(المقدمة)

أهمية علم الفيزياء:

تعرف العلوم الطبيعية على انها جميع العلوم التي تدرس الطبيعة وما فيها من ظواهر كعلم الفيزياء وعلم الكيمياء وعلم الحياة. ان الارض وما عليها من جماد واحياء وما فيها من هواء وماء وكل ما صنعته يد الانسان الى جانب ما في الكون الفسيح من شموس واقمار وكواكب يطلق عليها بالاجسام الفيزيائية. وهذه الاجسام هي اجزاء محدودة من المادة التي تتكون في الاساس من جزيئات مكونة من ذرتين او اكثر متحدة مع بعظها بنسب وزنية معينة.

ان التغيرات والظواهر التي تطرأ على المادة بحيث تبقى الجزيئات او الذرات على حالها دون تغيير تعرف بالتغيرات الطبيعية او الظواهر الفيزيائية. حيث يعنى علم الفيزياء بدراسة جميع هذه الظواهر كالظواهر الميكانيكية والحرارية والصوتية والضوئية والكهربائية والمغناطيسية، كما ويهتم بدراسة خواص المادة وتركيبها الداخلي.

امثلة:

1. يمتلك الحجر المتحرك طاقة ميكانيكية ناشئة من حركته، واذا اصطدم هذا الحجر بحجر اخر حركه عن موضعه وقد ينشأ من هذا الاصطدام حرارة قد تكون مصحوبة بشرارة ضوئية، وهذ يعني ان الطاقة الميكيانيكية التي يمتلكها الحجر المتحرك قد تحول بعضها الى طاقة حرارية وطاقة ضوئية.
2. يتوهج المصباح الكهربائي عند مرور التيار الكهربائي في فتيلته، وهذا يعني تحول الطاقة الكهربائية الى طاقة حرارية وضوئية. وتتحول الطاقة الكهربائية الى طاقة حركية تحرك الرياح وتدير المكائن.
3. ان الطاقة الضوئية المستمدة من الشمس تسخن سطح الارض الذي بدوره يسخن الهواء الملامس له بدرجات مختلفة. ان عدم تساوي سخونة مناطق سطخ الارض يؤدي الى اختلاف سخونة الهواء فيها، حيث يؤدي هذا الى ظهور الرياح كهواء متحرك.

ان علم الفيزياء يهتم بدراسة جميع هذه الظواهر او التغيرات ولذلك فانه يعرف بانه العلم الذي يعنى بدراسة المادة والطاقة وتحولاتها.

أدوات علم الفيزياء:

ان دراسة المشاكل العلمية تتطلب الاستعانه بالكثير من الاجهزة والادوات، ومن اهم هذه الادوات موجودة في جسم الانسان (العقل والحواس). ومن ثم اللغة التي تستخدم للتواصل مع بعضنا البعض، ثم الرياضيات التي تربط بين الكميات المقاسة من حيث مقاديرها وكيفية تغيرها. ولكن استخدام الحواس في تقدير الزمن او المسافة او الكتلة تختلف من شخص الى اخر ولا نستطيح الحكم بالدقة الا عند استخدام الاجهزة العلمية مثل الساعة او المقياس المتري او الميزان.

لقد تطورت اجهزة علم الفيزياء من البسيط الى المعقد، فالتجارب الاولى عن التركيب الذري والنشاط الاشعاعي، على سبيل المثال، تمت باجهزة بسيطة مثل الالواح الحساسة والاملاح المشعة وبعض المواد الاولية الى ان وصلت اليوم بازدياد المعرفة العلمية والتكنلوجيا الى اجهزة غاية في التعقيد مثل المسرعات النووية الضخمة واجهزة الكشف الالكتروني المتعددة عن الجسيمات والدقائق الاولية.

القياس:

ان النظام العالمي للقياس (SI) هو نظام (متر – كيلو غرام – ثانية) ويرمز له (MKS) او (م كغم ث) ويشتق منه ايضا نظام (CGS) او (سم غم ث).

النظام المتري:

1. **المتر:** ويستخدم في قياس وحدة الطول حيث تم اقتراحه في فرنسا عام 1791 من قبل لجنة عالمية ضمت عالم الفيزياء والرياضيات لابلاس (1749–1827) وقد اخذت هذه اللجنة النقاط التالية بعين الاعتبار:

أ. ان نظام القياس يجب ان يكون مقدرا غير قابل للتغير ومأخوذ من الطبيعة.

ب. لسهولة الحساب يجب ان تكون وحداته ذات اجزاء ومضاعفات عشرية واصبح المتر كوحدة لقياس الطول بحيث يمثل واحد من اربعين مليون جزء $\frac{1}{40,000,000}$ يقسم عليها خط الطول المار بمدينة باريس.

جدول يمثل اجزاء ومضاعفات المتر

التسمية	النسبة الى وحدة المتر	التسمية	النسبة الى وحدة المتر
المتر	$1 = 10^0$	تيرا ميتر	$1,000,000,000,000 = 10^{12}$
ديكا ميتر	$10 = 10^1$	ديسمتر	$0.1 = 10^{-1}$
هيكتو ميتر	$100 = 10^2$	سنتيمتر	$0.01 = 10^{-2}$
كيلو ميتر	$1000 = 10^3$	مليمتر	$0.001 = 10^{-3}$
ميكا ميتر	$1000,000 = 10^6$	مايكروميتر	$0.000001 = 10^{-6}$
كيكا ميتر	$1,000,000,000 = 10^9$	نانو ميتر	$0.00000001 = 10^{-9}$

ان وحدات المساحة والحجوم ممكن اشتقاقها من وحدة الطول، فوحدة المساحة هي مربع طول ضلع وحدة الطول ووحدة الحجم هي مكعب طول ضلع وحدة الطول وكمثال:

Area:

$1\ cm * 1\ cm = 1\ cm^2$

$1\ m * 1\ m = 1\ m^2 = 100\ cm * 100\ cm = 10000\ cm^2 = 10^4\ cm^4$

$1\ km * 1\ km = 1\ km^2 = 1000\ m * 1000\ m = 1000000 m^2 = 10^6\ m^2$

Volume:

$1\ cm * 1\ cm * 1\ cm = 1\ cm^3$

$1\ m * 1\ m * 1\ m = 1\ m^3 = 10^6\ cm^3$

$1\ km * 1\ km * 1\ km = 1\ km^3 = 10^9\ m^3$

2. **وحدة الكتل (كغم):** ان الوحدة الدولية لقياس (الكتلة) هي سبيكة اسطوانية مكونة من عنصري البلاتين والايريديوم وتسمى بالكيلو غرام، وهي محفوظة في المكتب الدولي للاوزان والمقاييس بالقرب من باريس.ويعرف الكيلوغرام اصلا على انه يساوي كتلة لتر (10^3 سم^3) من الماء المقطر بدرجة حرارة 4°م، وهي درجة الحرارة التي تكون فيها كثافة الماء اكبر ما يمكن.

