليان الموافقة، والحرارة الكامنة للانصهار مع نقطة الذوبان الموافقة لبعض المواد.

مسألة (٤.٤.أ): من أجل توضيح مفهوم الحرارة الكامنة في التحولات الطورية، نقدم دراسة عن الطاقة الحرارية اللازمة لتحويل مكعب جليد كتلته $1g$ عند درجة الحرارة $-30°C$ إلى بخار عند درجة الحرارة $120°C$. يبين الشكل (٥.٤.أ) النتائج التجريبية التي حُصل عليها عند تقديم الطاقة الحرارية إلى الجليد بشكل تدريجي. لنتفحص كل جزء من المنحني التجريبي:

الجزء A: في هذا الجزء من المنحني، درجة حرارة الجليد تتغير من $-30°C$ حتى $0°C$، بما أن الحرارة النوعية للجليد هي $2090J/kg\,°C$، فيمكننا حساب كمية الحرارة اللازمة بتطبيق العلاقة (٢.٤.أ):

$$\Delta Q = c_{ic} m_{ic} \Delta\theta = 2090J/kg°C(1\times10^{-3}kg)\{0-(-30)\}°C = 62.7J$$

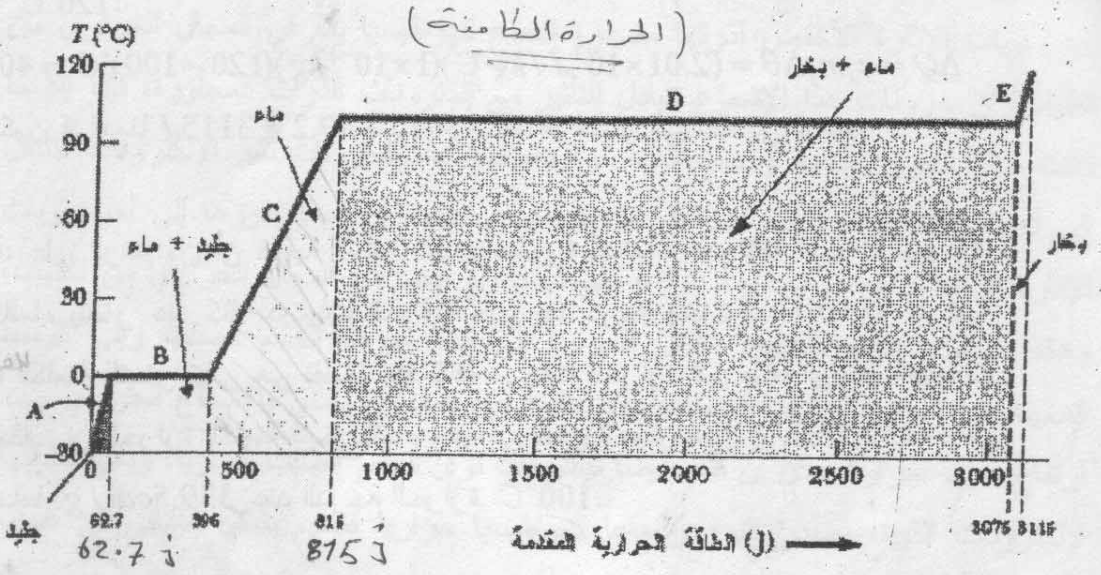
وبذلك نكون قد قدمنا $62.7J$، كما هو مشار إلى ذلك في الرسم.

الجزء B: عندما يصل الجليد إلى درجة الحرارة $0°C$، يبدأ الجليد بالذوبان، والمزيج(جليد+ ماء)

يبقيان نفس هذه الدرجة رغم الاستمرار في تقديم الطاقة الحرارية، وتبقى كذلك إلى أن يذوب الجليد كلياً. عندئذ يمكن حساب كمية الحرارة اللازمة لصهر $1g$ من الجليد عند درجة الحرارة $0°C$ من العلاقة (٤.٢٤.أ):

$$\Delta Q = L_f m_{ic} = (3.33\times10^5 J/kg)(1\times10^{-3} kg) = 333J$$

وبذلك نكون قد قدمنا $62.7 + 333 \cong 396J$ كما هو مشار إلى ذلك في الرسم.



الشكل (٤.٥.أ): الرسم التجريبي لتابعية درجة حرارة الجسم المدروس (واحد غرام من الجليد عند درجة الحرارة $-30°C$ أثناء تحولاته لكي يصير بخار عند درجة الحرارة $120°C$) للطاقة الحرارية المقدمة له.

الجزء C: بين درجتي الحرارة $0°C$ و $100°C$، لا يحدث ما يثير الاهتمام؛ لا يحصل تحول طوري. والطاقة الحرارية المقدمة تُصرف فقط على رفع درجة حرارة الماء. وتكون كمية الحرارة اللازمة تقديمها لرفع درجة حرارة الماء من $0°C$ و $100°C$:

$$\Delta Q = c_w m_w \Delta\theta = (4.19\times10^3 J/kg°C)(1\times10^{-3} kg)(100-0)°C = 419J$$

وبذلك نكون قد قدمنا $396 + 419 \cong 815J$، كما هو مشار إلى ذلك في الرسم.

الجزء D: عند درجة الحرارة $100°C$، يحدث تحولاً طورياً آخر، حيث يتحول الماء الذي عند درجة الحرارة $100°C$ إلى بخار ذي درجة حرارة $100°C$. بصورة مشابهة لما حدث للمزيج (جليد+ماء) في الجزء B، تبقى درجة حرارة المزيج (ماء+بخار) عند درجة الحرارة $100°C$، رغم الاستمرار في تقديم الطاقة الحرارية، وتبقى كذلك إلى أن يتبخر الماء كلياً. وعندئذ يمكن حساب كمية الحرارة اللازمة لتحويل $1g$ من الماء عند درجة الحرارة $100°C$ إلى بخار ذي درجة الحرارة $100°C$بتطبيق العلاقة (٤.٢٣.أ):

$$\Delta Q = L_v m_w = (2.26\times10^6 J/kg)(1\times10^{-3} kg) = 2260J$$

وبذلك نكون قد قدمنا $2260 + 815 = 3075J$، كما هو مشار إلى ذلك في الرسم.

الجزء E: في هذا الجزء من المنحني، كما في الجزئين A و C، لا يحصل تحولٌ طوري، لهذا تصرف الطاقة الحرارية المقدمة فقط على رفع درجة حرارة البخار. وتكون كمية الحرارة اللازم تقديمها لرفع درجة حرارة البخار من درجة الحرارة $100°C$ إلى درجة الحرارة $120°C$:

$$\Delta Q = c_s m_s \Delta\theta = (2.01\times10^3 J/kg°C)(1\times10^{-3} kg)(120-100)°C = 40.2J$$

وبذلك نكون قد قدمنا $3075 + 40.2 \cong 3115J$، كما هو مشار إلى ذلك في الرسم.

ملاحظة: على الرغم من أن عملية التبخر تحدث بصورة مستمرة عند كافة درجات الحرارة؛ أي أن الماء يتبخر عند كافة درجات الحرارة حتى عند درجة الحرارة $0°C$، إلا أن قيمة الحرارة الكامنة للتبخر تبقى هي نفسها عند كافة درجات الحرارة لأن طاقة ارتباط المكونات ثابتة. فمثلاً: إن الحرارة الكامنة لتبخر الماء وهو في الدرجة صفر هي $539.5cal/g$، وهي نفسها تماماً $539.5cal/g$ عند الدرجة الحرارة $100°C$.

٦.٤.أ. آليات انتقال الحرارة

بداية لنفرض أن لدينا جسماً كبيراً نسبياً ذا شكل أسطواني يحقق الاعتبارات التالية: أنه في حال يكون فيه بعيداً عن نقطتي تحوله الطوري، وأنه أصلاً متزن حرارياً، وأنه معزول كتلياً. ولنفرض أن عملية تسخينه تتم بصورة منتظمة وبطيئة من أحد جهاته، ولتكن قاعدته السفلى.

عندئذ، لما كانت ذرات أو جزيئات الجسم الصلب ترتبط بصورة مرنة في خليته البلورية، فإنه لا يمكنها التنقل من مكان لآخر فيه، إلا أنه نتيجة لارتباطها المرن بالخلية البلورية يمكنها القيام بحركات اهتزازية حرارية عبر مراكز الاتزان النسبية في شبكته البلورية. إن ازدياد مجال اهتزاز الذرة أو الجزيئة، وبالتالي الخلية البلورية للجسم الصلب، مع ارتفاع درجة حرارتها ينقل بفعل التدافع الحركة الاهتزازية الحرارية إلى الذرات أو الجزيئات المجاورة، وبالتالي إلى البلورات المجاورة، فترتفع درجة حرارتها، وهكذا دواليك تتتابع عملية التدافع، فتنتقل الحرارة إلى كافة أجزاء الجسم الصلب. إن هذا النمط من الانتقال للحرارة هو ما يسمى **بالتوصيل الحراري**. إن الإلكترونات شبه الحرة في بعض الأجسام الصلبة، التي يمكن النظر إليها وكأنها غاز إلكتروني مثالي، تقوم بحركة حرارية عشوائية داخل الجسم

الصلب. تزداد الحركة العشوائية الحرارية لهذه الإلكترونات مع ارتفاع درجة حرارة الجسم الصلب، ومن ثم بفعل التصادمات فيما بينها وبين الذرات والجزيئات يمكن أن تسهم بشكل إضافي في عملية **انتقال الحرارة بالتوصيل**.

أما بالنسبة لإلكترونات الجسم الصلب المرتبطة بذراتها، فإنها عند ارتفاع درجة الحرارة تثار فتنتقل إلى أحد سويات الإثارة الحرارية في الذرة، من ثم، ما تلبث أن تعود إلى أحد سويات الإثارة الأخفض لذرتها مصدرة إشعاع كهرطيسيا يقع في المجال الحراري من الطيف. إن حرونات هذا الإشعاع تتبادل التأثير مع إلكترونات الذرات المجاورة، فإذا إذا ما كانت طاقة الحرون كافيه لإحداث إثارة حرارية، فإنه هذه الحرونات تُثير الإلكترونات فتنتقل إلى أحد سويات الإثارة الحرارية لذرتها، من ثم، ما تلبث أن تعود بدورها إلى أحد سويات الإثارة الأخفض لذرتها مصدرة إشعاع كهرطيسيا يقع أيضا في المجال الحراري من الطيف، وهكذا دواليك تتتابع العملية، فتنتقل الحرارة إلى كافة أجزاء الجسم الصلب وإلى الوسط المحيط بهذا الجسم. إن هذا النمط من الانتقال الحراري هو ما يسمى **بالإشعاع الحراري**. عند ارتفاع درجة حرارة يمكن أن تُثار أيضاً نيكليونات نوى الجسم الصلب حرارياً، وبآلية مشابهة لإلكترونات الذرة، تصدر النوى إشعاعاً كهرطيسياً حرارياً فتسهم بشكل إضافي في عملية **انتقال الحرارة بالإشعاع**.

ولما كانت ذرات وجزيئات السائل شبه مرتبطة ببعضها البعض، فإنه مع ارتفاع درجة حرارتها يزداد ضعف الرابطة أكثر فأكثر وتكتسب الذرات أو الجزيئات الأسخن طاقة حركية أكبر من غيرها مما يمكنها من الانتقال فيما بين الذرات والجزيئات الأخرى بحركة زكزاكية، أثناء الحركة الزكزاكية تبدل الذرة أو الجزيئة المتحركة اتجاهها عند كل تصادم، وتنقل جزءً من طاقتها الحركية الحرارية إلى الذرة أو الجزيئة المصدومة. لكن لما كانت الذرات أو الجزيئات تصبح أقل كثافة مقارنة مع غيرها عندما تصبح أسخن، فإن حركتها الزكزاكية تكون موجهة إجمالاً نحو الأعلى. إن الحركة الإجمالية لذرات وجزيئات السائل تشكل تيارات متموجة دافئة تسبح نحو الأعلى ضمن الجزيئات الأبرد، إن هذا النمط من الانتقال الحراري هو ما يسمى **بالحمل الحراري الطبيعي**. إن إلكترونات ذرات ونيكليونات نوى السائل يمكن أن تُثار حرارياً أثناء عملية التسخين، لكن بصورة أقل من الجسم الصلب، فتصدر إشعاعات كهرطيسية حرارية في كافة الاتجاهات يمكن أن تسهم في عملية تسخين السائل والوسط المحيط به.

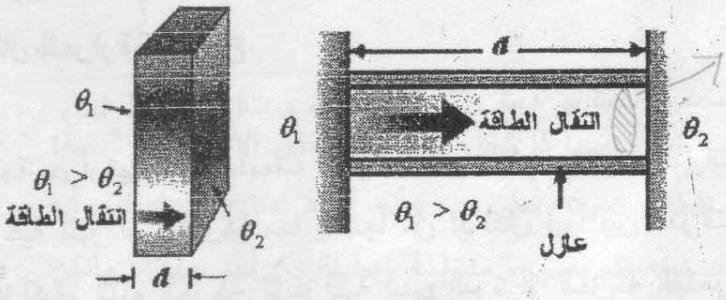
ولما كانت ذرات وجزيئات الغاز متباعدة وأقل ارتباطاً مما هي عليه في السوائل فإن حركة تيارات الحمل الحراري الطبيعي نحو الأعلى فيها تكون أسرع مما هي عليه في

السوائل، بينما يكون عدد الإثارات الحرارية لنكليونات نواها وإلكترونات ذراتها أقل. لهذا في العموم تكون عملية انتقال الحرارة بوساطة تيارات الحمل الحراري الطبيعي في الغازات هي المسيطرة.

لما كانت آليات انتقال الحرارة في السوائل هي ذاتها في الغازات، كثيراً ما يسمى كلاهما **بالموائع الحرارية**.

٤.٦.١.أ. انتقال الحرارة بالتوصيل

لنسخن إحدى قاعدتي أسطوانة معزولة (مصمتة أو مجوفة مملوءة بسائل أو غاز) بشكل منتظم ومتجانس عن الوسط الخارجي، ولتكن القاعدة الثانية عند درجة حرارة ثابتة؛ أي أن الفرق بين درجتي حرارة القاعدتين ثابت، أو أن نسخن صفيحة ذات سماكة ثابتة بحيث يكون الفرق بين درجتي حرارة وجهيها ثابتاً سواءً أكانت مصمتة أو مجوفة مملوءة بسائل أو غاز، الشكل (٤.٦.أ)، فإنه بعد زمن ما من التسخين يحصل تدرج في درجة الحرارة بين قاعدتي الأسطوانة على طول ارتفاعها أو وجهي الصفيحة على طول سماكتها.



الشكل (٤.٦.أ): انتقال الطاقة الحرارية بالتوصيل.

بفرض أن ارتفاع الأسطوانة أو سماكة الصفيحة d، وأن مساحة قاعدتها أو مقطعها هو A. وبفرض أن درجة حرارة قاعدتي الأسطوانة (أو وجهي الصفيحة) الثابتتين على الترتيب هما θ_1 و θ_2، وأن $\theta_1 > \theta_2$.

عندئذ تبين التجارب أن كمية الحرارة المنتقلة Q عبر المقطع A تتناسب:

- طرداً مع مساحة المقطع؛ فكلما كان المقطع أكبر كانت كمية الحرارة المنتقلة أكبر:

$$Q \propto A$$

- طرداً مع الفاصل الزمني المختار Δt الذي يحصل خلاله الانتقال؛ فكلما كان هذا الفاصل أكبر كانت كمية الحرارة المنتقلة أكبر:

$$Q \propto \Delta t$$

- طرداً مع الفرق في درجتي الحرارة $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ بين قاعدتي الأسطوانة $\theta_2 < \theta_1$؛ فكلما كان الفرق أكبر كانت كمية الحرارة المنتقلة أكبر:

$$Q \propto \Delta\theta$$

- عكساً مع ارتفاع الأسطوانة أو سماكة الصفيحة؛ فكلما كان الارتفاع كانت كمية الحرارة المنتقلة أقل:

$$Q \propto \frac{1}{d}$$

وبالتالي فإن:

$$Q \propto -A\Delta t\frac{\Delta\theta}{d}$$

حيث أن الفرق في درجتي الحرارة $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ سالب، يسمى المقدار $-\frac{\Delta\theta}{d}$ بالتدرج الحراري.

وبناء عليه أوجد فوريه أن:

$$Q = -\lambda A\Delta t\frac{\Delta\theta}{d} \qquad (أ.٤.٢٥)$$

حيث λ هو ثابت التناسب، الذي يسمى **الناقلية الحرارية** وأحياناً معامل التوصيل، وأحياناً بمعامل انتقال الحرارة بالتوصيل، ويعرف بأنه **كمية الحرارة المنتقلة عبر وحدة السطوح خلال وحدة الزمن من أجل تدرج حراري قدره واحد.** إن وحدة الناقلية الحرارية هي إما $W/m\cdot K$ أو $W/m\cdot{}^\circ C$، حيث يمثل الواط $W = J/s$. تختلف الناقية الحرارية من مادة إلى أخرى، انظر الجدول (٤.٤.أ). وهو تابع لدرجة الحرارة الابتدائية.

تختلف المواد بسرعة نقلها للحرارة، لذلك تصنف إلى **ناقلة أو عازلة**، علماً أنه ليس هنالك من حدود فاصلة واضحة بين هذين المفهومين. على كل حال، لا يوجد في الطبيعة ناقل حراري أو عازل حراري مثالياً، فالمواد تتفاوت في نقلها للحرارة. مع أن أفضل العوازل الحرارية قاطبة في الطبيعة هو الخلاء إلا أنه ينقل حرونات الإشعاع الكهرطيسي الحراري إلى مسافات بعيدة بسرعة الضوء، فالدفء الذي نتلقاه من أشعة الشمس هو على الأغلب من هذا النمط. وأفضل النواقل الحرارية هو الجسم الصلب الذي بلوراته تمتلك عصابة إثارة حرارية تجاوبية واسعة من أجل كامل المجال الحراري من الطيف، لهذا بالضبط تكون بلورات الماس من أفضل النواقل الحرارية المعروفة. عموماً تتناقص الناقلية الحرارية بتناقص المجال التجاوبي الحراري لعصابة الإثارة الذي يُحقق بإضافة ذرات شائبة إلى البلورة أثناء تنميتها بحيث تكون قادرة على إحالة المجال الحراري للإشعاع إلى المجال المرئي كما هو

الحال في حساسات المناظير الليلية. أما أفضل المواد المستعملة في تصنيع مواد العزل الحراري في المنشآت السكنية والصناعية والتمديدات الحرارية فهي المواد اللامعدنية مثل الخشب والاسبستوس والزجاج والمطاط والبيتون وغيرها، انظر الجدول (٤.٤.أ). على كل حال، بصورة عامة يمكن القول أن الأجسام الصلبة ذات ناقلية حرارية أفضل من السوائل، والسوائل أفضل من الغازات والغازات أفضل من الخلاء.

المادة		الناقلية الحرارية (W/m°C)
Metals (at 25°C)		معادن
Aluminum	ألمنيوم	238
Copper	نحاس	397
Gold	ذهب	314
Iron	حديد	79.5
Lead	رصاص	34.7
Silver	فضة	427
Nonmetals (approximate values)		غير معدنية
Asbestos	أسبستوس	0.08
Concrete	بيتون	0.8
Diamond	ألماس	2 300
Glass	زجاج	0.8
Ice	جليد	2
Rubber	مطاط	0.2
Water	ماء	0.6
Wood	خشب	0.08
Gases (at 20°C)		غازات
Air	هواء	0.023 4
Helium	هليوم	0.138
Hydrogen	هيدروجين	0.172
Nitrogen	أزوت	0.023 4
Oxygen	أكسجين	0.023 8

الجدول (٤.٤.أ): الناقلية الحرارية، عند درجة حرارة ابتدائية مشار إليها في الجدول.

مقاومة النقل الحراري أو المقاومة الحرارية R و R value:

تسمى المعادلة (٤.٤.أ٢٥) **بمعادلة انتقال كمية الحرارة بالتوصيل الحراري**. وتكتب أحياناً بالشكل:

$$\frac{Q}{\Delta t}=\frac{\lambda A}{d}\Delta\theta \qquad (٤.٤.أ٢٦)$$

حيث $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$.

يسمى المقدار:

$$H=\frac{Q}{\Delta t} \qquad (٤.٤.أ٢٧)$$

بالتدفق الحراري وهو يمثل **كمية الحرارة المنتقلة من الوجه ذو درجة الحرارة θ_1 للصفيحة إلى الوجه ذو درجة الحرارة θ_2 خلال وحدة الزمن**. ووحدته هي $W=J/s$. كما يسمى المقدار:

$$R=d/\lambda A \qquad (٤.٤.أ٢٨)$$

مقاومة النقل الحراري أو المقاومة الحرارية (R)

وهو يعبر عن مدى مانعية الجسم للحرارة

بالاستفادة من العلاقة (١) يمكن كتابة العلاقة (٢) كما يلي:

$$(R_1 + R_2 + \cdots + R_n)H = (\Delta\theta)_1 + (\Delta\theta)_2 + \cdots + (\Delta\theta)_n \qquad (٣)$$

بتعويض الفرق في درجات الحرارة في (٣) والاختصار نجد:

$$(R_1 + R_2 + \cdots + R_n)H = \theta_n - \theta_1 = \Delta\theta \qquad (٤)$$

ومن ناحية ثانية لدينا:

$$RH = \Delta\theta \qquad (٥)$$

بالمقارنة بين العلاقتين (٤) و (٥) ينتج:

$$(R_1 + R_2 + \cdots + R_n)H = RH$$

وبالتالي فإن:

$$R_1 + R_2 + \cdots + R_n = R$$

(معادلة)

$H = h \cdot A \cdot \Delta\theta$

٤.٦.٢.أ. انتقال الحرارة بالحمل

عندما يكون مائع في تماس مع سطح جسم ساخن ذي درجة حرارة ثابتة، فإن الطاقة الحرارية تنتقل من الجسم الساخن إلى المائع الذي يحملها حملاً طبيعياً كتيار صاعد إلى الأعلى بعيداً عن الجسم الساخن. حيث تنتقل الطاقة الحرارية في سياق الحركة الإجمالية للتيارات الجزيئية أو الذرية للمائع. إذا كانت درجة حرارة تيار الجسيمات الصاعد θ_∞، وكانت درجة حرارة سطح الجسم الساخن θ_S، فإن كمية الحرارة المنتقلة من الجسم الساخن إلى المائع خلال وحدة الزمن $H = \frac{Q}{\Delta t}$ تكون متناسبة طرداً مع الفرق في درجتي الحرارة $\Delta\theta = \theta_S - \theta_\infty$، وطرداً مع مساحة سطح الجسم الصلب الذي يمس المائع A؛ أي:

$$H \propto A\Delta\theta$$

وبالتالي فإن:

$$H = hA\Delta\theta \qquad (٤.٣٢أ)$$

تسمى المعادلة (٤.٢٥أ) **بمعادلة انتقال الحرارة بالحمل:**

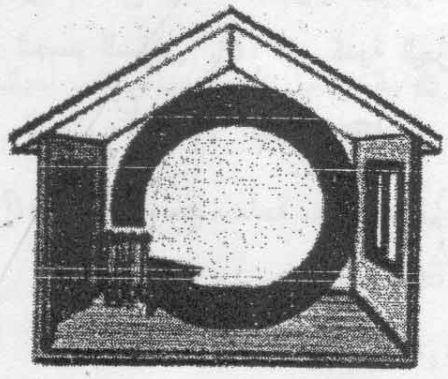
حيث h هو ثابت التناسب، الذي يسمى **بمعامل انتقال الحرارة بالحمل** أو اختصاراً **معامل الحمل**، ويقدر بوحدة $W/m^2.K$ أو بوحدة $kcal/m^2.s.^\circ C$، وفي الجملة البريطانية بالوحدة $Btu/h.ft^2.^\circ F$. يختلف معامل الحمل h عن الناقلية الحرارية λ بكونه ليس خاصية من خصائص الجسم الساخن أو مادة تيار الحمل، بل هو مقدار يعتمد على عوامل عديدة، منها مثلاً: هندسة الجسم الصلب الساخن وشكل ووضعية سطحه وناقليته الحرارية،

وسرعة المائع وكثافته ودرجة حرارته وضغطه. يبين الجدول (٤.٦.أ) اعتمادية قيمة معامل الحمل h الضعيفة على الفرق في درجة الحرارة $\Delta\theta$ من أجل بعض الأوضاع الهندسية للجسم الساخن.

الهندسة	$h, kcal/m^2.s.^\circ C$
صفيحة شاقولية	$(4.24\times10^{-4})\sqrt[4]{\Delta\theta}$
صفيحة أفقية	
وجهها نحو الأعلى	$(5.95\times10^{-4})\sqrt[4]{\Delta\theta}$
وجهها نحو الأسفل	$(3.14\times10^{-4})\sqrt[4]{\Delta\theta}$
أنبوب قطره D (cm)	$(1.0\times10^{-3})\sqrt[4]{\Delta\theta/D}$

الجدول (٤.٦.أ): تابعية معامل الحمل لبعض الهندسات.

ملاحظة: إذا كانت حركة المائع ناجمة عن فرق في الكثافة الملازمة للفرق في درجة الحرارة، فإن تيارات الحمل تكون **طبيعياً**، كما هو الحال بالنسبة لتيارات حمل الماء المسخن الناشئة في قاظانات تسخين المياه المنزلية، وبالنسبة لتيارات الحمل الهواء المسخن الناشئة عن وسائط التدفئة المنزلية؛ كالمدافئ الكهربائية ومدافئ المازوت والحطب ومشعات التدفئة المركزية، الشكل (٤.٧.أ)، هي تيارات حمل طبيعية، وكذلك أيضاً تكون تيارات حمل الهواء الساخن في البرادات.



الشكل (٤.٧.أ): شكل تيارات الحمل في غرفة مسخنة بوساطة مشع حراري.

أما إذا حُرك المائع بفعل مضخة أو مروحة، أو ما شابه فعله ذلك، فإن تيارات الحمل تكون **قسرياً**، كما هو الحال في منظومات التدفئة المركزية بالمشعات الحرارية، حيث تكون تيارات حمل المياه الساخنة عبر الأنابيب هي تيارات قسرية بوساطة المضخات، وطبيعية بآن واحد، لكن الطبيعية منها مهملة، وتكون كبيرة في مراجل التسخين. وفي أجهزة التكييف، والمدافئ الكهربائية ذوات المراوح فتكون تيارات حمل الهواء المسخن أو المبرد هي تيارات قسرية وطبيعية بآن واحد، حيث تزداد نسبة القسرية منها بحسب سرعة المراوح المستخدمة، بينما تزداد نسبة الطبيعية منها فقط تبعاً للفروق في درجة الحرارة.

٣.٤.٦.أ. انتقال الحرارة بالإشعاع

من المؤكد أنكم تحسون بالدفء من ذلك الوهج المباشر القادم من اللهب البرتقالي الناشئ عند إضرام مواقد الحطب أو البترول أو من المواقد والحمايات والسخانات الكهربائية. تماماً كما تحسون بالطاقة الحرارة لدى التعرض لأشعة الشمس. من الواضح أن الطاقة الحرارية هذه لم تكن قد بلغت أجسادنا لا بالتوصيل المباشر ولا بتيارات الحمل، بل بالإشعاع الذي هو أمواج كهرطيسية تقع في المجال المرئي وغيره.

تبين التجارب أن كافة الأجسام الساخنة تشع بصورة مستمرة طاقة حرارية على شكل أمواج كهرطيسية تنتج عن الحركات الاهتزازية الحرارية لجزيئاتها. فلقد وجد **ستيفان** أن **معدل إشعاع الطاقة الحرارية** P_e المنبعثة من أي جسم ساخن بالواط يتناسب طرداً مع القوة الرابعة لدرجة حرارته المطلقة؛ أي مع T^4، ومع مساحة سطح هذا الجسم A بالمتر المربع؛ أي:

$$P_e \propto A T^4$$

معدل إشعاع الطاقة الحرارية

$$P_e = \sigma A e T^4 \qquad (أ.٤.٣٣)$$

حيث σ هو ثابت، ويساوي $5.6696\times10^{8} W/m^2K^4$، و e هو **الانبعاثية**؛ وقيمتها يمكن أن تتراوح بين الصفر والواحد تبعاً لخصائص سطح الجسم. إن الانبعاثية لأي جسم تساوي إلى امتصاصيته؛ وهي النسبة التي يمتصها الجسم من الإشعاع الوارد، حيث أن مجموع ما يمتصه جسم وما يعكسه من إشعاع يساوي إلى الواحد.

في الوقت الذي يشع فيه الجسم طاقته على شكل أمواج كهرطيسية بمعدل يعطى بالعلاقة (أ.٤.٣٣) هو ذاته يمتص طاقة على شكل أمواج كهرطيسية بمعدل:

$$P_a = \sigma A e T_0^4$$

حيث T_0^4 هي درجة حرارة الوسط المحيط.

فلو أن العملية الأخيرة؛ أي الامتصاص، لا تحدث مطلقاً لكان الجسم قد استمر بإشعاع كامل طاقته إلى أن تصل درجة حرارته إلى الصفر المطلق. حيث تأتي الطاقة التي يمتصها الجسم من الوسط المحيط، الذي هو بحد ذاته عبارة عن أجسام مشعة للطاقة. فإذا ما كانت درجة حرارة جسم هي T، درجة الحرارة الوسطى للمحيط هي T_0، فإن معدل الطاقة الصافي الذي يكتسبه الجسم أو يفقده عن طريق الإشعاع سيكون:

معدل الطاقة الصافي

$$P_{net} = \sigma A e (T^4 - T_0^4) \qquad (أ.٤.٣٤)$$

عندما يكون الجسم في حالة توازن مع الوسط المحيط به، فإنه يشع للطاقة ويمتصها بنفس المعدل، لهذا تبقى درجة حرارته ثابتة. أما عندما يكون الجسم أسخن من الوسط المحيط به، فإنه يشع طاقة أكثر مما يمتص، لهذا يحصل تناقص في درجة حرارته، وعندما يكون الجسم أبرد من الوسط المحيط به، فإنه يمتص طاقة أكثر مما يشع، لهذا يحصل تزايد في درجة حرارته.

يعرَّف **الماص المثالي** على أنه ذلك الجسم الذي يمتص كامل الطاقة الواردة إليه، إن مثل هذا الجسم يكون له $e=1$، ويسمى عادة **بالجسم الأسود**. إن الماص المثالي هو أيضاً **مشع مثالي** للطاقة. بالمقابل، إن الجسم الذي له $e=0$ لا يمكنه أن يمتص شيء من الطاقة الواردة إليه، بالتالي فإن مثل هذا الجسم يعكس كامل الطاقة الواردة إليه، لهذا يسمى أيضاً **بالعاكس المثالي**.

بصورة تقريبية، يَعْبُرُ المتر المربع من الإشعاع الكهرطيسي الشمسي في أعلى منطقة في الغلاف الجوي بصورة معامدة خلال الثانية قدراً هائلاً من الطاقة يقدر بـ $1340J$. إن هذا الإشعاع هو في المقام الأول ضوء مرئي وتحت أحمر مترافق مع مقدار لا بأس به من الإشعاع الفوق البنفسجي. إن قسماً من هذه الطاقة يُمتص من قبل الغلاف الجوي والقسم الآخر ينعكس عائداً إلى الفضاء الخارجي، أياً يكن ذلك الجزء المنعكس، فإنه يصل من تلك الطاقة إلى الأرض في كل يوم كمية كافة لصيرورة الحياة على سطحها.

تؤثر كمية الطاقة الوصلة إلى سطح الأرض على كافة مرافق الحياة، وهنا نضرب فقط مثالاً على تأثيرها على درجة الحرارة. إن وجود الغيوم في النهار يحجب قسماً كبيراً من الإشعاع الشمسي مما يجعل النهار الصافي أشد حرارة من النهار الغائم. أما في الليل، إذا ما وجدت غيوم فوق الأرض، فإن بخار الماء فيها يمتص جزء لا يستهان به من الإشعاع فوق البنفسجي المنبعث من الأرض، ثم يبعثه، فيعود جزء لا بأس به من هذا الإشعاع إلى سطح الأرض، مما يجعل سويات درجة الحرارة عند السطح تبقى معتدلة. لكن بغياب الغطاء الغيمي، تكون الإعاقة في طريق هذا الإشعاع أقل، مما يجعل معظمه يغادر إلى الفضاء الخارجي. إن هذا أحد أسباب كون درجة الحرارة في الليال الصافية أقل مما هي عليه في الليال الغائمة.

قانون فين:

لقد بين فين تجريبياً أن الطول الموجي الذروي λ_m للإشعاع المنبعث من جسم ساخن أسود يتناسب عكساً مع درجة حرارته المطلقة:

مسائل محلولة

مسألة (٤.١): أوجد أقل كتلة ماء ذي درجة حرارة $15°C$ تلزم من أجل تبريد كتلة $200\,g$ من الزئبق ذو درجة حرارة $80°C$ إلى الدرجة $25°C$، إذا علمت أن الحرارة النوعية للزئبق هي $0.033\,cal/g\,°C$.

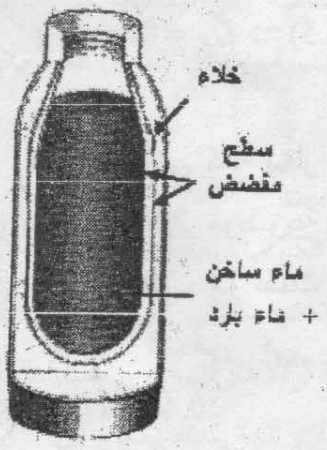
الحل: بحسب قانون انحفاظ الطاقة تكون كمية الحرارة التي يجب أن يفقدها الزئبق مساوية إلى كمية الحرارة التي يجب أن يكتسبها الماء؛ أي:

$$c_1 m_1(\theta_M - \theta_1) = c_2 m_2(\theta_2 - \theta_M)$$

حيث m_1 هي أقل كتلة ماء تلزم لتبريد الزئبق لدرجة الحرارة $25°C$، و c_1 هي الحرارة النوعية للماء، و θ_1 هي درجة الحرارة الابتدائية للماء، و θ_M هي درجة الحرارة التعادل النهائية للزئبق والماء. m_2 هي كتلة الزئبق، و c_2 هي الحرارة النوعية للزئبق، و θ_2 هي درجة حرارة الزئبق الابتدائية. وبالتعويض ينتج:

$$1 m_1(25-15) = 0.033 \times 200(80-25) \Rightarrow m_1 = 36.3\,g$$

مسألة (٤.٢): أضيف $100\,g$ من الماء الساخن إلى $200\,g$ من ماء بارد درجة حرارته $10°C$ موجود في قارورة ديوار، فكانت درجة الحرارة النهائية للمزيج $25°C$، كم كانت درجة حرارة الماء الساخن المضاف؟



الشكل (٤.٨أ): مشهد مقطعي في قارورة ديوار التي تستخدم كحافظة للبرودة أو السخونة.

الحل: بحسب قانون انحفاظ الطاقة، يفقد الماء الساخن كمية من الحرارة تساوي كمية الحرارة التي يكتسبها الماء البارد.

لنفرض أن m_1 هي كتلة الماء الساخن، و m_2 هي كتلة الماء البارد، و θ_1 هي درجة حرارة الماء الساخن، و θ_2 هي درجة حرارة الماء البارد، θ_M هي درجة حرارة التعادل المزيج، عندئذ يكون:

$$1 m_1(\theta_1 - \theta_M) = 1 m_2(\theta_M - \theta_2)$$

حيث أن الحرارة النوعية للماء تساوي إلى $1cal/g\,^{\circ}C$.