Micro gram = $\frac{1}{1,000,000,000}$ Kg = 10^{-9} Kg

طرق قياس الكتلة: للمقارنة بين كتلة مجهولة والكيلو غرام العياري نستخدم

أ- استخدام الميزان ذو الكفتين، حيث نضع الكتلة المجهولة في كفة والاوزان المعيارية في كفة اخرى (الكيلو غرام اجزاءه و مضاعفاته) في الكفة الاخرى الى ان تتزن الكفتان. وتسمى الكتلة المعينة بهذه الطريقة (كتلة الجذب) واذا اتزنت الكفتان في مكان ما فانها تتزن في اي مكان اخر في هذا الكون.

ب- الطريقة الثانية تعتمد على المقارنة بين (عجلة الجسم) المجهول وعجلة كتله عيارية عندما يتعرض الاثنان لنفس القوة المؤثرة، والنسبة بين الكتلتين تتناسب عكسيا مع النسبة بين عجليتهما والكتلة التي تقاس بهذه الطريقة تسمى كتلة القصور (inertial mass) ولقد دلت التجارب على ان كتلة الجذب تساوي كتلة القصور الى درجة كبيرة جدا من الدقة اذا استخدمنا نفس الكتلة العيارية في قياسهما وفي مجال التعامل اليومي في الكتل الكبيرة نسبيا، فانه من الاسهل تعيين كتلة الجذب لهذه الاجسام.

وحيث انه لا فرق بين كتلة الجذب وكتلة القصور، شاع استعمال الميزان ذي الكفتين في تعيين الكتل الكبيرة نسبيا اما على نطاق الجسيمات الاولية والذرات فأنه من الاسهل تعين كتلة القصور باستخدام قوى المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تؤثر على الجيسمات المشحونة.

مقادير بعض الكتل في الكون (كيلوغرام)

كتلة الشمس	10^{30}	كتلة السيارة	10^{3}	كتلة كرية الدم الحمراء	10^{-13}
كتلة الارض	10^{25}	كتلة لتر من الماء	10^{0}	كتلة جزئ الاوكسجين	10^{-27}
كتلة القمر	10^{23}	كتلة قطرة الماء	10^{-5}	كتلة الالكترون	10^{-32}

3. **وحدة قياس الزمن:** إن قياس الزمن يرتكز على مبدأ الحركة الدورية المتكررة فآلة التوقيت الساعة (Clock) ليست أكثر من أداة تحصي عدد المرات التي تتكرر فيها حركة دورية معينة فالقلب النابض ساعة، والبندول المهتز ساعة، والأرض الدائرة حول نفسها أو حول الشمس ساعة، وبلورة الكوارتز المهتزة ساعة والوحدة الأساسية لقياس الزمن هي الثانية Second ولقد عرفت أصلا بأنها تساوي $\frac{1}{86400}$ من اليوم، أي إن الثانية هي زمن الذبذبة الواحدة لساعة تعمل 86406 ذبذبة بينما تتحرك الشمس من موضعها عند الظهر في أحد الأيام إلى نفس موضعها عند الظهر في اليوم التالي. ويستطيع الفلكيون تحديد هذا الموضع بدقة كبيرة، وبما أن حركة الشمس الظاهرية هذه تتغير بعض الشيء من يوم الآخر على مدار السنة فإن الثانية حسبت على أساس القيمة المتوسطة لكل أيام السنة.

ونحن نعلم أن الأرض في تغير دائم فهنالك الزلازل والبراكين والفيضانات وتجمد المياه وذوبانها، وحركة الرياح كل ذلك يؤثر على انتظام حركة الأرض وبالتالي على قيمة وحدة القياس الزمنية (الثانية) لذلك بنى الفيزيائيون ساعات ذرية Atomic Clocks تعتمد في تعيينها للزمن على الاهتزازات الذرية الدورية وتحفظ هذه الساعات في المكتب الوطني للوحدات القياسية National Bureau of Standards في الولايات المتحدة الأمريكية والساعة القياسية حاليا هي ذرة عنصر السيزيوم Cs 155 وتعرف الثانية بأنها تساوي (9192631770) زمن اهتزازة معينة من اهتزازات ذرة السيزيوم المذكورة وتفوق هذه

الساعات بدقتها الساعة الفلكية المبنية على حركة الأرض بأكثر من 200 مرة إذ أن الخطأ في هذه الساعة الذرية لا يزيد عن ثانية واحدة لكل 30000 سنة.

جدول يبين بعض الفترات الزمنية الصغيرة

الاسم	الرمز	المقدار
بيكو ثانية Picosecond	Psec	10^{-12} ثانية
نانو ثانية Nanosecond	Nsec	10^{-9}ثانية
ميكرو ثانية Microsecond	Usec	10^{-6} ثانية
ميللي ثانية Millisecond	Msec	10^{-3} ثانية

أما على النطاق الكوني فإن الزمن يقاس بملايين السنين (البليون = 10^9) فعمر الأرض يقدر بحوالي 4 بليون سنة، وعمر الكون يقدر بحوالي 10 بليون سنة ومتوسط عمر البروتون في باطن الشمس هو 14 بليون سنة. ومن المثير أن نلاحظ أن النسبة بين اطول الفترات الزمنية واقصرها لإحداث عالمنا الطبيعي هي 10^4 وهي النسبة ذاتها بين اطول مسافة وأقصرها في هذا الكون، إن ذلك ليس مصادفة فإن أطراف هذا الكون تبتعد عنا بسرعة تقترب من سرعة الضوء والجسيمات الأولية التي تسير غور عالمنا تحت المجهري تتحرك هي أيضاً بسرعة تقترب من سرعة الضوء.

أنظمة الوحدات العيارية Systems of Standard Units

تحدثنا حتى الآن عن نظام واحد من الوحدات، وهو ما يسمى بالنظام الدولي ويرمز له أحيانا بالرمز (SI :System International) ويتخذ هذا النظام المتر كوحدة عيارية للأطوال، والكيلو جرام وحدة للكتل والثانية للزمن، ودرجة الحرارة المطلقة The Kelvin وحدة لدرجة الحرارة.

ويوجد نظامان آخران يستخدمان في العلوم والهندسة هما:

1. **نظام جاوسkelvin Gaussian System**

او نظام (سم– غم – ثانية) وفيه يتخذ السنتيمتر وحدة للطول، والغرام وحدة للكتلة، والثانية للزمن، ودرجة الحرارة المطلقة وحدة لدرجة الحرارة.