إذن بتعويض القيم العددية نجد:

$$100(\theta_1 - 25) = 200(25 - 10) \Rightarrow \theta_1 = 55^{\circ}C$$

مسألة (٤.٣): أضيفت قطعة جليد درجة حرارتها $0^{\circ}C$ وكتلتها $40g$ إلى $250g$ ماء درجة حرارته $25^{\circ}C$ موجود في قارورة ديوار، فكانت درجة حرارة التعادل النهائية للمزيج $10.5^{\circ}C$. احسب الحرارة الكامنة لانصهار الجليد.

الحل: إن كمية الحرارة التي اكتسبها الجليد لينصهر متحولاً من جليد في درجة الحرارة $0^{\circ}C$ إلى ماء عند درجة الحرارة $0^{\circ}C$ ثم ليسخن حتى درجة حرارة التعادل تساوي كمية الحرارة التي يفقدها الماء لكي يبرد من درجة الحرارة $25^{\circ}C$ حتى درجة حرارة التعادل:

$$L_f m_1 + c_1 m_1(\theta_M - 0) = c_1 m_2(\theta_1 - \theta_M)$$

حيث m_1 هي كتلة الجليد المضاف، c_1 الحرارة النوعية للماء، و m_2 هي كتلة الماء، و L_f هي الحرارة الكامنة لانصهار الجليد، و θ_1 هي درجة حرارة الماء قبل إضافة الجليد إليه، و θ_M هي درجة حرارة التعادل النهائية.

وبالتعويض نجد:

$$L_f 40 + 1\times 40(10.5 - 0) = 1\times 250(25 - 10.5) \Rightarrow L_f = 80cal/g$$

مسألة (٤.٤): ما هي كتلة بخار الماء ذو درجة الحرارة $120^{\circ}C$ اللازمة لتسخين قطعة النحاس كتلتها $200g$ موضوعة في مسعر من الألمنيوم كتلته $60g$ من درجة الحرارة $30^{\circ}C$ حتى $70^{\circ}C$. إذا علمت أن الحرارة الكامنة لتبخر الماء هي $539cal/g$، وأن الحرارة النوعية للنحاس هي $0.093cal/g\,^{\circ}C$ وللألمنيوم هي $0.21cal/g\,^{\circ}C$، وللبخار $0.46cal/g\,^{\circ}C$.

الحل: إن كمية الحرارة التي يفقدها بخار الماء حتى يبرد من درجة الحرارة $120^{\circ}C$ إلى درجة حرارة التكاثف $100^{\circ}C$ ثم ليتكاثف إلى ماء عند درجة الحرارة $100^{\circ}C$ ثم ليبرد حتى درجة حرارة التعادل يجب أن تساوي كمية الحرارة التي يكتسبها مسعر الألمنيوم وقطع النحاس ليسخنا من درجة الحرارة $30^{\circ}C$ حتى درجة حرارة التعادل.

بفرض أن m هي كتلة البخار، و θ_1 هي درجة حرارة البخار الابتدائية، و $\theta_2 = 100^{\circ}C$ هي درجة حرارة البخار عند التكاثف، و θ_M هي درجة حرارة التعادل النهائية ، و θ هي

درجة الحرارة الابتدائية لمسعر الألمنيوم وقطع النحاس و L_v هي الحرارة النوعية للبخار و c هي الحرارة الكامنة للتبخر

و(c): الحرارة النوعية للماء، وعليه يكون:

$$c\,m(\theta_1 - \theta_2) + L_v\,m + c\,m(\theta_2 - \theta_M) = c_{Cu}\,m_{Cu}(\theta_M - \theta) + c_{Al}\,m_{Al}(\theta_M - \theta)$$

$$0.46\,m(120 - 100) + 500m + 1m(100 - 70)$$

$$0.093 \times 200(70 - 30) + 0.21 \times 60(70 - 30) \Rightarrow m = 2.76\,g$$

وبالتعويض نجد

٢.٤.ب. الطاقة الداخلية

تتكون **الطاقة الكلية** E لجسم من طاقتين هما الطاقة الحركية E_K، والطاقة الكامنة E_P. وتتكون **الطاقة الحركية** من طاقتين هما الطاقة الحركية الداخلية E_{Kin}، والطاقة الحركية خارجية E_{Kout}. وكذلك تتكون **الطاقة الكامنة** من طاقتين هما طاقة كامنة داخلية E_{Pin} وطاقة كامنة خارجية E_{Pout}. وتتكون الطاقة الكامنة الداخلية E_{Pin} بالنسبة لغاز حقيقي من طاقة كامنة فيما بين الجزيئات المستقلة $(E_{Pin})_1$ وطاقة كامنة مختزنة في الجزيئات ذاتها $(E_{Pin})_2$.

- **الطاقة الحركية الداخلية** E_{Kin} هي الطاقة الحركية العشوائية لجزيئات الغاز ذات المنشأ الحراري.
- **الطاقة الحركية الخارجية** E_{Kout} هي الطاقة الحركية التي تكتسبها جزيئات الغاز عندما تخضع لحقل خارجي كحقل الجاذبية الأرضية، وحقل القوى الكهربائية، وحقل القوى المغناطيسية.
- **الطاقة الكامنة الداخلية** E_{Pin} هي طاقة الترابط فيما بين جزيئات الغاز المستقلة $(E_{Pin})_1$ وطاقة ترابط مكونات الجزيئات ذاتها $(E_{Pin})_2$.
- **الطاقة الكامنة الخارجية** E_{Pout} وهي الطاقة الكامنة التي تكتسبها جزيئات الغاز عندما تخضع لحقل خارجي كحقل الجاذبية الأرضية، وحقل القوى الكهربائية، وحقل القوى المغناطيسية.

$$E = E_{out} + E_{in} = E_{Kout} + E_{Pout} + E_{Kin} + (E_{Pin})_1 + (E_{Pin})_2$$

تعرف **الطاقة الداخلية** لجملة غازية بأنها الطاقة الكلية الداخلية للجملة الغازية؛ أي مجمل الطاقة الداخلية المتعلقة بمكوناتها كالذرات والجزيئات، بالتالي فهي تتضمن كل من الطاقة الحركية الحرارية للجزيئات (الانسحابية والدورانية والاهتزازية)، والطاقة الكامنة فيما بين الجزيئات المستقلة والطاقة الكامنة المختزنة في مكونات الجزيئات ذاتها؛ أي:

$$E_{in} = E_{Kin} + (E_{Pin})_1 + (E_{Pin})_2$$

وهذا لا يمكن أن يتحقق إلا إذا كانت الجملة الغازية **معزولة عن الحقول الخارجية**؛ أي لا تؤثر عليها حقول القوى الخارجية، عندئذ فقط يكون $E_{Kout} = 0$ و $E_{Pout} = 0$.

إذا كان الغاز المدروس هو **غاز مثالي**، فإنه من ناحية أولى تكون قوى التأثير المتبادل فيما بين الجزيئات المستقلة مهملة؛ أي $(E_{Pin})_1 = 0$، ومن ناحية أخرى يُنظر إلى الجزيئة كنقطة مادية، وعندئذ لا يصبح للحديث عن قوى التأثير المتبادل بين مكوناتها أي معنى؛ أي $(E_{Pin})_2 = 0$، وبالتالي يكون:

الباب السادس

الضـــوء

٦.١. نبذة تاريخية

إنّ أوّل من فكر في طبيعة الضوء هم الفلاسفة اليونان مثل بطليموس وإقليدس، حيث ارتبطت أفكارهم بتفسير عملية الإحساس البصري بأنه يحدث من شيء، كقرون الاستشعار يصدر من العين حتى إذا وقع على الجسم أحسّت به العين. ظلّ هذا الاعتقاد سائداً حتى ظهور الحسن بن الهيثم (*965-1040*) الذي نقض بعض فرضيات اليونانيين في كتابه المناظر ويقول فيه "**إن الإبصار يكون بخروج الضوء من الجسم المنير أو المستنير ووقوعه على العين**"، كما درس انعكاس الضوء عن المرايا وانكسار ونفوذ الضوء في العدسات.

بعد ذلك ظهر العالم اسحق نيوتن (*Newton*) في الفترة (*1643-1727*) الذي استطاع تفسير تحلل ضوء الشمس عند مروره في موشور زجاجي ثلاثي القاعدة إلى عدد من الأشعة الملونة على شكل طيف مستمر. أمّا نظرية نيوتن في طبيعة الضوء وتفسير حوادثه فقد كانت أولى النظريات التي اتصفت بالواقعية واقترنت بالتجارب العملية، وقد عبرت عن الضوء بأنه تدفق جسيمات غاية في الصغر من المواد المشعة تتحرك بسرعة كبيرة، فعندما تقع على العين تحدث الإحساس بالضوء، أطلق على هذه النظرية اسم النظرية الجسيمية، استطاع نيوتن بالاستناد إلى هذه النظرية أن يعلل انتشار الضوء في خطوط مستقيمة كما شرح انعكاس وانكسار الضوء، إلا أنه انتهى إلى نتيجة خاطئة هي أن سرعة الضوء في الماء والزجاج أكبر من سرعة الضوء في الهواء.

عجزت نظرية نيوتن عن تفسير كثير من الظواهر الضوئية مثل التداخل والانعراج والاستقطاب، وهذا أدى إلى ظهور نظريات أخرى تستطيع تفسير جميع ظواهر الضوء المعروفة في ذلك الزمن مثل النظرية الموجية التي وصفها هويغنـــز (*Huygens*) في الفترة ما بين (*1629-1695*) وهي تعتبر أن الضوء عبارة عن حركة موجية تنتقل بسرعة ثابتة في الأوساط الشفافة المتماثلة المناحي، وهذا يعني أن انتشار الضوء مثل انتشار موجات الصوت في الأوساط المرنة، ولأنه كان معروفاً أن الصوت لا ينتشر إلا بوجود المادة لذا وجب على هويغنـــز لتفسير انتشار الضوء في الفضاء؛ أي بين الكواكب والنجوم، افتراض وجود مادة تملأ الكون بفراغاته وتتصف بمرونة عالية لتنتشر فيها الاهتزازات الصادرة عن الجزيئات المضيئة، سميّت هذه المادة بالأثير ولكن استحال إثبات وجود هذه المادة، فسّرت هذه

النظرية تشكل الألوان في الصفائح الرقيقة وفي فقاعات الصابون (التداخل). ولكن شهرة العالم نيوتن وقفت عقبة أمام تطور هذه النظرية التي صاغها، أي نيوتن عام (*1678*)م، واستطاع بواسطتها أن يفسر إنكسار وانعكاس الضوء وكان العالم الروسي لومانوسف (*lomonosov*) أحد المناصرين لهذه النظرية، وذلك بربط الحركة الاهتزازية الضوئية بحركة جزيئات المادة.

لم تستطع النظرية الموجية لهويغنـــز من تفسير الانتشار المستقيم للضوء وما تبع ذلك من تشكل الظلال الهندسية مما زاد من سيطرة النظرية الجسيمية في تلك الفترة ولم تحصل النظرية الموجية على الاعتراف العام حتى عام (*1803*) حيث قدّم العالم يونغ (*Young*) في العام (*1801*) برهاناً يوضح بأن الأشعة الضوئية تستطيع التداخل مع بعضها مثل الأمواج الصوتية. قام فرينل (*Frenel*) عام (*1815*) بعدة تجارب حول التداخل والانعراج ووضع النظرية الموجية بقالب رياضي وبرهن أن الانتشار المستقيم للضوء ما هو إلا نتيجة لصغر طول موجته.

ثم طوّر هذه النظرية كثير من العلماء الفيزيائيين مثل فراونهوفر (*Fraunhover*)، ومايكلسون (*Michelson*) الذي صمم جهازاً لقياس تداخل الضوء، وكوشي (*Kochi*)، وكيرشوف (*Kirchoff*) الذي وضع نظرية دقيقة لانعراج الضوء. وكان أهم دعم لهذه النظرية قياس سرعة الضوء في الماء من قبل العالم فوكو (*Foucut*) ووجد أنها أقل من سرعة الضوء في الهواء. وفي عام (*1860*) أثبت ماكسويل (*Maxwel*) نظرياً أن الأمواج الكهرطيسية يجب أن تنتقل بسرعة الضوء لأن الضوء المرئي هو عبارة عن موجات كهرطيسية تتراوح أطوالها من (*760nm*) وحتى (*400 nm*) في الوقت الذي أثبت فيه هرتز (*1886*) تجريبياً صحة نظرية ماكسويل، حيث استطاع توليد أمواج كهرطيسية وكشفها بطريقة كهربائية، أدى اكتشاف هرتز للأمواج الكهرطيسية في الخلاء إلى زوال افتراض وجود الأثير.

فسّرت النظرية الكهرطيسية الكثير من الظواهر الضوئية ولكنها وقفت عاجزة أمام الفعل الكهرضوئي الذي اكتشفه هرتز عام (*1888*) وطيف إشعاع العناصر الكيميائية وإصدار الجسم الأسود.

عام (*1900*) درس العالم لينار (*Leanar*) المفعول الكهرضوئي ووجد أن الضوء الساقط على سطح معدن يحرر إلكترونات لا ترتبط طاقة كل منها بكثافة الضوء الساقط، وهي نتيجة غير متوقعة لأن كثافة الضوء ما هي إلا الطاقة التي تسقط على وحدة السطح خلال ثانية واحدة.

في عام (*1900*) وضع العالم بلانك (*Plank*) نظريته الكوانتية التي تعتبر أن إشعاع

وامتصاص الطاقة الكهرطيسية لا يتم بشكل مستمر كما هو الحال في النظرية الكهرطيسية، وإنما يتم بشكل متقطع على شكل وجبات منفصلة سماها الكمّات الضوئية.

وفي عام (*1905*) تقدم العالم أينشتاين (***Einstein***) بنظريته النسبية حيث اعتبر أن الكمّات ليست وجبات منفصلة من الطاقة الكهرطيسية فحسب وإنما هي جسيمات ضوئية موزعة على كامل الموجة سماها الفوتونات (***Photons***) تملك طاقة محددة تتناسب مع تردد الموجة υ:

طاقة الفوتون $E = h\upsilon$

حيث إن: $(h = 6.62 \times 10^{-34} J\,\text{sec})$ ثابت بلانك.

تتميز الفوتونات بأنها تتحرك بسرعة الضوء لا غيرها. بهذا تبدو النظرية الكوانتية امتداداً للنظرية الجسيمية وبالوقت نفسه هي متممة للنظرية الموجية ووجودهما معاً يؤكد الحقيقة التالية:

يتميز الضوء بطبيعة مزدوجة موجية وجسيمية في آنٍ واحد، وتسلك الفوتونات سلوكاً موجياً خلال انتشار الضوء من نقطة إلى أخرى.

٦.٢. المبادئ الأساسية في الضوء الهندسي

يقسم الضوء استناداً إلى المفاهيم التي ظهرت خلال التجارب التي درست الظواهر الضوئية والأسس النظرية لتفسيرها إلى ثلاثة أقسام رئيسية:

1- الضوء الهندسي.

2- الضوء الفيزيائي.

3- الضوء الكمي والكوانتي.

يتم تفسير الظواهر الضوئية المختلفة بنظريات متباينة ولكنها تتم بعضها البعض. فعلى سبيل المثال، حادثتا التداخل والحيود تفسران على أساس النظرية الموجية للضوء وباستخدام هذه النظرية يمكن حل معظم مسائل الضوء في الأوساط المتجانسة وغير المتجانسة، لكن في كثير من المجالات الهامة التطبيقية، كالحصول على الحزم الضوئية وتشكيل الأخيلة وتعيين مواقعها وأبعادها في مختلف الأدوات والأجهزة الضوئية يمكن استخدام الضوء الهندسي الذي يعتمد في الأساس على مفهوم الأشعة الضوئية، التي تخضع في انتشارها لقانوني الانعكاس والانكسار المعروفين.

يمكن القول إن الضوء الهندسي يتناول دراسة جميع الظواهر الضوئية التي تعتمد على المبادئ الثلاثة التالية:

- 64 -

يمكن القول أن الضوء المرئي يتناول جميع الظواهر الضوئية التي تعتمد على المبادئ الثلاثة التالية:

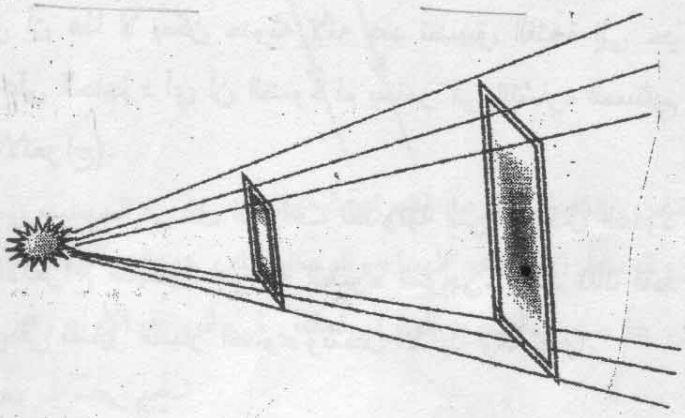
1- مبدأ الانتشار المستقيم للضوء.

2- مبدأ استقلالية الحزم الضوئية.

3- قانونا الانعكاس والانكسار.

٦.٢.١. مبدأ الانتشار المستقيم للضوء

ينتشر الضوء في الأوساط المتجانسة المتماثلة المناحي بشكل مستقيم، ويمكن إثبات ذلك تجريبياً من خلال تشكل الظلال الهندسية للأجسام الموضوعة في طريق حزمة ضوئية، الشكل (٦.١). وهذا المبدأ يبقى صحيحاً ما لم تظهر حادثة الانعراج (الحيود).



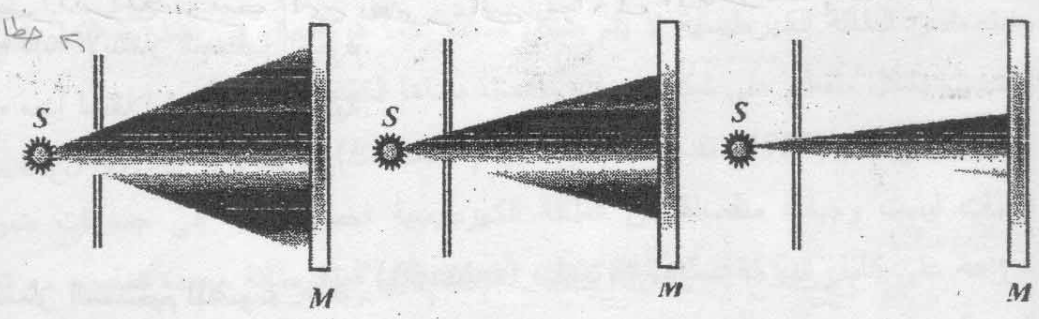
الشكل (٦.١): الانتشار المستقيم للضوء.

٦.٢.٢. استقلالية الحزم الضوئية

يمكن تقسيم الحزم الضوئية إلى حزم أضيق ويكون تأثير كل جزء مستقل عن تأثير الأخرى؛ أي أن انتشار حزمة ضوئية في وسط ما لا يرتبط بوجود حزم ضوئية أخرى تنتشر فيه، فالحزمة الضوئية المارة خلال أي جزء من الفراغ تخرج منه بذاتها دون تغيير حتى ولو كان ذلك الجزء من الفراغ ممتلئاً بالضوء.

يبقى مبدأ استقلالية الحزم الضوئية صحيحاً ما لم تظهر حادثة التداخل. بينما مبدأ الانتشار المستقيم للضوء يبقى محققاً ما لم تحدث ظاهرة الانعراج (الحيود)، ويمكن توضيح ذلك بالتجربة التالية:

ليكن المنبع الضوئي S والشاشة M. ولنضع بينهما حاجز معتم يحوي فتحة دائرية متغيرة (حظار آلة التصوير) يمكن الحصول على حزم ضوئية ضيقة بجعل الفتحة في الحاجز صغيرة، وكلما كانت الفتحة في الحاجز أضيق حصلنا على حزمة ضوئية أضيق، الشكل (٦.٢).



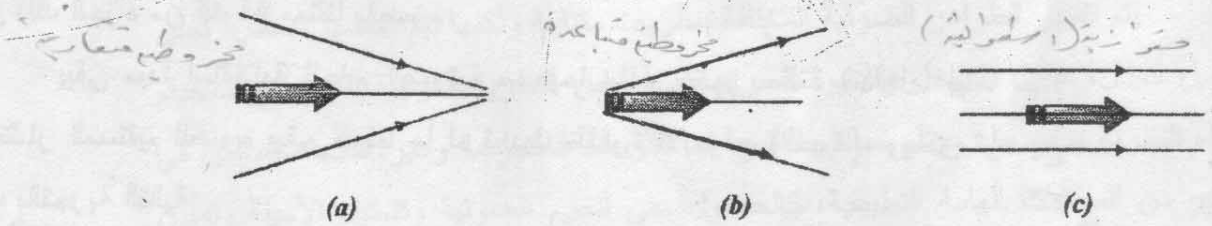
الشكل (٦.٢): آلية الحصول على حزمة ضوئية ضيقة، استحالة الحصول على شعاع ضوئي وحيد بسبب حدوث ظاهرة الانعراج عند الشقوق الضيقة جداً.

ويمكن أن نتصور بأن استمرار تضييق الفتحة يمكننا من الحصول على شعاع وحيد من الضوء، لكن التجربة تدل على أن هذا لا يمكن حدوثه لأنه عند تضييق الفتحة إلى حدٍ معين ينشأ اتساع في بقعة الضوء على الحاجز؛ أي أن الضوء لم يستمر في انتشاره المستقيم بعد الفتحة وحدثت ظاهرة الحيود (الانعراج).

تعتبر قوانين الضوء الهندسي صحيحة في كل الحوادث الضوئية التي لا تطال الحدود الموافقة لظهور حادثتي التداخل والانعراج التابعتين لدراسة الضوء الموجي، وعند ذلك فقط يجوز تطبيق مبادئ الضوء الهندسي في تفسير انتشار الضوء وتشكل الأخيلة وما تبعها.

- الشعاع الضوئي والحزم الضوئية:

الشعاع الضوئي: هو المستقيم الذي ينتشر وفقه الضوء وهو مفهوم رياضي لا يمكن الحصول عليه تجريبياً. أما الحزمة الضوئية: فهي عبارة عن مجموعة من الأشعة الضوئية، فإذا تلاقت الأشعة الضوئية في نقطة واحدة تكون الحزمة مخروطية متقاربة، كما في الشكل (**a**.٦.٣)، أما إذا انطلقت من نقطة واحدة فتكون مخروطية متباعدة، الموضحة في (**b**.٦.٣). وإذا كانت الأشعة متوازية تكون الحزمة أسطوانية أو متوازية (**c**.٦.٣).

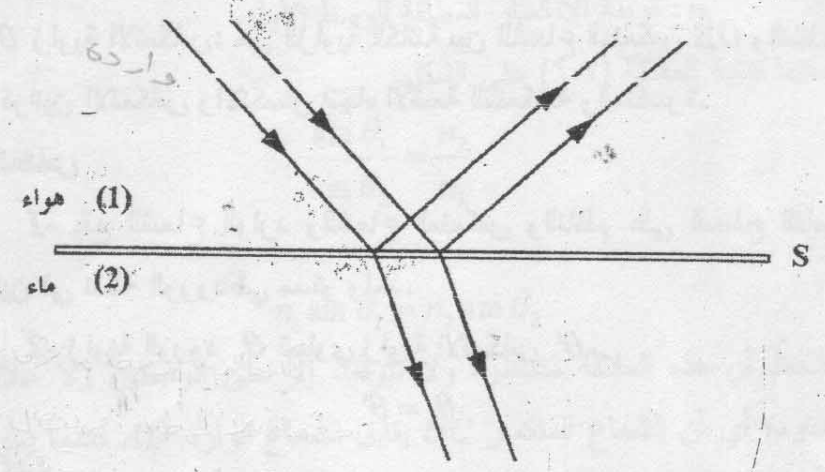


الشكل (٦.٣): أنواع الحزم الضوئية؛ *a* مخروطية متقاربة، *b* مخروطية متباعدة، *c* أسطوانية أو متوازية.

٦.٢.٣. قوانين الانعكاس والانكسار

يسمح انتشار الضوء بشكل مستقيم في وسط متجانس باستخدام الأشعة الضوئية في وصف انتشار الضوء في الوسط المتجانس.

ليكن لدينا وسطان شفافان متجانسان ومتماثلا الخصائص في مختلف الاتجاهات يفصل بينهما سطح صقيل S، ونفرض أن حزمة (متوازية) من الضوء تسمى الحزمة الواردة تسقط على السطح كما في الشكل (٦.٤).

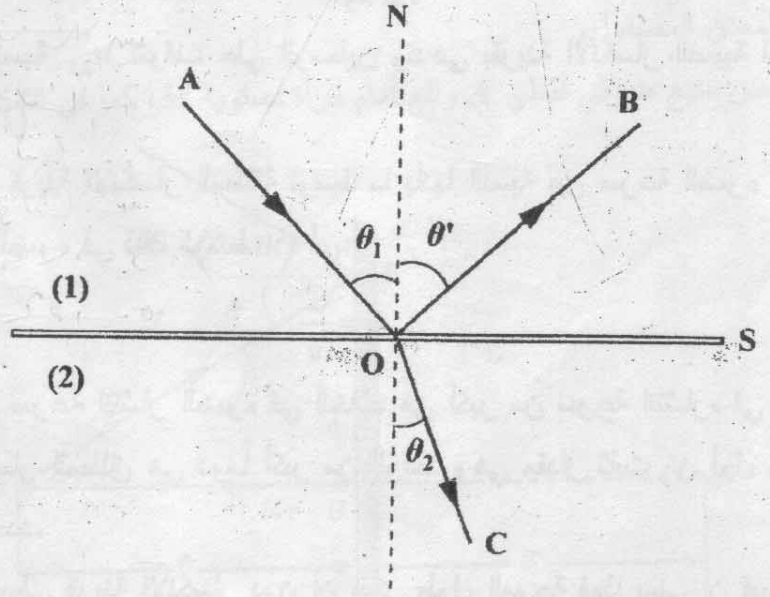


الشكل (٦.٤): انعكاس وانكسار الحزمة الضوئية المتوازية.

فرضنا أن الوسط الأول هو الهواء والوسط الثاني هو الماء.

نلاحظ أن جزء من الضوء الوارد ينعكس في الوسط الأول وجزء ينفذ منكسراً إلى الوسط الثاني.

من الأسهل تمثيل الحزمة الضوئية بشعاع وحيد يدل على منحى واتجاه انتشار الضوء كما في الشكل (٦.٥).



الشكل (٦.٥): تمثيل الانعكاس والانكسار بشعاع ضوئي وحيد من أجل التبسيط.

تتحدد اتجاهات الحزمة الضوئية الواردة والمنعكسة والمنكسرة بالزاوية التي يصنعها الشعاع الضوئي مع العمود على السطح الفاصل بين وسطين في نقطة سقوط الحزمة عليه

ON (الناظم) كما يلي:

θ_1 زاوية الورود: هي الزاوية الكائنة بين الشعاع الوارد AO والناظم ON.

θ_2 زاوية الانكسار: هي الزاوية التي يصنعها الشعاع المنكسر OC مع الناظم ON.

θ' زاوية الانعكاس: هي الزاوية الكائنة بين الشعاع المنعكس OB والناظم ON.

تحدد قوانين الانعكاس والانكسار اتجاه الأشعة المنعكسة والمنكسرة.

a- قانونا الانعكاس

1- يقع الشعاع الوارد والشعاع المنعكس والناظم على السطح الفاصل بين الوسطين في نقطة الورود في مستوٍ واحد.

2- زاوية الورود θ_1 تساوي زاوية الانعكاس θ'.

$$\theta_1 = \theta' \qquad (٦.١)$$

b- قانونا الانكسار

1- يقع الشعاع الوارد والشعاع المنكسر والناظم على السطح الفاصل بين الوسطين في نقطة الورود في مستوٍ واحد، الشكل (٦.٥).

2- عندما يرد ضوء وحيد اللون على الحد الفاصل بين أي وسطين *(1)* و*(2)* فإن نسبة جيب زاوية الورود θ_1 إلى جيب زاوية الانكسار θ_2 تبقى ثابتة.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = n_{2,1} \qquad (٦.٢)$$

وهذه النسبة $n_{2,1}$ تتوقف على الوسطين وتدعى بقرينة الانكسار النسبية للوسط *(2)* بالنسبة للوسط *(1)*.

ونعرّف قرينة الانكسار المطلقة لوسط ما بأنها النسبة بين سرعة الضوء في الخلاء C إلى سرعة الضوء في ذلك الوسط v؛ أي:

$$n = \frac{C}{v} \qquad (٦.٣)$$

وبما أن سرعة انتشار الضوء في الخلاء هي أكبر من سرعة انتشاره في أي وسط، فإن قرينة الانكسار المطلق هي دوماً أكبر من الواحد وهي مقدار ثابت من أجل مادة معينة وطول موجة محدد.

عندما تعطى قرينة الانكسار دون أن يذكر طول الموجة فهذا يعني أن قيمتها معطاة بالنسبة للضوء الأصفر الذي يقع في منتصف الطيف المرئي تقريباً.

- يمكن كتابة قرينة الانكسار النسبية على الشكل التالي:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (٦.٤)$$

حيث إن: n_2 : قرينة الانكسار المطلقة للوسط الثاني.

n_1 : قرينة الإنكسار المطلقة للوسط الأول.

يمكننا كتابة العلاقة (٦.٢) على الشكل:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

أو:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (٦.٥)$$

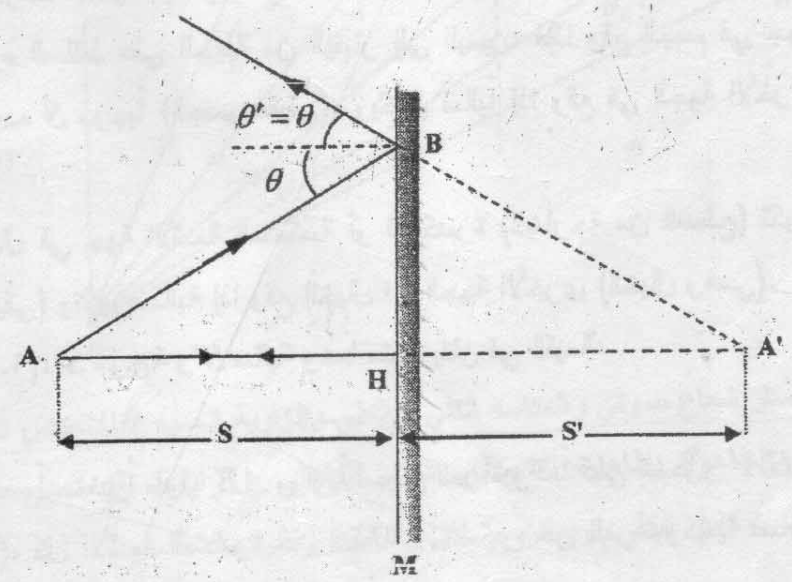
نلاحظ أن هذه العلاقة متناظرة ولا تتوقف إلا على الوسطين ولا علاقة لها بجهة انتشار الضوء؛ أي أن الشعاع المنكسر OC يقابل الشعاع الوارد AO عندما يمر الضوء من الوسط الأول إلى الوسط الثاني الشكل (٦.٥)، وبالعكس عندما يسير الضوء من الوسط الثاني وفق CO فإنه ينفذ إلى الوسط الأول وفق AO وهذه النتيجة تعبر عن مبدأ رجوع الضوء.

٦.٣. الانعكاس والانكسار على السطوح المستوية

٦.٣.١. الانعكاس على السطوح المستوية (المرآة المستوية)

المرآة المستوية: هي كل سطح مستوٍ عاكس للضوء، مثل سطح الماء والزجاج المستوي والمعدن المصقول.

لنفرض منبع ضوئي نقطي A واقع أمام مرآة مستوية M، كما في الشكل (٦.٦).

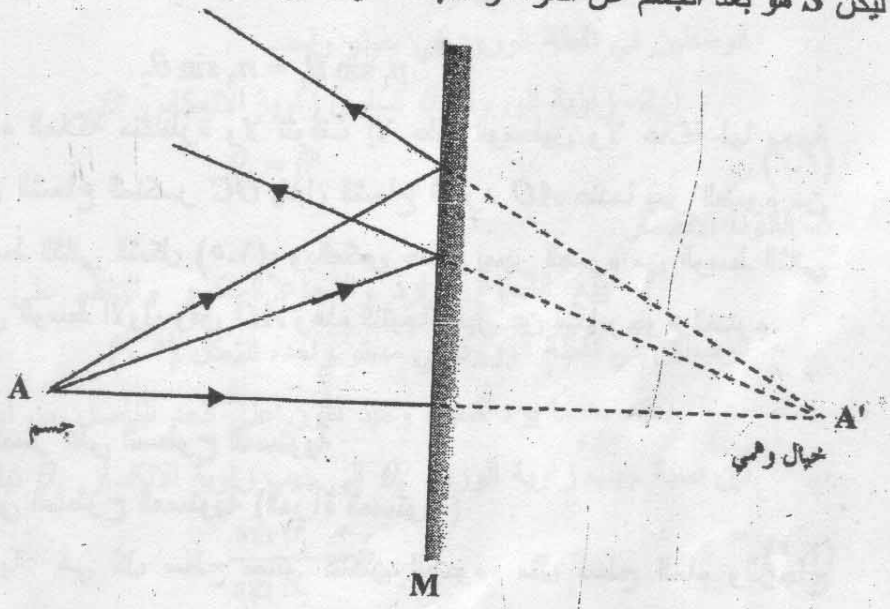


الشكل (٦.٦): انعكاس شعاع ضوئي يرد ناظمياً على مرآة مستوية وآخر يرد بزاوية ما θ.

الشعاع AH الذي يرد إلى المرآة بصورة ناظمية (زاوية الورود تساوي الصفر) ينعكس على نفسه. والشعاع AB الذي يرد بزاوية θ ينعكس بزاوية $\theta'=\theta$. تلتقي محددات الأشعة المنعكسة في نقطة وحيدة A'، كما تلتقي جميع محددات الأشعة المنعكسة في النقطة A' التي تدعى بالخيال الوهمي للنقطة A، إن A, A' متناظرتان بالنسبة إلى سطح المرآة، الشكل (٦.٧).

هذا يعني أنه إذا وضع جسم أمام مرآة سيتشكل لكل نقطة منه خيال نقطي مشابه تماماً وهذا الخيال هو نظير الجسم بالنسبة لمستوي المرآة.

ليكن S هو بُعد الجسم عن المرآة وS' بُعد الخيال عن المرآة.



الشكل (٦.٧): الخيال الوهمي المتشكل لجسم نقطي في مرآة مستوية.

يلزم لمتابعة الدراسة تحديد الإشارة التي تسبق كل من S وS'، لذلك نفرض ما يلي:

إن جهة الضوء الساقط على الجملة من اليسار إلى اليمين، فإذا وقع الجسم في جهة الأشعة الواردة كان بعده S موجباً (الجسم حقيقي)، ويكون سالباً إذا وقع في الجهة الأخرى (الجسم وهمي).