2. **النظام البريطاني** The British system

او نظام (قدم – باوند – ثانية) وفيه يعتبر القدم وحدة للأطوال، والباوند وحدة الكتلة، والثانية وحدة للزمن ودرجة الحرارة فهرنهيت Fahrenheit degree كوحدة لدرجة الحرارة.

وظاهريا يبدو أن النظام الدولي، ونظام سم – غم – ثانية متشابهان من حيث كونهما نظامان متريان والنسبة بين وحدات الطول أو الكتلة فيهما هي عبارة عن قوى العشرة أي أن ($10^2 = \frac{cm}{m}$) و ($10^3 = \frac{gm}{Kg}$) إلا أن الإختلاف بين وحدات النظامين هي أكبر من ذلك بالنسبة للوحدات الكهربائية والمغناطيسية.

أما النظام البريطاني فقد اختفى تقريبا من النشرات العلمية في أبحاث الفيزياء، مع أن بعض المهندسين لا يزال يستخدم وحداته، وسواء في الفيزياء أو الهندسة فإن وحدات النظام الدولية SI أصبحت هي الشائعة، **وسنحاول التركيز على هذا النظام**، ومن فوائد هذا النظام، بالإضافة إلى كونه مترية، هو إنه يحتوي على الوحدات العلمية في الكهرباء الفولت Volt، الأمبير Ampere ، الأوم Ohm ، الواط Watt وغيرها.

واتماماً للموضوع يجب أن نتذكر أنه بالإضافة إلى الوحدات الأربع العيارية (متر، كيلو غرام، ثانية، درجة مطلقة)، فإن النظام الدولي SI يحتوي أيضا على الأمبير كوحدة لقياس التيار الكهربائي، والشمعة العيارية Candela كوحدة للإضاءة وهذه هي الوحدات الست في النظام الدولي. وهناك وحدات لكميات أخرى في الفيزياء تسمى بالوحدات المشتقة لأنه يمكن التعبير عنها بدلالة الوحدات الست الأساسية:

الكثافة = $\frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$ $\frac{Kg}{m^3}$

والسرعة المنتظمة = $\frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$ $\frac{m}{Sec}$

التسارع = $\frac{\text{السرعة}}{\text{الزمن}}$ $\frac{m}{Sec^2}$

والقوة = الكتلة × العجلة ($\frac{Kg}{Sec^2}$) وتسمى هذه الوحدة اختصارا بالنيوتن Newton نسبة إلى العالم أسحق نيوتن.

الفصل الاول

(الحرارة)

علاقة حركة جزئيات الجسم بدرجة حرارته:

تعتبر ظاهرة الانتشار في المواد الغازية والسائلة والصلبة إحدى الدلائل على حركة الجزيئات للمادة، فإذا راقبنا هذه الظاهرة في إناءين، وضع في كل منهما سائل، وكان أحد هذين الإناءين قد وضع قبل التجربة في مكان بارد، ووضع الآخر قبل التجربة على موقد نار مشتعل وجربنا عملية الانتشار في كل من هذين الإناءين، نلاحظ أن عملية الانتشار في الإناء الساخن تجري بسرعة أكبر مما عليه في الإناء البارد، إن هذا يعني أن سرعة حركة جزيئات السائل الساخن أكبر من سرعة حركة جزيئات السائل البارد، ومن هنا نلاحظ أن حركة جزيئات السائل ودرجة حرارته متلازمة مع بعضها البعض.

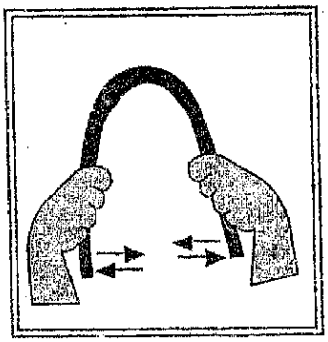
من المعروف أن حركة جزيئات المادة معقدة جداً، ويصعب إعطاء صورة كاملة عنها، خاصة إذا عرفنا أن ما يحويه 1 م^3 من أي غاز في الظروف الاعتيادية يبلغ نحو (25×10^{18}) جزيء وأن كل جزئ من هذه الجزيئات يتحرك حركة انتقالية في جميع الجهات وبشكل عشوائي فيصطدم خلال ذلك بالجزيئات الأخرى، ويعود بعدها لمثل هذه الحركة ليصطدم مرة أخرى وهكذا. إن حركة الجزئيات العشوائية هذه مجموعها تسمي **الحركة الحرارية للمادة،** نظرا لارتباطها بدرجة حرارة المادة نفسها.

الطاقة الداخلية للمادة وطرق تغيرها:

إن حركة جزئيات المادة المستمرة والعشوائية تجعل هذه الجزيئات تمتلك **طاقة كامنة ناشئة في الأصل من تغير حركتها، وطاقة كامنة ناشئة من تغير أوضاع الجزيء نفسه خلال تلك الحركة،** وأن مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة التي تمتلكها جميع جزئيات الجسم يطلق عليها اسم **الطاقة الداخلية** لذلك الجسم، لكن طاقة الجزيء الواحد قليلة جدا، فقد وجد أن الطاقة التي يمتلكها جزيء واحد من غاز الهيدروجين بدرجة حرارة الغرفة تساوي حوالي 0.5×10^{-20} جول، غير أن مجموع الطاقة الداخلية التي تمتلكها جميع جزئيات الهيدروجين الموجودة في متر مكعب واحد وفي نفس درجة الحرارة تعادل ما يقرب من 140000 جول، وهذه كمية كبيرة.

إن الطاقة الداخلية للجسم كمية غير ثابتة، فعند رفع درجة حرارة الجسم تزداد هذه الطاقة بسبب زيادة متوسط سرعة الجزيء، والذي يؤدي بدوره إلى زيادة الطاقة الحركية والكامنة لجزئيات الجسم بمجموعها. أما إذا خفضت درجة حرارة الجسم، فإن الطاقة الداخلية له سوف تنخفض هي الأخرى، كذلك تتغير الطاقة الداخلية للجسم عند انتقاله من حالة إلى أخرى، أوعند تغير شكله، فعلى سبيل المثال، إن الطاقة الداخلية لبخار الماء تكون أكبر من الطاقة الداخلية لنفس كمية الماء التي تكون منها ذلك البخار، فخلال انتقال السائل من حالة السيولة إلى الحالة الغازية تزداد المسافة بين جزيئاته وبالتالي تزداد الطاقة الكامنة للجزيء الواحد، كذلك فإنه عند تكرار ليَ (فتل) سلك معدني

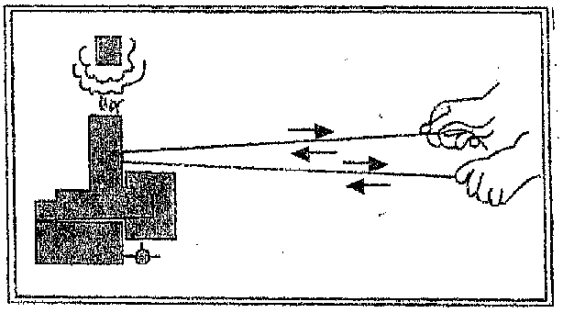
عدة مرات بهدف قطعة، كما في الشكل (1)، فإننا نلاحظ زيادة سخونة المنطقة التي يتركز عليها (اللي) في السلك وهذا يعكس دون شك، زيادة الطاقة الداخلية للسلك نتيجة محاولة تغيير شكله.