وإذا وقع الخيال في جهة الأشعة المنعكسة أو المنكسرة (الخارجة من السطح) تكون S' موجبة (الخيال حقيقي) وتكون سالبة إذا وقع الخيال في الجهة الأخرى (الخيال وهمي).

في الشكل (٦.٦)، S موجبة وS' سالبة وهما متساويتان في القيمة:

$$S=-S'$$

لنفرض أن جسماً صغيراً طوله AB موازياً لسطح المرآة واقعاً على المحور AHA'، كما في الشكل (٦.٨)، كل الأشعة الصادرة عن النقطة A تنعكس عن المرآة وكأنها صادرة

$$n\frac{MN}{S}=1.\frac{MN}{-S'}\Rightarrow S'=-\frac{S}{n} \qquad (٦.١١)$$

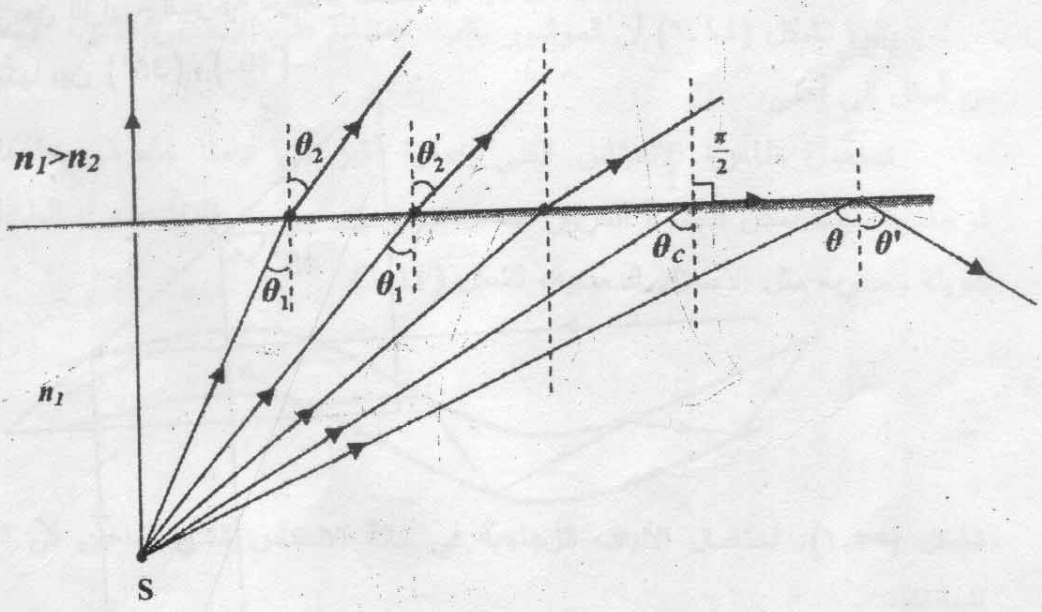
أي أن الناظر يرى الجسم أقرب إلى السطح ومقدار الانزياح **d** هو:

$$d=|S|-|S'|$$

$$d=S-\frac{S}{n}=S(1-\frac{1}{n}) \qquad (٦.١٢)$$

٦.٣.٤. الانكسار الكلي- الزاوية الحرجة

عند ورود حزمة من الضوء من وسط قرينة انكساره n_1 إلى وسط قرينة انكساره n_2 حيث $(n_1 > n_2)$ فإن الحزمة الضوئية المنكسرة تبتعد عن الناظم وتكون زاوية الانكسار θ_2 أكبر من زاوية الورود θ_1. وعند زيادة زاوية الورود تزداد بالمقابل زاوية الانكسار حتى تصل زاوية الورود إلى قيمة معينة $\theta_1=\theta_c$ تسمى بالزاوية الحرجة أو الحدية وتكون من أجلها زاوية الانكسار $\theta_2=\frac{\pi}{2}$، ولكن عند زيادة زاوية الورود بمقدار صغير عن θ_c، فإن الشعاع المنكسر يختفي ونلاحظ أن كل الضوء الوارد على السطح الفاصل ينعكس عنه كما لو كان ينعكس عن سطح صقيل، الشكل (٦.١٢).



الشكل (٦.١٢): انكسار شعاع ضوئي وانعكاسه الكلي الداخلي والزاوية الحدية θ_c للانعكاس الكلي.

تدعى هذه الظاهرة بظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي والزاوية θ_c تدعى بالزاوية الحرجة أو الحدية للانعكاس الكلي، ويمكن حسابها ابتداءً من قانون الانكسار:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

$$n_1 \sin\theta_c = n_2 \sin\frac{\pi}{2}$$

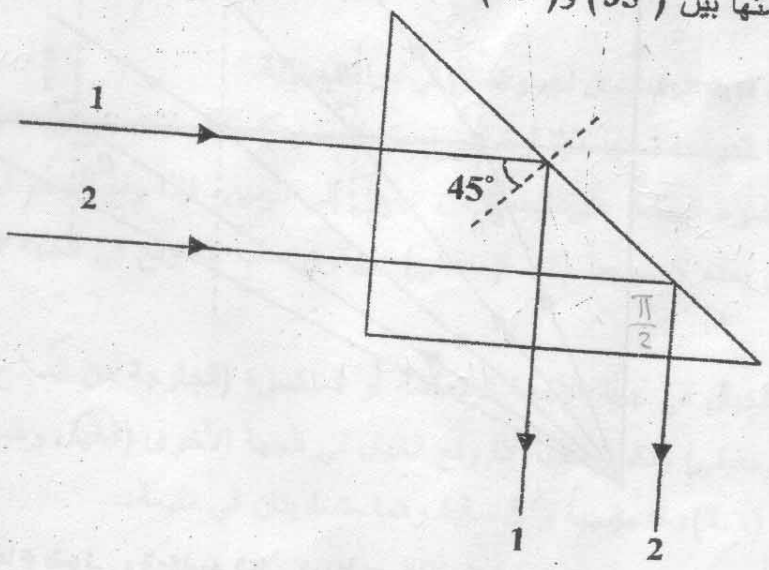
$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (٦.١٣)$$

العلاقة (٦.١٣) تعين قيمة الزاوية الحرجة θ_c من أجل $n_2 < n_1$.

تساعد هذه الخاصية على قياس قرينة الانكسار لمادة ما، وذلك بمقارنتها مع قرينة انكسار وسط آخر عرف كل من قرينة انكساره والزاوية الحرجة θ_c الخاصة به. وبالاعتماد على هذه الخاصية، صنعت أجهزة تقيس قرائن الانكسار مثل مقياس بولفريتش للانكسار ومقياس آبي للانكسار.

تستعمل خاصية الانعكاس الكلي الداخلي في المواشير الزجاجية بغية حرف الأشعة الضوئية بزاوية محددة. يستعمل لهذه الغاية موشور قائم، مقطعه الأصلي مثلث متساوي الساقين.

عندما تسقط حزمة ضوئية متوازية على الوجه القائم الشكل (٦.١٣)، بصورة ناظمية تخترق أشعتها الزجاج دون أن تعاني أي انكسار، لتسقط على الوجه الوتري من الداخل بزاوية ($45°$) أكبر من الزاوية الحرجة للزجاج المستعمل، إذ أن الزاوية الحرجة لمعظم أنواع الزجاج تتراوح قيمتها بين ($35°$) و($40°$).



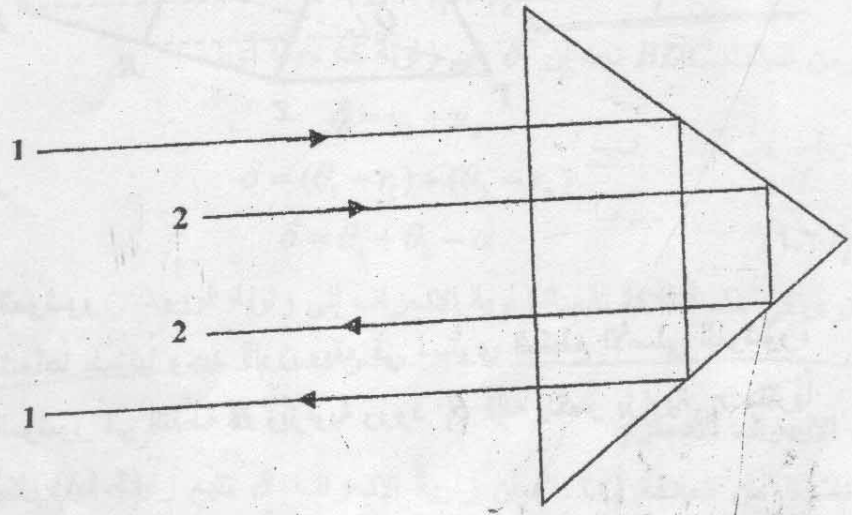
الشكل (٦.١٣): الانعكاس الكلي الداخلي في الموشور القائم.

لذا فإن الحزمة تنعكس كلياً على الوجه الوتري لتسقط عمودياً على الوجه القائم الثاني لتخرج متوازية دون أن تعاني انكساراً؛ أي أن الضوء قد انحرف عن مساره الأصلي بزاوية

قدرها $\frac{\pi}{2}$.

تستخدم مثل هذه المواشير في الأجهزة البصرية لتحل محل المرايا العاكسة إذ أن مقاومتها للمؤثرات الميكانيكية والكيميائية أكبر من المرايا.

تستعمل المواشير أيضاً في تقويم الأخيلة الضوئية كما في الشكل (٦.١٤).



الشكل (٦.١٤): استخدام الموشور في حالة الانعكاس الكلي الداخلي لتقويم الأخيلة الضوئية.

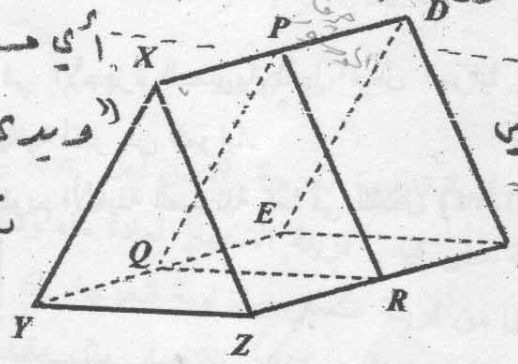
يبين الشكل (٦.١٤) أن الموشور يقلب، اعتماداً على الانعكاس الكلي، الأشعة الضوئية من أسفل إلى أعلى.

تستعمل ظاهرة الانعكاس الكلي بفعالية أكبر في أيامنا هذه في تطبيقات الألياف الزجاجية حيث يمكن للضوء المرور ضمن أنبوب زجاجي مع فقدان ضئيل للطاقة ولمسافات طويلة وملتوية مثل الأسلاك المعدنية، الشكل (٦.١٥)

الشكل (٦.١٥): استعمال الألياف الزجاجية في حالة الانعكاس الكلي الداخلي في النقل الضوئي للبيانات.

٦.٤. الانكسار في الصفيحة المتوازية الوجهين

الصفيحة المتوازية الوجهين هي عبارة عن سطحين مستويين متوازيين يحصران بينهما وسطاً شفافاً مغموراً في وسط شفاف آخر، مثل المكعب الزجاجي، متوازي المستطيلات وزجاج واجهات المحال التجارية، الشكل (٦.١٦).



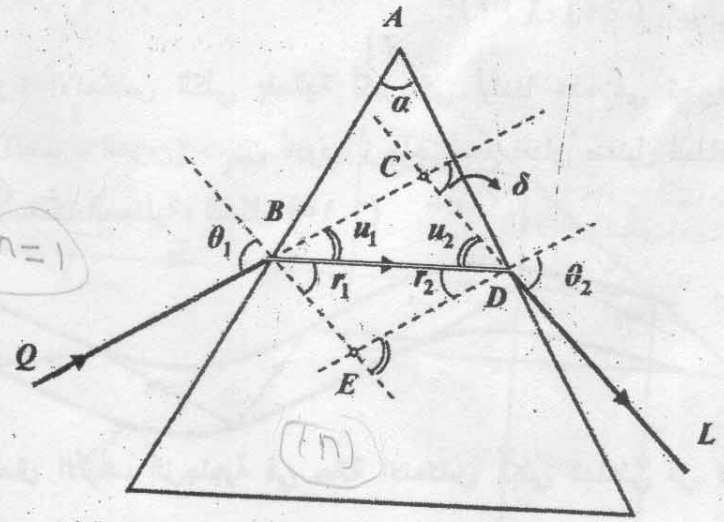
الشكل (٦.١٧): الموشور.

٦.٥.١. الانكسار في الموشور

لنفرض QB شعاعاً ضوئياً وحيد اللون ويقع في مستوي المقطع الأصلي للموشور، يرد على أحد وجهي الموشور في النقطة B وبزاوية ورود θ_1 فإنه ينكسر بزاوية r_1 مقترباً من الناظم، كما في الشكل (٦.١٨).

نكتب قانون الانكسار في النقطة B:

$$1.\sin\theta_1 = n\sin r_1$$



الشكل (٦.١٨): انكسار شعاع ضوئي في موشور، وزاوية انحراف الشعاع البارز.

يسير الشعاع الضوئي المنكسر ضمن الموشور من النقطة B إلى النقطة D حيث يعاني انكساراً ثانياً ويبرز من الموشور إلى الهواء بزاوية انكسار θ_2.

وفق قانون الانكسار نكتب:

$$1.\sin\theta_2 = n\sin r_2$$

إذاً فرضنا أن قرينة انكسار الموشور هي n وزاوية رأسه α وهو مغمور في الهواء، فإن زاوية الانحراف δ هي الزاوية الكائنة بين استقامة الشعاع الوارد واستقامة الشعاع البارز وتحسب كما يلي:

في المثلث BDE الشكل (٦.١٨) الزاوية E خارجية، تساوي زاوية رأس الموشور بالتعامد:

$$\alpha = E = r_1 + r_2$$

ومن المثلث BDC نجد أن δ هي زاوية خارجية؛ أي:

$$\delta = u_1 + u_2$$

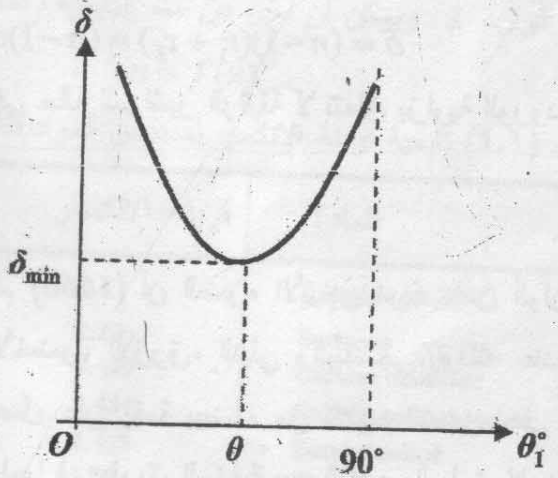
$$\delta = (\theta_1 - r_1) + (\theta_2 - r_2)$$

$$\delta = \theta_1 + \theta_2 - \alpha \qquad (٦.٢٠)$$

نرى في هذه العلاقة تابعية زاوية الانحراف إلى زاوية الورود.

٦.٥.٢. الانحراف الأصغري

نلاحظ من العلاقة (٦.٢٠) أن زاوية الانحراف δ تتبع زاوية الورود θ_1. وبالفعل عند تزايد زاوية الورود تتناقص زاوية الانحراف حتى تصل إلى قيمة صغرى δ_{min} تسمى بزاوية الانحراف الأصغري وبعد ذلك تزداد زاوية الانحراف بتزايد زاوية الورود. والشكل (٦.١٩) يوضح تغير زاوية الانحراف كتابع لزاوية الورود.

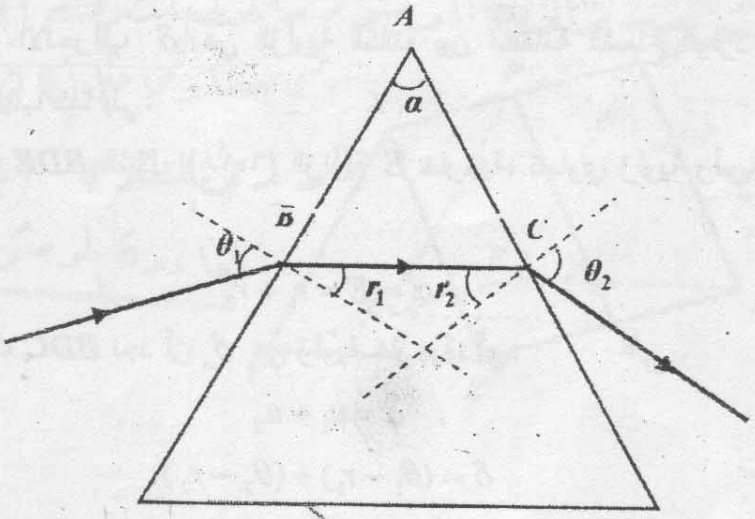


الشكل (٦.١٩): تابعية زاوية انحراف الشعاع البارز من الموشور لزاوية الورود، وزاوية الانحراف الأصغري.

تبلغ δ قيمة حدية (نهاية صغرى) عندما:

$$d(\delta) = 0 \Rightarrow d\theta_1 + d\theta_2 - d\alpha = 0$$

حيث n قرينة انكسار الموشور وهو مغمور في الهواء.



الشكل (٦.٢٠): الانحراف في الموشور الرقيق.

وبما أن الزوايا $r_2, \theta_2, r_1, \theta_1$ هي زوايا صغيرة فإن:

$$\theta_1 = nr_1 \quad , \quad \theta_2 = nr_2$$

وبما أن زاوية الانحراف في الموشور تعطى بالعلاقة:

$$\delta = \theta_1 + \theta_2 - \alpha$$

فإن العلاقة التي تعطي زاوية الانحراف في المواشير الرقيقة تصبح:

$$\delta = nr_1 + nr_2 - (r_1 + r_2)$$

$$= n(r_1 + r_2) - (r_1 + r_2)$$

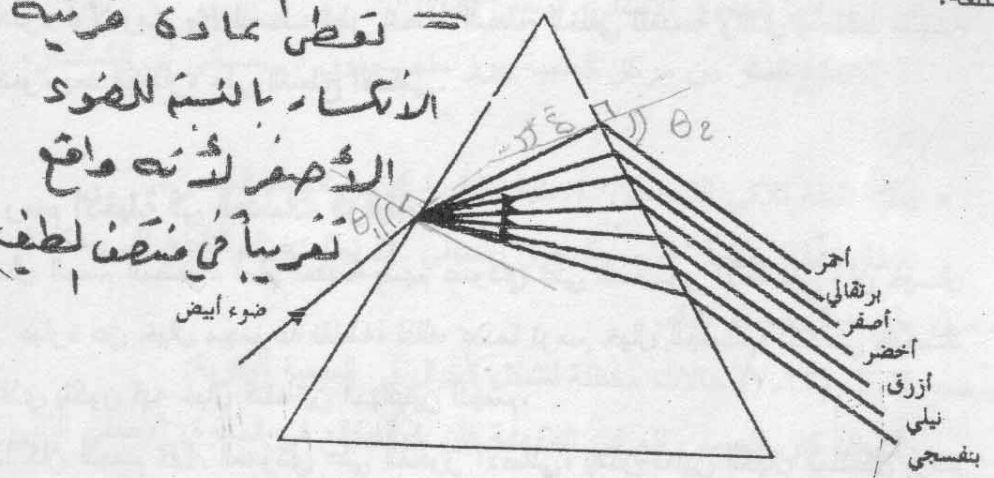
$$\delta = (n-1)(r_1 + r_2) = (n-1)\alpha \qquad (٦.٢٥)$$

أي أن قيمة الانحراف في حالة المواشير الرقيقة لا تتعلق بزاوية الورود الصغيرة.

٦.٧. تبدد الضوء في الموشور

اكتشف نيوتن في العام (*1666*) أن الضوء الأبيض مركب من ألوان مختلفة هي: الأحمر، البرتقالي، الأصفر، الأخضر، الأزرق، النيلي والبنفسجي.) وذلك عندما مرر ضوء الشمس خلال ثقب صغير وحصل على بقعة بيضاء من ضوء الشمس على حاجز أبيض. ولكن عندما وضع موشوراً زجاجياً في طريق الحزمة بين الثقب والحاجز لاحظ وجود سلسلة من البقع الملونة وعددها سبعة مكان البقعة البيضاء. وبفصل أحد الألوان عن البقعة برهن نيوتن أن الألوان نفسها لا تتغير نتيجة الانكسار خلال الموشور وإنما فقط الضوء الأبيض هو الذي يمكن تحليله إلى ألوان الطيف السبعة، وتدعى عملية فصل الألوان بواسطة الموشور بالتبدد.

الأشعة الحمراء هي أقل الأشعة انحرافاً، وأشدها انحرافاً هي الأشعة فوق البنفسجية، الشكل (٦.٢١)، بالرغم من أن زاوية الورود في الهواء على الموشور هي نفسها، نجد زوايا البروز مختلفة.



الشكل (٦.٢١): ظاهرة التبدد اللوني للضوء في الموشور.

هذا يعني أن قرائن الانكسار تختلف بحسب قيم زوايا الانكسار (البروز) لأي لون من الألوان السابقة، وهذا يتبع طول موجة الضوء، لأن الضوء الأبيض يعتبر ضوءاً مركباً يحتوي على أطوال موجية مختلفة، لا تنكسر بنفس الزاوية على السطوح الفاصلة بين الأوساط الشفافة.

نستنتج مما تقدم أن تبدد الضوء ظاهرة تعكس تابعية قرينة الانكسار المطلقة للمادة n لطول موجة الضوء الوارد λ. ويمكن أن نعبر عن هذه التابعية بالعلاقة التالية:

$$n = f(\lambda)$$

يبين الجدول (٦.١) تابعية قرينة الانكسار لعدد من المواد لطول موجة الضوء.

المادة	قرينة الانكسار	المادة	قرينة الانكسار
Solids at 20°C		*Liquids at 20°C*	
Cubic zirconia	2.20	Benzene	1.501
Diamond (C)	2.419	Carbon disulfide	1.628
Fluorite (CaF_2)	1.434	Carbon tetrachloride	1.461
Fused quartz (SiO_2)	1.458	Ethyl alcohol	1.361
Gallium phosphide	3.50	Glycerin	1.473
Glass, crown	1.52	Water	1.333
Glass, flint	1.66		
Ice (H_2O)	1.309	*Gases at 0°C, 1 atm*	
Polystyrene	1.49	Air	1.000 293
Sodium chloride (NaCl)	1.544	Carbon dioxide	1.000 45

الجدول (٦.١): تابعية قرينة الانكسار لطول موجة الضوء.

الضوء المنكسر من العدسة وسالباً إذا وقع مركز الانحناء في الجهة الأخرى (جهة الضوء الساقط).

يرمز عادة بـ R_1 لنصف قطر انحناء السطح الأمامي للعدسة الذي يسقط عليه الضوء أولاً وبـ R_2 لنصف قطر انحناء السطح الخلفي للعدسة والذي يَسقط عليه الضوء بعد انكساره على السطح الأمامي.

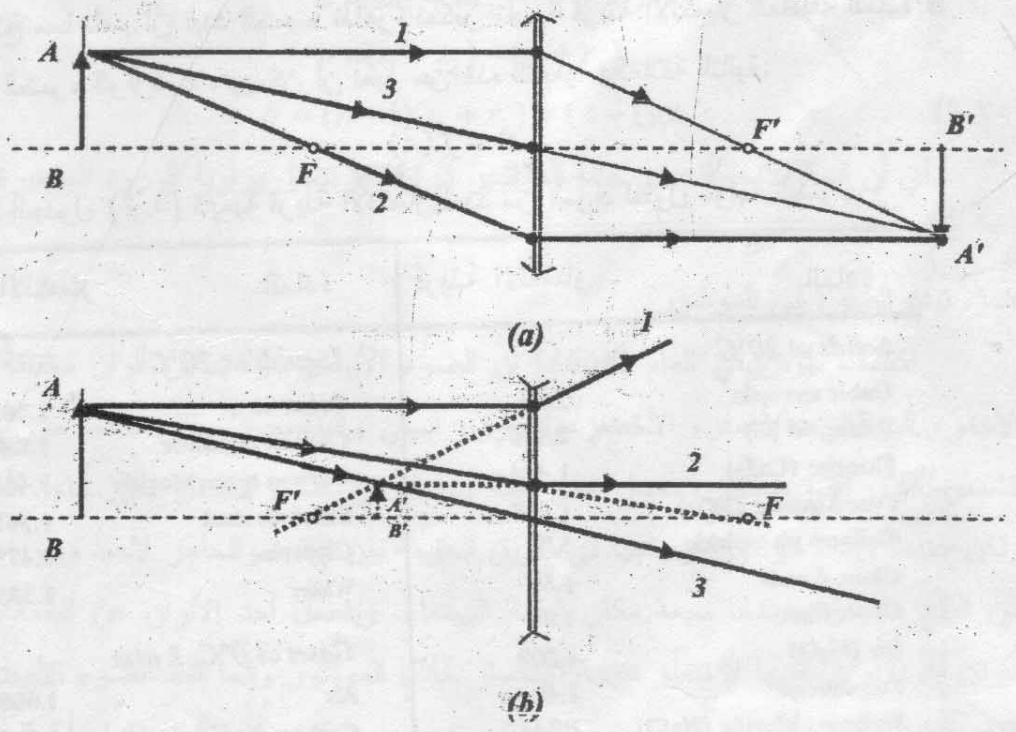
٧.٣.٣. رسم الأخيلة في العدسات الرقيقة

نمثل الجسم المضيء أمام العدسة بسهم عمودي على المحور الأصلي وإن خيال الجسم هو عبارة عن خيال مجموعة نقاطه، لذلك عندما نرسم خيال الجسم، نكتفي بإيجاد الموضع الذي يتكون فيه خيال النقطتين النهائيتين للجسم.

إذا كان الجسم AB العمودي على المحور الأصلي، يمكن تعيين الخيال المتشكل برسم أي شعاعين من الأشعة التالية:

1- الشعاع الوارد على العدسة والموازي للمحور الأصلي ينكسر مساراً من المحرق الثاني للعدسة المقربة ، الشكل (*a*٧.١٢).

أما في حال العدسة المبعدة فإن ممدده يمر من المحرق الثاني، الشكل (*b*٧.١٢)، الشعاع (*1*).



الشكل (٧.١٢): رسم الأخيلة في العدسات المقربة والمبعدة.

2- الشعاع الوارد المار من المحرق الأول للعدسة المقربة ينكسر موازياً للمحور الأصلي، أما في العدسة المبعدة فإن ممدد الشعاع الوارد يمر من المحرق الأول فينكسر موازياً للمحور الأصلي، الشعاع (2).

3- الشعاع المار من مركز العدسة يبرز منها دون أن يعاني أي انكسار، الشعاع (3).

تمثل نقطة تلاقي الشعاعين A' خيال النقطة A من الجسم المضيء.

نقطة تقاطع مسقط A' مع المحور الأصلي B' تمثل خيال النقطة B. وهكذا نحصل على خيال الجسم AB.

يوضح الشكل (٧.١٣) حالات مختلفة لتشكل الخيال في العدسة المقربة:

1- إذا كان الجسم واقع في اللانهاية فإن خياله يقع في المحرق الأصلي الثاني للعدسة (٧.١٣a).

أما إذا وقع الجسم في المحرق فإن خياله يكون كبيراً ويقع في اللانهاية (٧.١٣b).

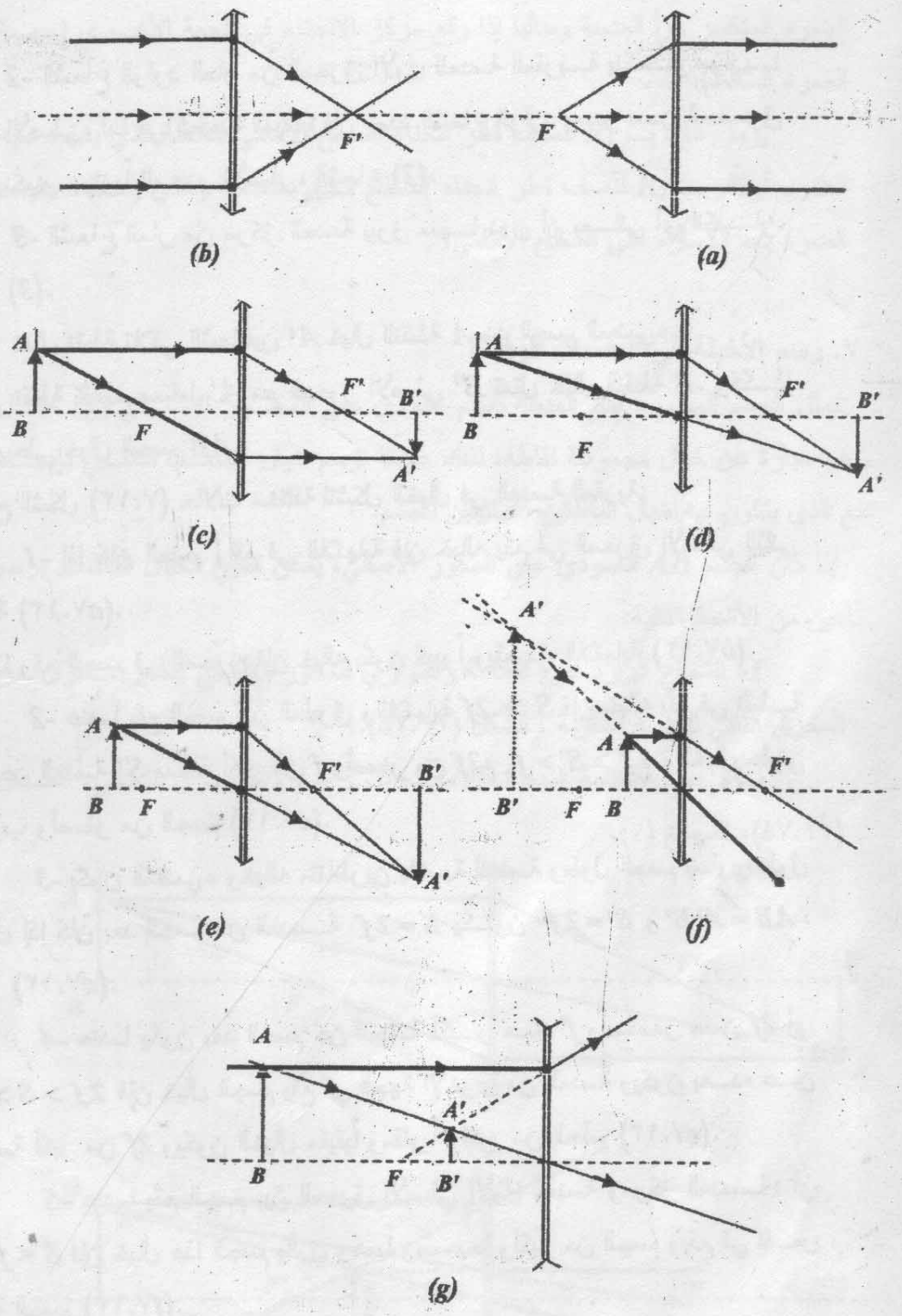
2- عندما يقع الجسم بين المحرق واللانهاية $S > 2f$ فإن خياله يقع في نقطة تبعد عن العدسة S' مسافة أكبر من f وأصغر من $2f$، $2f > S' > f$ والخيال حقيقي ومقلوب وأصغر من الجسم (٧.١٣c).

3- يكون المضيء وخياله متناظرين بالنسبة للعدسة وطول الجسم يساوي طول الخيال إذا كان بعد الجسم عن العدسة $S = 2f$ يكون $S' = 2f$ و $AB = A'B'$، انظر (٧.١٣d).

4- عندما يكون بعد الجسم عن العدسة أكبر من f وأصغر من $2f$ أي $f < S < 2f$ فإن خيال الجسم يقع في الجهة الأخرى من العدسة ويكون بعده عن العدسة أكبر من $2f$ ويكون الخيال حقيقياً ومقلوباً وأكبر من الجسم (٧.١٣e).

5- عندما يقع الجسم بين المحرق الأصلي الأول للعدسة ومركز العدسة؛ أي أن $S < f$ فإن خيال هذا الجسم يكون وهمياً وصحيحاً وأكبر من الجسم ويقع في نفس جهة الجسم (٧.١٣f).

6- تشكل العدسة الرقيقة المبعدة للجسم المضيء دائماً خيالاً وهمياً أصغر من الجسم وبعده عن العدسة يكون دائماً أصغر من بعد الجسم عنها أي $S > S'$ ويتحرك الجسم المضيء وخياله في اتجاه واحد مقتربين أو مبتعدين عن العدسة (٧.١٣g).



الشكل (٧.١٣): حالات مختلفة لتشكل الخيال في العدسة المقربة.

٧.٣.٤. قانون العدسات الرقيقة

قانون العدسات هو علاقة رياضية تربط بعد الجسم المضيء S وبعد خياله S' بدلالة البعد المحرقي للعدسة.

الباب التاسع

مبادئ في توازن وتحريك السوائل

- مقدمة

توجد المادة في الطبيعة في أربع أشكال (أطوار)، هي الحالة الصلبة والسائلة والغازية والبلازما (البلازما). تحافظ المادة في حالة الأجسام الصلبة على الشكل والحجم الثابت، أما في حالة السائل فيملك حجم ثابت ويأخذ شكل الإناء الموجود فيه، أما الغازات فهي لا تملك حجماً أو شكلاً ثابتاً.

أما الحالة الرابعة وهي أكثر لحالات انتشاراً في الكون والتي اكتشفت في القرن العشرين تمثل حالة غاز جزيئاته مؤينة مما يؤدي إلى ظهور قوى كهرومغناطيسية فيما بين المكونات كما أن تأثرها بالحقول الكهربائية والمغناطيسية الخارجية كبير بحيث لا يمكن وصفها بقوانين الغازات.

تكون المسافة بين الجزيئات في الحالة الصلبة أقل منها في بقية الحالات، بينما تكون في الحالة الغازية أكبر ما يمكن، لذلك يكون التأثير المتبادل بينها ضعيفاً جداً. وفي الحالة السائلة تكون المسافة بين الجزيئات قريبة من أبعاد الجزيئة نفسها، تتبادل جزيئات السائل التأثير فيما بينها بقوى تجاذب لأن المسافة بينها أصغر من نصف قطر التأثير الجزيئي. ويعرف نصف قطر التأثير (الفعل) الجزيئي بأنه المسافة التي بعدها يمكن إهمال التأثير المتبادل بين الجزيئات.

نعرف الكثافة ρ بأنها كتلة وحدة الحجوم: $\rho = \frac{m}{V}$. حيث m الكتلة، V الحجم.

وتقدر الكثافة في الجملة الدولية بـ kg/m^3 وفي الجملة السغثية بـ g/Cm^3 وترتبط الواحدتان بالعلاقة:

$$\frac{1kg}{m^3} = \frac{10^3 g}{10^6 Cm^3} = 10^{-3}\frac{g}{Cm^3}$$

تتبع كثافة المادة لدرجة حرارتها وللضغط المطبق عليها.