شكل (1)

و من كل ما تقدم نلاحظ:

1. أن الطاقة الداخلية للجسم تتغير بتغير سرعة حركة جزيئات الجسم، فإذا وضعنا أثيرا في أسطوانة معدنية سميكة الجدران كما في الشكل (2) وحركت الأسطوانة بواسطة حبل عدة مرات فبعد فترة من الزمن نلاحظ أن الأثير يسخن ثم يغلي، وهكذا نرى أن الأثير يسخن ثم يغلي بسبب تغير طاقتة الداخلية نتيجة للشغل الذي بذل عليه أثناء إدارة الأنبوبة بواسطة الحبل، كذلك نلاحظ أن الأجسام عند طرقها أو دلكها أو بردها، تزداد سخونتها، وهذا يعني أن الشغل المبذول في الطرق أو الدلك أو البرد، يؤدي إلى تغير الطاقة الداخلية للجسم وعلى هذا الأساس فيمكننا زيادة الطاقة الداخلية للجسم عن طريق بذل شغل عليه.



شكل (2)

2. كذلك يمكننا أن نغير العلاقة الداخلية للجسم بدون بذل شغل عليه فإبريق الشاي الذي يوضع على موقد نار مشتعل يسخن ماؤه ثم يبدأ بعد فترة بالغليان ويتحول الماء الموجود فيه إلى بخار، كما أن الملعقة المعدنية الباردة عند وضعها في الماء الساخن، تسخن هي الأخرى بعد فترة وجيزة، ويسخن سطح الأرض عندما تسقط عليه أشعة الشمس، ففي جميع هذه الحالات ترتفع درجة حرارة الجسم وهذا يعني زيادة الطاقة الداخلية له، فكيف نفسر زيادة الطاقة الداخلية للجسم في كل من هذه الأحوال؟ لنأخذ حالة الملعقة المعدنية الباردة، التي تغمر في الماء الساخن، فالطاقة الحركية لجزيئات الماء الساخن أكبر من الطاقة الحركية لجزيئات المعدن، وفي الأماكن التي تتلامس فيها المعلقة مع الماء تعطي جزيئات الماء الساخن قسما من طاقتها الحركية إلى جزيئات الملعقة الباردة ذات الطاقة الأقل، لذلك تزداد الطاقة الداخلية لأجواء الملعقة التي تلامس الماء مما يؤدي إلى زيادة درجة حرارتها بينما ينخفض معدل درجة حرارة الماء الساخن بسبب انخفاض طاقته الداخلية نتيجة هذا التلامس. وباستمرار هذا الانخفاض تتعادل بالتدريج درجة حرارة الماء الساخن مع درجة حرارة الملعقة حيث يشمل تغير الطاقة الداخلية جميع أجزاء الملعقة الأمر الذي يؤدي إلى زيادة سخونتها.

إن عملية تغير الطاقة الداخلية للأجسام، دون انجاز شغل، والتي يتم خلالها إعطاء الطاقة الداخلية من جسم إلى آخر يطلق عليه اسم **عملية انتقال الحرارة**، وأن مقياس تغير الطاقة الداخلية خلال عملية انتقال الحرارة من جسم إلى آخر هو كمية الحرارة أو الحرارة بشكل عام، وعلى هذا الأساس يمكننا تغيير الطاقة الداخلية للأجسام بطريقتين:

1. صرف شغل ميكانيكي على الجسم مثل الحركة، الطرق، الدلك، البرد.... الخ.
2. انتقال الحرارة من جسم إلى آخر، مثل تسخين الماء على موقد نار مشتعل، أو تلامس جسمين أحدهما اكثر سخونة من الآخر.

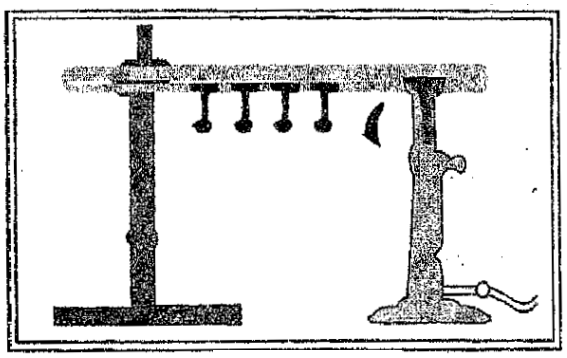
<u>طرق انتقال الحرارة:</u>

الطاقة الداخلية للجسم ككل أشكال الطاقة الأخرى، يمكن نقلها من جسم الى آخر، ومثال على ذلك هو انتقال الطاقة الداخلية من الماء الساخن إلى الملعقة المعدنية الباردة.

ومن الممكن إيراد أمثلة أخرى لانتقال الحرارة من جسم إلى آخر أو جزء من ذلك الجسم إلى باقي الأجزاء الأخرى، فعند وضع سلك نحاسي في موقد نار مشتعلة، فإن أجزاء هذا السلك الملامسة للنار سوف تسخن أولا، ومن ثم تسخن الأجزاء الأخرى، وبعد ذلك تنتقل الحرارة إلى اليد الماسكة لذلك السلك، كذلك عند تسخين الماء بواسطة إناء زجاجي يوضع على موقد النار المشتعلة، فإننا نلاحظ أن الماء يسخن من أسفل، وفيما بعد تنتقل الحرارة إلى باقي أجزائه، والشمس رغم بعدها بمقدار 150 مليون كم، تعطي حرارتها إلى الأرض.