٩.١. الضغط في السائل المتوازن

الضغط بالتعريف هو القوة المؤثرة على وحدة السطح:

$$P=\frac{F}{A}$$

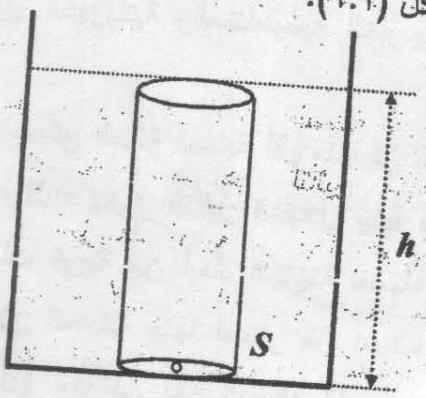
حيث: A مساحة السطح الخاضع للقوة الناظمية على السطح F.

يقدر الضغط في الجملة الدولية بوحدة تدعى الباسكال $Pa=\frac{N}{m^2}$ ويقدر بالضغط جو أو البار $bar=10^5 Pa$.

يؤثر السائل الساكن والمتوازن في جدار الوعاء الذي يحويه بقوة F تساوي القوة F' التي يؤثر بها الوعاء على السائل وهاتان القوتان بحسب مبدأ الفعل ورد الفعل متساويتان، وهذه القوى لها مركبة مماسية تؤدي إلى حركة السائل على طول جدار الإناء وهو مخالف للفرض لأن السائل ساكن ومتوازن.

أيضاً يكون الضغط متساوياً في كافة الاتجاهات في أية نقطة ضمن السائل.

لنفرض الآن العلاقة التي تربط بين ضغط السائل P في أية نقطة منه وبين بعد هذه النقطة عن سطح السائل h، الشكل (٩.١).



الشكل (٩.١): ضغط السائل على ارتفاع h.

إن الضغط في أية نقطة من السائل يرتبط بثقل عمود السائل؛ أي:

$$P=\frac{F}{S}=\frac{m.g}{S}$$

لكن:

$$\rho=\frac{m}{V}\Rightarrow m=V.\rho=S.h\rho$$

$$(V=S.h)$$

أي:

$$P=\frac{Sh\rho g}{S}=\rho g h \qquad (٩.١)$$

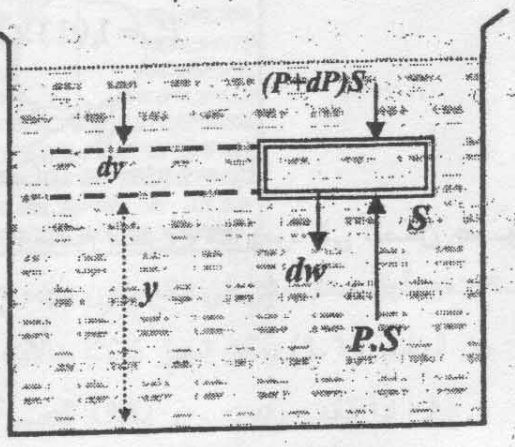
من العلاقة (٩.١) نجد أن الضغط في أية نقطة من السائل يتناسب مع كثافة السائل والعمق h.

أي أن الضغط ثابت في كافة نقاط السائل المتجانس والواقعة على نفس العمق h.

وينتج هذا الضغط عن السائل فقط.

أما إذا خضع سطح السائل لتأثير ضغط خارجي (الضغط الجوي مثلاً)، لنفرض سائل متجانس ولنحسب الضغط على ارتفاع y من قعر الإناء الذي يشغله السائل.

لندرس عنصر حجم من السائل مساحة سطحه S وارتفاعه dy ضمن سائل وعلى ارتفاع y من أسفل السائل (قعر الإناء)، الشكل (٩.٢).



الشكل (٩.٢): ضغط عنصر حجم من السائل مساحة سطحه S وارتفاعه dy ضمن سائل وعلى ارتفاع y من أسفل السائل.

بفرض أن الضغط الذي يؤثر على الوجه السفلي لعنصر الحجم (على ارتفاع y) باتجاه الأعلى هو P عند ذلك يؤثر على الوجه العلوي على ارتفاع $(y+dy)$ ضغط $(P+dP)$.

وبما أن هذا الجزء من السائل في حالة توازن فإن مجموع القوى المؤثرة عليه تكون معدومة؛ أي:

$$\sum F_y = 0 \qquad (٩.٢)$$

والقوى المؤثرة على عنصر الحجم من السائل هي:

1- قوة الثقل dw وهي موجهة باتجاه الأسفل: $dw = g.dm = g\rho.S.dy$

حيث ρ هي كثافة السائل.

2- قوة ضغط السائل التي يؤثر بها السائل أسفل الجزء المدروس وتكون موجهة باتجاه الأعلى وتساوي: $P.S$.

3- قوة ضغط السائل الموجود أعلى عنصر الحجم المدروس وموجهة باتجاه الأسفل وتساوي: $(P+dP)S$.

أما القوة على السطح الجانبي لعنصر الحجم فهي معدومة بسبب التناظر.

وبتطبيق العلاقة (٩.٢) نجد:

أي:

$$P = P_0 + \rho g h \qquad (٩.٥)$$

أي أن الضغط على عمق h من سطح السائل يساوي إلى الضغط المطبق على سطح السائل (الضغط الجوي) مضافاً إليه وزن عمود من السائل ارتفاعه h ومساحة قاعدته تساوي وحدة المساحة. وقيمة الضغط الجوي:

$$P_0 = 1{,}013 \times 10^5 \frac{N}{m^2} (Pa)$$

ويعطى الضغط الجوي بوحدات أخرى نذكر منها:

$$P_0 = 1atm = 76CmHg = 1{,}013bar$$

ينخفض الضغط الجوي كلما ارتفعنا عن سطح البحر، وهذا يعود إلى نقصان عمود الهواء كلما ارتفعنا عن سطح البحر.

٩.٢. مبدأ باسكال

ويعبر عنه كما يلي: إن الضغط المطبق على سائل في وعاء ينتقل إلى جميع نقاط السائل في جميع الاتجاهات وعلى جدران الوعاء بنفس المقدار.

فالضغط في أية نقطة على عمق h من سطح سائل مفتوح معرّض للضغط الجوي، العلاقة (٩.٥)، يساوي الضغط الجوي مضافاً إليه ضغط عمود من السائل ارتفاعه h، ولهذا المبدأ تطبيقات عملية كثيرة، مثل مكابح السيارات والروافع الهيدروليكية.

٩.٣. دافعة ارخميدس

تؤثر الموائع في الأجسام المغمورة فيها كلياً أو جزئياً بقوة عمودية جهتها إلى الأعلى.

وقد سميت هذه القوة بدافعة أرخميدس نسبةً إلى العالم أرخميدس أول من درس هذه الظاهرة.

يمكن إثبات مبدأ أرخميدس بتخيل جسم افتراضي حجمه (V) ساكن ضمن سائل.

إن مجموع القوى الخارجية المؤثرة في الجسم معدومة، الشكل (٩.٤).

$$\sum F_t = 0 \Rightarrow w - F_b = 0$$

$$w = F_b$$

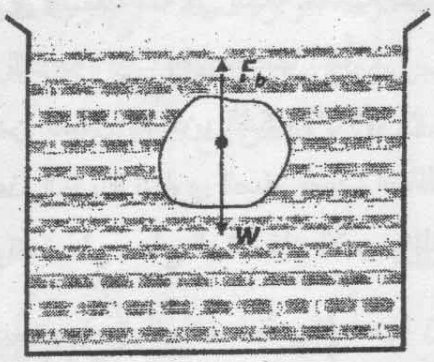
لكن:

$$\left.\begin{aligned} w &= m_s g = \rho_s V g \\ F_b &= m_f g = \rho_f V g \end{aligned}\right\} \qquad (٩.٦)$$

حيث إن: m_s و ρ_s: هي الكتلة والكثافة للجسم المغمور في السائل على الترتيب.

m_f: كتلة حجم من السائل يساوي حجم الجسم.

ρ_f: كثافة السائل.



الشكل (٩.٤): مَن أجل جسم ساكن في مائع يكون مجموع القوى الخارجية المؤثرة عليه معدوم.

- من العلاقة (٩.٦) يمكن تمييز ثلاث حالات:

1- إذا كانت $\rho_f < \rho_s$ (كثافة الجسم أصغر من كثافة السائل):

فإن الجسم ينساب ضمن السائل نحو الأسفل حتى يستقر في القاع لأن:

$$w > F_b$$

2- إذا كانت $\rho_f = \rho_s$:

يبقى الجسم في حالة سكون وعلى أي عمق لأن:

$$w = F_b$$

3- إذا كانت $\rho_f > \rho_s$:

فإن جزء من الجسم يكون مغموراً في السائل والجزء الباقي مغمور في الهواء ويكون:

$$F_b > w$$

٩.٤. التوتر السطحي

تملك جزيئات سطح السائل خواص تميزها عن بقية جزيئات السائل تدفع السائل كي يأخذ شكلاً محدداً يكون سطحه من أجل حجم محدد أصغرياً. لذا يمكن التصور بأن السائل محاط بغشاء مطاطي مرن ومشدود يسعى دوماً إلى ضغط السائل. لذلك تأخذ قطرات الماء الشكل الكروي الذي يكون سطحه أصغرياً من أجل حجم محدد.

لتفسير هذه الحالة نقارن بين الجزيئات السطحية والجزيئات في حجم السائل من حيث قوى التجاذب التي تخضع لها.

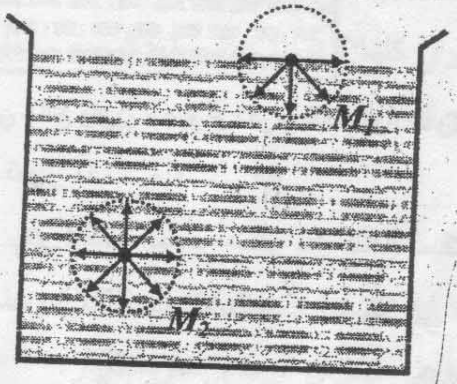
من المعروف أن جزيئات المادة تخضع لقوى تجاذب فيما بينها فتكون هذه القوى كبيرة في حالة الأجسام الصلبة وبالتالي يكون تغيّر شكلها صعباً.

وفي الحالة الغازية تكون هذه القوى ضعيفة جداً لذا ينتشر الغاز في أي حجم متاح له.

أما في الحالة السائلة فتكون هذه القوى أضعف منه في الحالة الصلبة بحيث يمكن بسهولة تغيير شكلها وأقوى بكثير من الحالة الغازية بحيث يبقى حجمها ثابتاً.

لنأخذ جزيئة M_2 واقعة ضمن السائل الساكن، الشكل (٩.٥). إن القيمة المتوسطة لمحصلة قوى الجذب المؤثرة على هذه الجزيئة تساوي الصفر بسبب التناظر.

أما بالنسبة للجزيئة M_1 الواقعة على سطح السائل فإن الأمر يختلف.



الشكل (٩.٥): التوتر السطحي، القوى المؤثرة على جزيئة في سائل ساكن.

نرسم حول الجزيئات M_1 , M_2 كرات الفعل الجزيئي بنصف قطر $r_m \approx 10^{-9} m$ يكون في النصف السفلي من كرة الفعل الجزيئي للجزيئة M_1 عدد كبير من الجزيئات تؤثر عليها بقوى تجاذب، بينما تحدها في النصف الآخر جزيئات الهواء التي تؤثر عليها بقوى تجاذب صغيرة تهمل عادةً.

أي أن الجزيئات الواقعة على السطح تخضع لقوة شد نحو داخل السائل عمودية على سطح السائل، وبما أن الحيز داخل السائل مشغول بجزيئات أخرى، لذا تحدث الطبقة السطحية ضغطاً على السائل يسمى الضغط الجزيئي.

يسمى هذا الفعل بالتوتر السطحي ويعرف بأنه القوة المؤثرة في وحدة الطول من سطح السائل بشكل موازٍ لهذا السطح.

يسمى هذا الفعل بالتوتر السطحي ويعبر عنه بـ γ (معامل التوتر السطحي) ويعرف بأنه القوة المؤثرة في وحدة الطول من سطح السائل وواحدتها هي:

$$\frac{N}{m} \quad \text{أو} \quad \frac{din}{Cm}$$

ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\gamma = \frac{F}{L}$$

يتبع معامل التوتر السطحي γ لدرجة حرارة السائل، فهو يتناقص بزيادة درجة الحرارة ويؤول إلى الصفر عند درجة حرارة معينة T_c (درجة الحرارة الحرجة).

في درجة الحرارة الحرجة يزول أي اختلاف بين الحالة السائلة والغازية.

تتعلق γ أيضاً بطبيعة سطوح التماس مع السائل.

٩.٥. التبلل- زاوية الحافة

إذا غمسنا قضيب من الزجاج في الماء نلاحظ أن قطرة من الماء تعلق به عند رفعه من الماء، وإذا غمسناه بالزئبق نلاحظ عند رفعه أنه خرج من الزئبق دون أن يعلق به شيء.

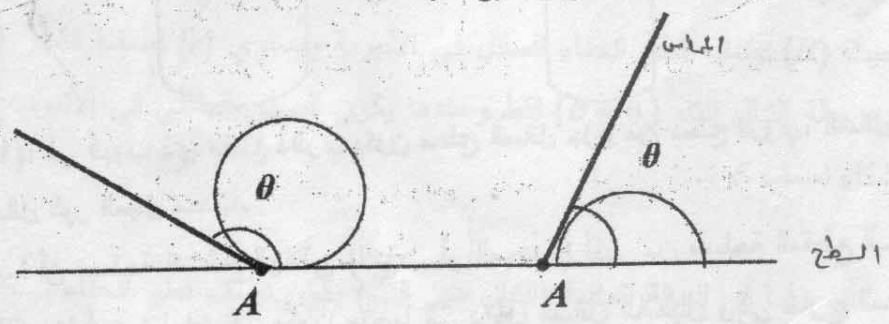
نقول إن الماء سائلٌ مبللٌ للزجاج والزئبق سائل غير مبللٍ للزجاج. ونفسر ذلك بأن جزيئات الماء تنجذب إلى جزيئات الزجاج بقوة أكبر من انجذابها لجزيئات الماء.

أما في حالة الزئبق تكون قوى التجاذب بين جزيئات السائل أكبر من قوى التجاذب بين جزيئات السائل والزجاج.

يمكن أن يكون السائل مبللاً لبعض المواد الصلبة وغير مبللاً لبعضها، فمثلاً الزئبق سائل يبلل النحاس والتوتياء، والماء غير مبلل للبارافين.

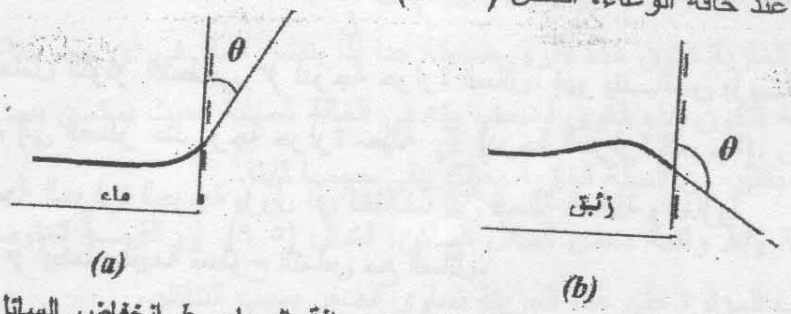
إذا وضعنا قطرتين من سائلين إحداهما مبلل (الماء) والآخر غير مبلل (زئبق) على صفيحة زجاجية أفقية فإن قطرة السائل المبلل تأخذ شكل قبة كروية أما قطرة السائل اللامبلل فتأخذ شكل الكرة تقريباً، الشكل (٩.٦).

نسمي الزاوية بين المماس في نقطة التماس A والسطح بزاوية الحافة ونرمز لها بالرمز θ، والسائل موجود دائماً داخل زاوية الحافة، وتكون زاوية الحافة للسوائل المبللة $\theta < 90^\circ$ وتكون $\theta > 90^\circ$ للسوائل غير المبللة.



الشكل (٩.٦): قطرة من سائل مبلل (ماء) على شكل قبة، وقطرة من سائل غير مبلل (زئبق) على شكل كرة.

يرتفع السائل المبلل عند حافة الوعاء الموجود فيه، شكل (٩.٧a)، بينما ينخفض السائل اللامبلل عند حافة الوعاء، الشكل (٩.٧b).



(a) (b)

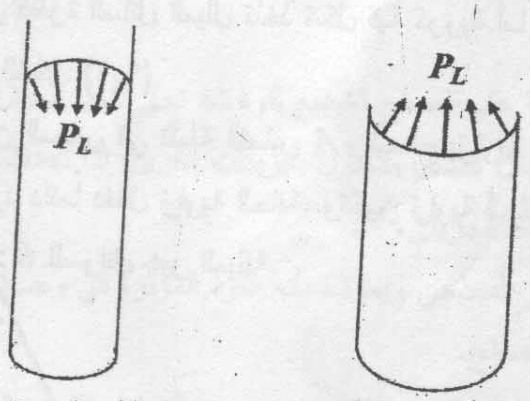
الشكل (٩.٧): a ارتفاع السائل المبلل (الماء) عند حافة الوعاء، b انخفاض السائل الغير مبلل (زئبق) عند حافة الوعاء.

يؤخذ عادة تجب زاوية الحافة ($cos\theta$) مقياساً للتبلل ويكون $\cos\theta > 1$ للسوائل المبللة و $\cos\theta < 1$ للسوائل غير المبللة وعندما يكون $\cos\theta = 1$ يكون السائل تام البلل، وفي هذه الحالة ينتشر السائل على سطح الجسم الصلب كله.

وفي حال اللاتبلل التام يكون $\cos\theta = -1$ تأخذ قطرة السائل في هذه الحالة الشكل الكروي التام.

يمكن ملاحظة انحناء سطح السائل عند حواف الوعاء، ونرى ذلك بشكل واضح في الأنابيب الضيقة حيث ينحني سطح السائل المكشوف بأكمله.