1. **انتقال الحرارة بالتوصيل**

إذا لصقنا بواسطة الشمع، عددا من المسامير الصغيرة على سلك نحاسي، ثم ربطناه كما في الشكل (3) وبدانا تسخينه بواسطة مصباح كحولي، فإننا نلاحظ بعد فترة وجيزة سقوط المسمار الأقرب إلى المصباح بسبب ذوبان الشمع، ثم يليه المسمار الاخر وهكذا. إن هذا يؤكد حقيقة انتقال الحرارة بسلك النحاسي من الطرفة الملاصق للهب المصباح إلى الطرف البعيد عنه، فكيف أنتقلت الحرارة في السلك النحاسي؟

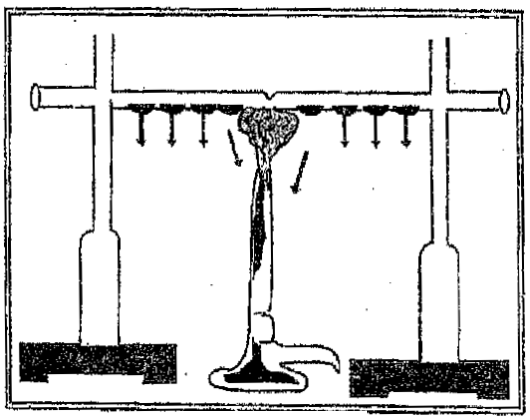


شكل (3)

في البداية تسخن الأجزاء الملامسة للهب مما يزيد طاقتها الداخلية في هذه المنطقة فتزيد درجة حرارتها، وبعد ذلك تؤثر حركة جزيئات السلك في هذا الطرف على الجزيئات المجاورة فتزيد من سرعة حركتها أيضا، وبالتالي ترتفع درجة حرارتها، وهذه الجزيئات بدورها تؤثر حركتها على الجزيئات المجاورة فتزيد من سرعة حركتها فترتفع درجة حرارتها وهكذا يؤثر كل جزيء متحرك على الجزيء القريب منه، وبذلك تعم في جميع أجزاء السلك حركة اهتزازية

من شأنها أن تزيد الطاقة الداخلية للسلك فترتفع درجة حرارته. ولكن خلال كل ذلك، من المهم جدا أن تعرف أنه خلال انتقال الحرارة في السلك النحاسي لا تنتقل مادة السلك من طرف إلى آخر، إن هذا الشكل من انتقال الحرارة يدعى **بالتوصل**.

والآن نعيد التجربة السابقة باستخدام سلك من النحاس و اخر من الفولاذ ونضع كلا من السلكين على حامل بحيث يمس الطرف السائب من كل سلك لهب المصباح الكحولي كما في الشكل (4).



شكل (4)

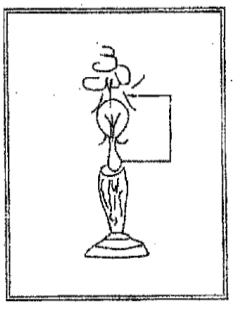
ونلاحظ بعد فترة وجيزة ذوبان الشمع وسقوط المسامير من السلك النحاسي قبل سقوطها من سلك الفولاذي، وهذا يعني أن توصيل النحاس للحرارة أجود من توصيل الفولاذ لها.

إن المواد تختلف في توصيلها للحرارة فبعضها جيد التوصيل للحرارة وبعضها رديء التوصيل لها، ويمكن الاستدلال على اختلاف المواد لتوصيل للحرارة عند لمسها إذا كانت مطروحة في الشمس، فالنحاس يكون أكثر سخونة من الحديد، والحديد أكثر سخونة من البلاستيك، رغم أن درجة الحرارة التي توجد فيها هذه المواد المختلفة واحدة، ومن هذا نستنتج أن المواد تختلف في توصيلها للحرارة، فهناك مواد جيدة التوصيل للحرارة مثل المعادن كالفضة والنحاس والحديد والزئبق وغيرها وهناك مواد رديئة التوصيل للحرارة مثل الخشب، الورق، الصوف، القطن، الهواء، الماء.. الخ.

إن القطن والصوف رديء التوصيل للحرارة بسبب وجود الهواء بين شعيراته، ولكن اردء موصل للحرارة يعتبر الفراغ بسبب عدم وجود إمكانية نقل الطاقة فيه لعدم وجود جزيئات المادة. إن أهمية المواد الرديئة التوصيل للحرارة هو استعمالها في حفظ الحرارة من التسرب، فالطوب الطيني اردء توصيلا للحرارة من الأسمنت لذلك يفضل استعماله في بناء البيوت سواء في المناطق الحارة أم المناطق الباردة. إن الأرض رديئة التوصيل للحرارة لذلك تكون مياه الآبار في المناطق العميقة باردة صيفا وتكون دافئة شتاء.

2. انتقال الحرارة بالحمل:

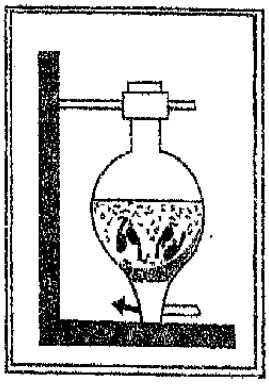
يسخن السائل والغاز عادة من الأسفل، فإذا وضعنا يدنا في إناء فيه ماء موضوع على موقد مشتعل، فإننا نحس بأن الماء أسفل الإناء هو الذي يبدأ بالسخونة قبل الماء في أعلاه، كذلك عند تقريب يدنا من مصباح مضيء فإننا نحس أن تيار الهواء الدافيء يتجه إلى أعلى، أن هذا التيار الهوائي يمكنه تدوير دوامة ورقية صغيرة حول المصباح،



شكل (5)

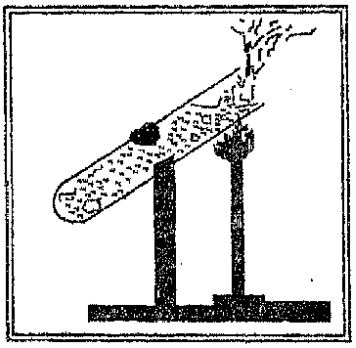
كما في الشكل (5) فالهواء الساخن يتحرك إلى أعلى. إن مثل هذا الشكل من انتقال الحرارة يطلق عليه اسم **الحمل.**

إن الحرارة خلال الحمل يحملها نفس التيار الغازي أو التيار المائي، فالهواء الملامس للمصباح سخن من سطح المصباح فيتمدد وتصبح كثافته أقل من كثافة الهواء البارد المحيط بالمصباح لذلك فإن طبقة الهواء الحار تعوم على الهواء البارد فترتفع بتأثير القوة الصعودية للهواء لأن هذه القوة أكبر من قوى جذب الأرض المؤثرة على الهواء الساخن، وهذا بدوره يؤدي إلى أن يحل محل الهواء الساخن هواء أبرد والذي بدوره يسخن ويبدأ بالحركة إلى أعلى وهكذا .



شكل (6)

ومثل هذا يجري في السوائل أيضاً، فإذا وضعنا في قعر الدورق الذي سخنا فيه الماء مادة صابغة بلورية مثل برمنكنات البوتاسيوم، لكي نلحظ حركة طبقات الماء الساخنة، نلاحظ بعد فترة وجيزة كيف تسخن الطبقة السفلي من الماء وتعوم على سطح الماء البارد فترتفع إلى أعلى ليحل محلها الماء الأبرد وهكذا، كما في الشكل (6).