وفي حالة الأنابيب ذات المقطع الدائري يكون السطح عبارة عن جزء من سطح كروي ويكون السائل المبلل سطح هلالي مقعر وللسائل غير المبلل سطح هلالي محدب، الشكل (٩.٨).



الشكل (٩.٨): في أنبوب ذي مقطع دائري يكون سطح السائل جزء من سطح كروي، السائل المبلل مقعر، والسائل غير المبلل محدب.

وبما أن مساحة السطح الهلالي (المقعر أو المحدب) أكبر من مساحة المقطع الداخلي للأنبوب لذلك ينشأ ضغط إضافي يكون متجهاً إلى داخل السائل اللامبلل وإلى خارج السائل في حالة السائل المبلل، يسمى هذا الضغط بضغط لابلاس P_L وتعطى قيمته بالعلاقة التالية:

حيث $P_L = \frac{2\gamma}{R}$

R : نصف قطر انحناء السائل

P_L : ضغط لابلاس

$\gamma = \frac{F}{L}$ = معامل التوتر السطحي

L = وحدة الطول عمودياً على السائل المماس للسطح

$$P_L = \frac{2\gamma}{R} \qquad (٩.٧)$$

حيث: R نصف قطر انحناء السائل.

٩.٦. الخاصة الشعرية

إذا غمرنا طرف أنبوب شعري في إناء يحوي سائلاً مبللاً بشكل عمودي فإن هذا السائل سوف يندفع داخل الأنبوب الشعري إلى مستوى أعلى من مستوى السائل في الإناء وبقدر ما يكون الأنبوب الشعري أضيق يكون ارتفاع السائل أكبر.

ويفسر هذا بأن الضغط اللابلاسي (P_L) داخل الأنبوبة متجه نحو الأعلى، وهو الذي يجذب السائل إلى أعلى إلى أن يصبح معادلاً (P_h) الضغط الهيدروستاتيكي لعمود السائل في الأنبوبة الذي يكون ارتفاعه (h)، الشكل $(٩.٩a)$.

$$P_h = \rho.g.h$$

حيث إن: ρ : كثافة السائل. h: ارتفاع السائل في الأنبوب الشعري.

والضغط اللابلاسي:

$$P_L = \frac{2\gamma}{R}$$

وبما أن:

$$P_h = P_L$$

في حالة التوازن فإن:

$$\frac{2\gamma}{R} = \rho\, g\, h$$

أو:

$$\gamma = \frac{\rho\, g\, h R}{2}$$ معامل التوتر السطحي

حيث (R) نصف قطر انحناء السائل في الأنبوبة ويساوي (r) نصف القطر الداخلي للأنبوبة في حالة التبلل التام $(\theta = 0)$ فقط وعندها يكون السطح الهلالي في الأنبوب الشعري على شكل نصف كرة.

أما في الحالة العادية (التبلل غير التام) يكون نصف قطر انحناء السطح الهلالي:

$$R = \frac{2\gamma}{\rho g h}$$

طرائق المسح الجيولوجي:

مقدمة:

الطريقة الإنعكاسية في المسح السيزمي

إن الهدف من العمل السيزمي هو التعرف على بروفيل أو شكل السطوح الجيولوجية الفاصلة بين الطبقات المختلفة بقساوتها (ممانعتها الصوتية) ولحساب أعماق هذه الطبقات وزاوية ميلها في بعض الحالات ويمكن التعرف على نوعية الصخور بعد تحديد ومعرفة سرعة الموجة الصوتية السيزمية.

والمعروف أن الأمواج الصوتية الواصلة إلى سطح الأرض يكون لها صدى موجه وبالتالي يكون لها ثلاث مركبات (x,y,z) في الفراغ ثلاثي الأبعاد وفي معظم الدراسات الحالية يؤخذ فقط الحركة الشاقولية (z) والمرتبطة أساسا بالأمواج الطولية والمتوافقة مع معظم اللواقط المستخدمة.

وشكل الموجة يرتبط بشكل المنبع ، فالمنبع الكروي أو النقطي يولد أمواج كروية والمنبع الخطي (الحبلي) يولد أمواج مستوية وبالتالي فإن عناصر الدراسة السيزمية الرئيسية هي:

1- المنبع
2- وسط الانتشار
3- المستقبلات (اللواقط)

فالمنابع التفجيرية تتم باستخدام الرجاجات ، أما وسط الإنتشار حيث تنتشر الأمواج حاملة طاقة وتسير إلى السطوح الفاصلة بين الطبقات الجيولوجية المتفاوتة القساوة الصوتية(أو الممانعة الصوتية) والتي تقاس بحاصل جداء : [سرعة إنتشار الأمواج ضمن الصخر * كثافة الصخر نفسه] أي أن:

القساوة الصوتية (الممانعة) = $\rho * V$

فمن الأمواج ماهي منكسرة ومنها المنعكسة (موضوع الدراسة) حيث يتم التقاطها بلواقط زرعت خصيصا لذلك. والمعادلة الحركية للأمواج السيزمية المنعكسة هي من نوع القطع الزائد بالشكل التالي:

$$t = \frac{1}{V} * \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

وبتربيع الطرفين: $t^2 = \frac{1}{V^2}(x^2 + 4h^2) \quad \rightarrow \quad t^2V^2 = x^2 + 4h^2$

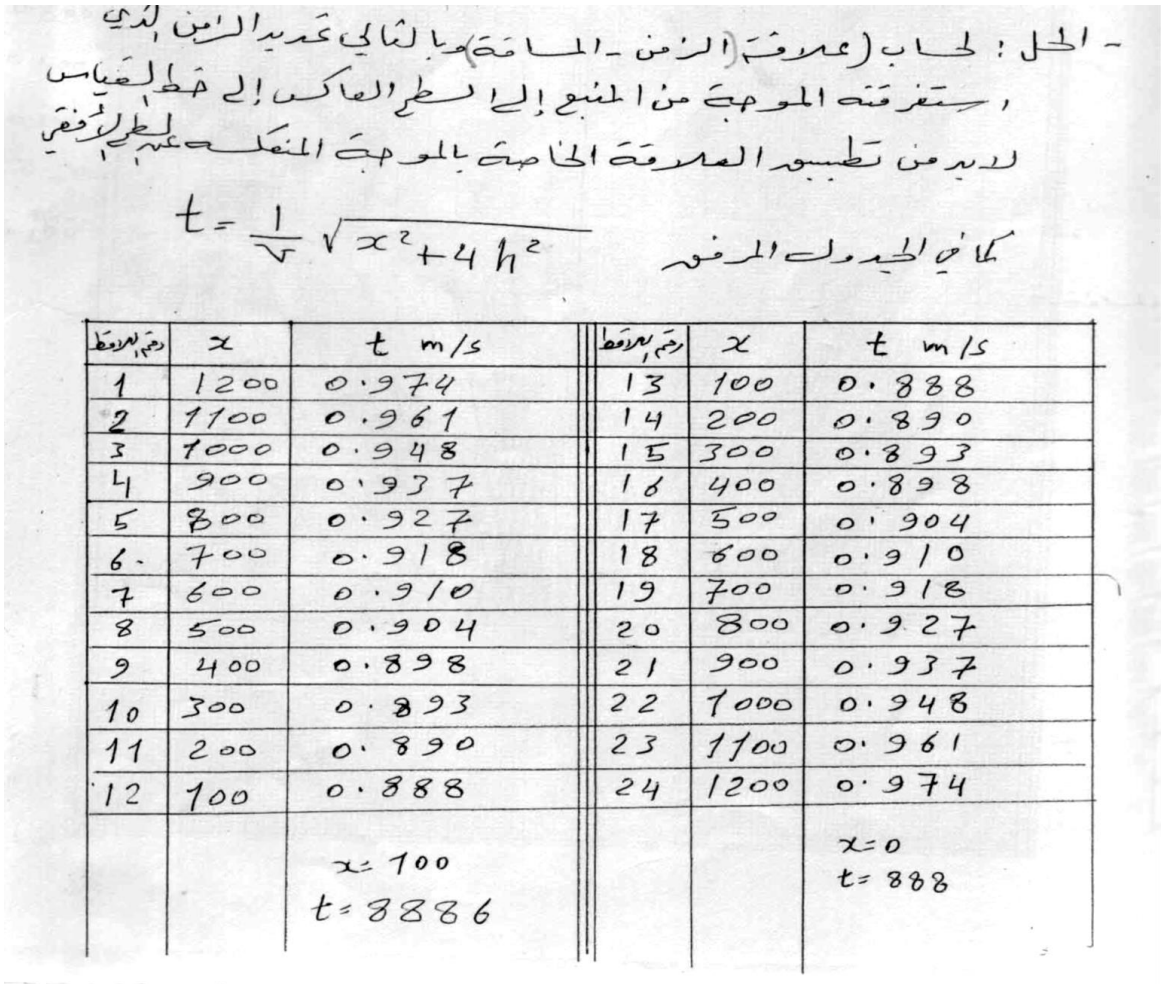
وهي معادلة القطع الزائد $\frac{t^2V^2}{4h^2} = \frac{x^2}{4h^2} + \frac{4h^2}{4h^2} \quad \rightarrow \frac{t^2V^2}{4h^2} - \frac{x^2}{4h^2} = 1$

ويمكن تنفيذ تطبيق عملي برسم علاقة (الزمن – المسافة) وتحديد شكلها (أي مسار الأمواج – المنعكسة والمنكسرة على خط القياس أو على سطح الأرض حيث أن علاقة (الزمن – المسافة) هي على شكل قطع زائد متناظر بالنسبة للمنبع.

تطبيق:

بهدف تحديد شكل السطح الفاصل بين ثخانتين الأولى مؤلفة من الحجر الكلسي وسرعة الموجة فيها (V=3000m/s) زأخرى مؤلفة من حجر رملي ولكي نتعرف على شكل المسار الناتج لوصول الموجة المنعكسة على هذا السطح الذي يتوضع على عمق (1332m) أسفل المنبع (منبع التفجير) استخدمنا خط قياس مركزي حيث توزعت اللواقط على طرفي هذا الخط وكان بعد اللاقط عن الآخر (100m) وعدد اللواقط 24 لاقط واستخدام منبع نقطي وضع في بئر حفر لعمق (12 متر) وملئ بالماء وبعد التفجير انتقلت الموجة منه إلى أن وصلت للسطح العاكس وعادت إلى خط القياس منعكسة من هذا السطح حيث تم تسجيلها والمطلوب:

1- ارسم بشكل مبسط موضع خط القياس موضحا عليه توضع المنبع واللواقط.
2- ارسم علاقة (الزمن – المسافة) أي مسار الموجة المنعكسة عن هذا السطح بمقياس أفقي (1سم لكل 200 متر) وشاقولي (1سم لكل 10 ميلي ثانية).
3- ماهي سماكة طبقة التجوية.
4- رسم الأشعة الموجية.
5- ارسم أشعة الموجة الواردة والمنعكسة في الوسط.

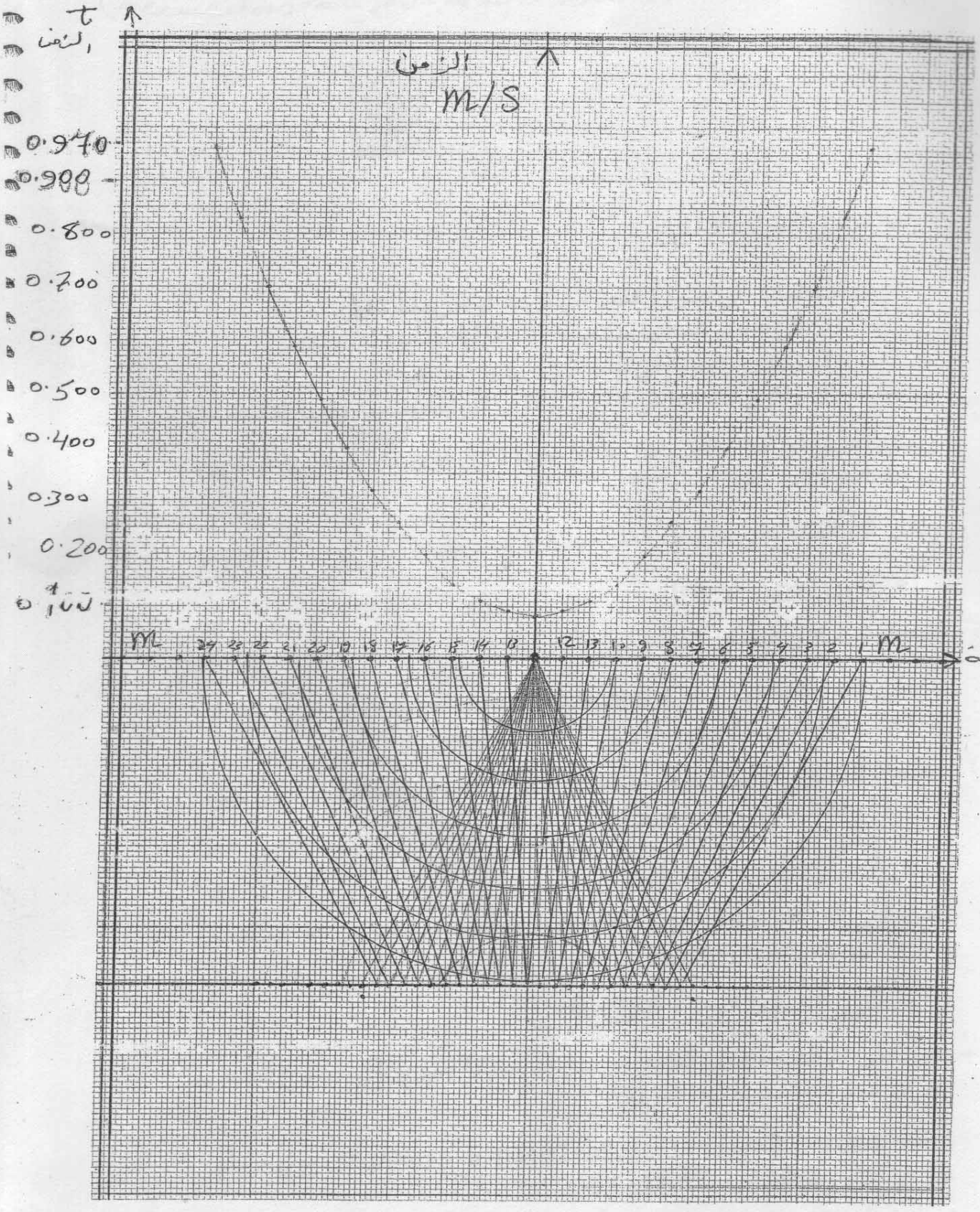


- الحل: لحساب (معرفة الزمن - المسافة) وبالتالي تحديد الزمن الذي ستغرقه الموجة من المنبع إلى السطح العاكس إلى خط القياس لابد من تطبيق العلاقة الخاصة بالموجة المنعكسة عن السطح الأفقي

$$t = \frac{1}{v}\sqrt{x^2+4h^2}$$

كما في الجدول المرفق

رقم اللاقط	x	t m/s	رقم اللاقط	x	t m/s
1	1200	0.974	13	100	0.888
2	1100	0.961	14	200	0.890
3	1000	0.948	15	300	0.893
4	900	0.937	16	400	0.898
5	800	0.927	17	500	0.904
6	700	0.918	18	600	0.910
7	600	0.910	19	700	0.918
8	500	0.904	20	800	0.927
9	400	0.898	21	900	0.937
10	300	0.893	22	1000	0.948
11	200	0.890	23	1100	0.961
12	100	0.888	24	1200	0.974
		x=100 t=8886			x=0 t=888


t
الزمن
m/s
0.970
0.900
0.800
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0
m
24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
m
المسافة

- الغاز المثالي :
١- قوى الترابط بين جزيئاته مهملة
٢- جزيئاته حرة الحركة
٣- تأثير قوى الثقالة على جزيئاته مهملة أو معدومة)

- *قوانين الغازات المثالية:*

تتألف المادة بأي صورة كانت من ذرات أو جزيئات تكون
١. في الجسم الصلب متلاصقة ذات قابلية ضعيفة للانضغاط
٢. وتكون متقاربة في السوائل(حركتها انسحابيه)
٣. وتكون متباعدة في الغازات(قوى الترابط ضعيفة وقابلة للانضغاط)

ويمكن اعتبار أي غاز حقيقي غاز مثاليا عندما تكون قوى الترابط مهملة أو تكون جزيئاته حرة الحركة

وتأثير قوة الثقالة على جزيئات الغاز مهملة أو معدومة.

- قانون (غاي - لوساك):

- التحول المتساوي الضغط (التمدد الحر للغاز)

اذا بقي ضغط كمية من الغاز p =cansot أثناء تغير الحجم بتابعية درجة الحرارة أو العكس فأن التحول الحاصل يكون (متساوي الضغط).

- التحول المتساوي درجة الحرارة (التمدد المتزن) (أي أن الجسم يتحول من حالة الى حالة بالحفاظ على درجة الحرارة).

- قانون (بويل – ماريوط): T ثابتة

ينص على انه: عند درجة حرارة ثابتة يكون جداء حجم كمية من غاز بضغطه يساوي الى مقدار ثابت (p×v= cansqt).

- قانون الضغوط الجزئية (قانون دالتون)

ينص على ان الضغط الكلي لمزيج من غازات مختلفة يساوي الى مجموع الضغوط الجزئية للغازات المكونة لهذا المزيج

(عندما تشغل نفس الحجم) p=p1+p2+p3.....pm وبالتالي فان مول من أي غاز في الشروط النظامية =22,4. ليتر

- قانون أفوغادرو : ينص على أنه عندما لا يحصل تغير في ضغط أو درجة حرارة غاز فإنه لن يتمدد أو يتقلص. (ثابتة P)

- قانون (أفوكادرو)

ينص على أنه عندما لا يحصل تغير في ضغط أو درجة حرارة غاز فإنه لن يتمدد أو يتقلص (p=cancot).