شكل (7)

إن هذه التجارب البسيطة تفسر لنا لماذا يسخن السائل والغاز كقاعدة من الأسفل لنجرب الآن تجربة أخرى لتأكيد هذه الحقيقة وذلك بتسخين الماء في أنبوبة اختبار بحيث تعرض طبقته العليا للحرارة، كما في الشكل (7)، إننا نلاحظ في هذه الحالة غليان الطبقة العليا للماء الموجود في الأنبوبة، وعدم غليان الطبقات السفلى.

وإذا وضعنا قطعة جليد في قعر الأنبوبة التي يجري فيها التسخين، فإن الجليد لا يذوب، لأن الماء رديء التوصيل للحرارة من جهة، كما لا تنتقل الحرارة بالحمل من أعلى إلى أسفل من جهة أخرى، إن هذا يفسر أيضاً عدم إمكانية تسخين الهواء من الأعلى.

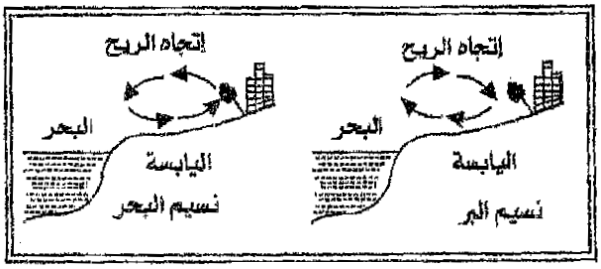
إن الحرارة لا تنتقل بالحمل في المواد الصلبة لأن جزيئات المادة الصلبة محدودة الحركة، إذ أن بلورات الجسم الصلب يتذبذب كل منها أمام نقطة معينة وتربطها مع بعضها البعض قوى جزيئية فخلال تسخين المواد الصلبة لا يمكن أن تتكون تيارات للمادة مثل تيارات الحمل.

<u>الحمل في الطبيعة:</u>

إن جميع الرياح التي تتحرك على الكرة الأرضية هي في الأصل تيارات حمل كبرى **عملاقة** وتكون الرياح التجارية مثال على ذلك، فهذه الرياح تهب من المناطق شبه المدارية إلى المناطق الاستوائية.

فالمتوسط السنوي لدرجة الحرارة في المنطقة الاستوائية أكبر من المتوسط السنوي لها في المناطق القطبية في حدود 50 درجة مئوي، ولذلك فالرياح تسخن في المنطقة الاستوائية فتصعد إلى أعلى نتيجة قلة كثافتها ويحل محلها رياح أبرد تأتي من المناطق شبه المدارية. أما بالنسبة للرياح المحلية كنتيجة للحمل في المناطق الواقعة على سواحل البحار وهو (نسيم البر ونسيم البحر).

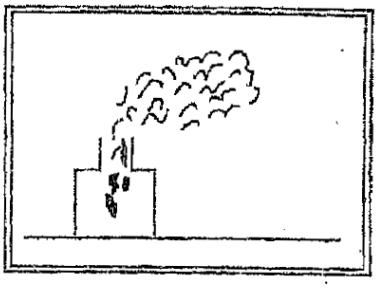
ففي منتصف النهار وفي هذه المناطق تسخن اسرع اليابسة من سخونة ماء البحر لأن الحرارة النوعية للأرض اليابسة أقل من الحرارة النوعية للماء، لذلك يسخن الهواء على اليابسة نتيجة لتماسه مع سطح الأرض، فيتمدد وتقل كثافته، ويرتفع إلى أعلى ويحل محله الهواء البارد القادم من البحر والذي يشكل **نسيم البحر**. وفي الليل تبرد اليابسة بشكل أسرع نتيجة لنفس الأسباب لذلك يكون الهواء على اليابسة أقل سخونة من الهواء على سطح البحر، فعندما يرتفع هواء البحر إلى أعلى نتيجة قلة كثافته يحل محله الهواء البارد من اليابسة والذي يشكل **نسيم البر** كما في الشكل (8).



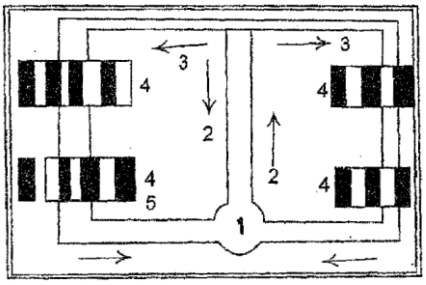
شكل (8)

<u>تطبيق ظاهرة الحمل في التكنولوجيا</u>

أ- التهوية: من المعروف أن الإحتراق بدون وجود الهواء المتجدد الذي يحوي على الأوكسجين (الهواء النقي) لا يمكن حدوثه، ومن أجل ضمان اشتعال النار واستمراريتها في مواقد المصانع أو المشاغل أو محطات توليد الكهرباء الحرارية لا بد من نظام للتهوية يضمن استمرار اشتعال النار في الموقد، لذلك نبني المدخنة المتصلة بالموقد، فعند اشتعال النار في الموقد يسخن الهواء الموجود في الموقد فتقل كثافته ويتصاعد عن طريق المدخنة، وبذلك يصبح ضغط عمود الهواء في المدخنة والموقد أقل من ضغط الهواء البارد الذي يدخل إلى الموقد، ليحل محل الهواء الساخن ونتيجة للفرق بين ضغط الهواء البارد القادم إلى الموقد وضغط الهواء الساخن المتصاعد عبر المدخنة تتكون التهوية التي تتضمن استمرار مرور الهواء المتجدد داخل الموقد، وهذا بدوره يؤدي إلى استمرار اشتعال النار داخل الموقد. وفي الشكل (9) تبين التجربة قاعدة عمل التهوية في المصانع.



شكل (9)



شكل (10)

ب- التدفئة: في كثير من البيوت الحديثة وبشكل خاص في المناطق الباردة، تستخدم التدفئة المركزية بواسطة الماء الساخن، على أساس ظاهرة الحمل، ففي الطابق الأسفلى يقع المرجل (1) والذي يسكن فيه ماء التدفئة كما في الشكل (10) ومن هذا المرجل يخرج أنبوب رئيسي (2) يتفرغ إلى فرعين (3) تمر كل فرع في أنبوبة ملتوية (بطارية) (4) أو عدد من البطاريات التي بداخلها الماء بواسطة الأنبوب (3) وتشيَد هذه البطاريات حيث تقع كل واحدة منها تحت الشباك في كل غرفة يراد تدفئتها، فإذا سخن الماء في المرجل تقل كثافته بسبب تمدده فيرتفع إلى أعلى عائماً على الماء الأبرد.

ويمر خلال الأنبوبتين (3) (3) إلى البطاريات (4) فيسخن الهواء الملامس لسطح كل بطارية فيتمدد وتقل كثافته فيرتفع إلى أعلى عائماً على الهواء الأبرد فيحل محله هواء أبرد يلامس سطح البطاريات مما يؤدي إلى تسخينه وبالتالي إلى ارتفاعه هو الآخر ويحل محله هواء أبرد، وهكذا ينشأ تيار حمل في الهواء يسخن هواء الغرفة ويساعد على تدفئتها، لكن استمرار تماس الهواء مع سطح البطارية يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة الماء الموجود في البطارية فتزداد كثافته وينزل إلى أسفل ويصل عبر الأنبوب (5) إلى المرجل ليسخن ويعود للصعود مرة أخرى، وهكذا يسخن هواء المنزل وتم تدفئة المنزل.

3. انتقال الحرارة بالإشعاع:

إن حرارة الشمس تصل إلى الأرض رغم أن الشمس تبعد عنا 150 مليون كم، ويفصلنا عنها فضاء أو فراغ خال تقريبا من المادة (فراغ) وأن الفراغ كما اسلفنا هو أردا موصل للحرارة إذ لا يمكن خلاله أن تنتقل الحرارة بالحمل أو التوصل بسبب عدم وجود جزئيات المادة فعلى أية صورة تأتي إلينا حرارة الشمس؟

إن وصول حرارة الشمس إلينا يستلزم وجود شكل ثالث لإنتقال الحرارة، وهذا الشكل يطلق عليه اسم **الإشعاع**. إن جميع الأجسام الساخنة تعطي الأجسام المحيطة بها حرارة عن طريق الإشعاع، وإن الانتقال الحرارة بالإشعاع يختلف عن الأشكال الأخرى لإنتقال الحرارة، لأن هذا الشكل من انتقال الحرارة (الإشعاع) يمكن أن يتم بالفراغ التام أيضا.

إن جميع الأجسام سواء كانت ساخنة كثيرة أو قليلا تشع أشعة غير مرئية، فالمصباح الكهربائي وقطعة الحديد الساخنة وحتى جسم الإنسان تشع جميعها أشعة غير مرئية وكلما كانت درجة حرارة الجسم عالية، كلما كان الجسم يفقد حرارة أكثر عن طريق الإشعاع، فإذا سخنت قطعة حديد أكثر فإن لونها يتغير من السواد إلى البياض ومن ثم الاحمرار ويصبح من الصعوبة مواجهتها بسبب شدة الحرارة التي تشعها.

وعليه فإن الأجسام الساخنة إلى درجة حرارة عالية جدا، لا تشع أشعة غير مرئية فحسب، وإنما تشع أيضاً أشعة مرئية (ضوء) فقطعة الحديد الساخنة إلى حد الاحمرار وفتيل المصباح الكهربائي والشمس وجميع الأجسام المضيئة، تعطي إلى جانب الأشعة غير المرئية التي تشعها أشعة مرئية والتي ندعوها بالضوء.

إن الأشعة المرئية وغير المرئية التي يشعها الجسم الساخن لا تنعكس عند سقوطها على الأجسام الأخرى فقط وإنما تمتص جزئيا من قبل تلك الأجسام، مما يؤدي إلى سخونة تلك الأجسام، ولكن هذه السخونة تكون بمستويات مختلفة، فالأجسام السوداء والداكنة تمتص كمية أكبر مما تمتصه الأجسام البيضاء والمصقولة التي يمكنها أن تعكس كمية أكبر من الضوء الساقط عليها.

ولكن الأجسام السوداء والداكنة تفقد في ذات الوقت كمية أكبر من الطاقة التي تمتصها عن طريق الإشعاع مما يؤدي إلى سرعة برودتها. مثال ذلك ما يجري في الطبيعة وفقا لهذه الظاهرة فعندما تسقط أشعة الشمس على الأرض ينعكس جزء منها، بينما يمتص سطح الأرض الجزء الأخر من الأشعة، مما يسبب ارتفاع درجة حرارته، لكن المناطق السوداء والداكنة على سطح الأرض مثل بعض جبال تمتص كمية أكبر من أشعة الشمس، لذلك تكون درجة حرارة سطحها، وخاصة في منتصف النهار، أيام الصيف، عالية جدا، وهذا يؤدي إلى سخونة الهواء الملامس لها، بطريقة الحمل، وارتفاع حرارته في المناطق القريبة منها بشكل خاص.

علاقة الحرارة بالشغل الميكانيكي

تعرف **كمية الحرارة**، بأنها مقدار الطاقة الداخلية التي يفقدها أو يكتسبها الجسم خلال عملية انتقال الحرارة. إن تسمية (كمية الحرارة) اتخذت نسبة إلى تغير الطاقة الداخلية للجسم عن طريق انتقال الحرارة فقط، ولم تتخذ بالنسبة إلى تغير الطاقة الداخلية الحاصلة على إنجاز شغل على الجسم ذلك فإن تحديد مقدار تغير الطاقة الداخلية عن طريق انتقال الحرارة يؤدي إلى تحديد أدق لكمية الحرارة.

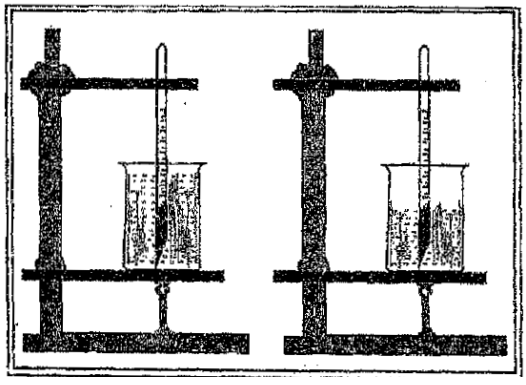
فإذا رمزنا للطاقة الداخلية للجسم بالرمز (ط د) وللتغير الحاصل في مقدارها بالرمز (Δ ط د) وقلت الطاقة الداخلية للجسم خلال عملة التبادل الحراري بمقدار (Δ ط د)، فيقال عندئذ أن الجسم قد أعطى للوسط المحيط به كمية حرارة (ح) تساوي (Δ ط د)، أما إذا ازدادت الطاقة الداخلية خلال عملية التبادل الحراري بمقدار (Δ ط د) فيقال أن الجسم قد اكتسب كمية من الحرارة مقدارها (ح) التي تساوي (Δ ط د) ولهذا يجب الانتباه إلى أن العلاقة الداخلية للجسم تؤخذ أو تعطي من قبل الجسم، أما كمية الحرارة (ح) فإنها تمثل التعبير الكمي للطاقة الداخلية المأخوذة أو المعطاة أثناء عملية التبادل الحراري ولهذا فإن كمية الحرارة (ح) هي مقياس لتغير الطاقة الداخلية خلال عملية التبادل الحراري.

ومن أجل التعرف على طريقة حساب كمية الحرارة (ح) يجب أن نفهم علاقتها بالمقادير الفيزيائية الأخرى، ونورد أدناه بعض التجارب والملاحظات:

1. عندما نريد أن نسخن الماء في غلاية إلى حد يجعله دافئة فقط، فإننا نحتاج إلى وقت قصير من التسخين، أما إذا أردنا زيادة سخونة الماء فإننا سوف نحتاج إلى وقت أطول، أي اننا نحتاج إلى إعطاء الماء كمية حرارة أكبر، ولهذا فكلما سخنا الماء إلى درجة حرارة أعلى، كلما احتجنا إلى إعطائه كمية حرارة أكبر، عند ترك الماء يبرد، فإنه كلما أعطى إلى المحيط الخارجي كمية حرارة أكبر، كلما انخفضت درجة حرارته اكثر. لكن معرفة ارتفاع وانخفاض درجة حرارة الماء، غير كاف لتحديد كمية الحرارة التي حصل عليها الماء عند التسخين، أو التي فقدها عند التبريد، فقطعة الحديد لا يمكن أن تدفيء الغرفة الباردة مثلا أيام الشتاء، وخاصة في المناطق الباردة في حين يمكن تدفئة مثل تلك الغرفة كما ذكرنا بواسطة الماء الحار والذي لا تزيد درجة حرارته عن60م.

2. نحن نعرف من تجربتنا اليومية، أنه كلما زادت كتلة الماء، كلما احتجنا إلى كمية حرارة اكبر لتسخينه لذلك فالغلاية المملوءة بالماء إلى نصفها، تحتاج لتسخينها درجة حرارة معينة تساوي نصف كمية الحرارة التي تحتاجها نفس الغلاية إذا ملأت بالماء وسخنت إلى نفس تلك الدرجة. ولو سخن إناءان متماثلان بمسخن واحد، بحيث أن الإناء الأول يحتوي على كتلة 200 غم، من الماء والثاني يحتوي على كتلة 400 غم، سنلاحظ أن الماء الموجود في الإناء الأول، يغلي قبل الماء الموجود في الإناء الثاني، ومن هذا نستنتج أن كمية الحرارة المعطاة للجسم أثناء تسخينه تعتمد على كتلة ذلك الجسم وعند ترك الجسم الساخن يبرد فإنه سوف يعطي إلى المحيط الخارجي كمية حرارة أكبر كلما كانت كتلته أكبر.

3. والآن نحاول أن نجري تجربة لتسخين محتويات إنائين متشابهين، الاول يحتوي على كتلة 400 غم ماه والثاني يحتوي على كتلة 200 غم ماء مع ثقل معدني كتلته 200 غم، أي أن كلا الإناءين يحتويان على كتلة 400 غم من المواد كما في الشكل (11) وأن التشابه بين الإناءين المذكورين ليس فقط بكمية المواد الموجودة فيهما، بل وحتى في تسخينهما، وذلك باستعمال جهازي تسخين متشابهين أيضا، لكن الفرق بينهما يكمن في أنه بدلا من إضافة 200 غم ماء في الإناء الثاني وضع ثقل معدني كتلته تساوي 200 غم.



شكل (11)

لقد لوحظ عند قراءة الثرمومترين الموجودين في كل من الإنائين، بعد فترة من التسخين، أن الإناء الثاني (الحاوي على الماء والثقل المعدني) يسخن أسرع من الإناء الأول (الحاوي على الماء فقط) وأنه من أجل أن تتساوى درجة حرارة محتويات كل من الإنائين، وجب إعطاء الإناء الأول كمية حرارة أكبر من كمية الحرارة التي تعطي للإناء

الثاني، لهذا فلتسخين كتل متماثلة من الماء والمعدن إلى درجة حرارة معينة تحتاج إلى كميات حرارة مختلفة، للماء كمية حرارة أكبر وللمعدن كمية حرارة أقل، وعلى هذا الأساس، فإن كمية الحرارة المعطاة إلى الجسم عند التسخين تعتمد أيضا على نوع مادته المصنوع منها. و من كل ما تقدم نستنتج أن كمية الحرارة المعطاة لجسم معين عند تسخينه تعتمد على كتلة ذلك الجسم وعلى نوع مادته وكذلك على مقدار التغير في درجة حرارته.

وحدة كمية الحرارة

إن كمية الحرارة تسمية تطلق على مقدار الطاقة الداخلية المعطاة أو المأخوذة من قبل الجسم، أثناء عملية التبادل الحراري وكيفية أشكال الطاقة الأخرى، فإن الطاقة الداخلية تقاس أيضاً بوحدات الجول أو بالأرك، ولكنه منذ زمن بعيد تستعمل في المختبرات وحدة خاصة لقياس كمية الحرارة تسمى السعر CALORY وهي مشتقة من الكلمة اللاتينية (كالور) التي تعني الحرارة أو السخونة.

إن **السعر** هو كمية الحرارة اللازم صرفها لتسخين 1 غم من الماء درجة مئوية واحدة وكذلك يمكن القول أن السعر هو كمية الحرارة التي يفقدها 1 غم من الماء إلى المحيط الخارجي عندما تهبط درجة حرارته درجة مئوية واحدة.

وفي التكنولوجيا تستعمل عادة وحدة أكبر من السعر لقياس كمية الحرارة وهي **الكيلو سعر** التي تساوي 1000 سعر، وأن بين وحدات قياس كمية الحرارة (الجول، السعر والكيلو سعر) توجد علاقة حسابية وهي:

1 كيلو سعر = 1000 سعر	1 سعر = 4.19 جول	1 كيلو سعر = 4190 جول

الحرارة النوعية (ح ن):

لتسخين كغم واحد من الماء درجة مئوية واحدة يستلزم صرف كمية من الحرارة قدرها 4190 جول أو ما يعادل 1000 سعر (كيلو سعر) ولكنه عند تسخين كغم من مادة أخرى مثل المعدن، درجة مئوية واحدة فيستلزم صرف كمية من الحرارة تختلف عما هي عليه بالنسبة إلى الماء.

إن كمية الحرارة اللازمة لتسخين كغم واحد من أية مادة درجة مئوية وأحدة، يمكن تعيينها في المختبر، وهي كمية فيزيائية تدعى بالحرارة النوعية التي سوف نرمز لها بالرمز (ح ن) وعليه فالحرارة النوعية تقاس بالوحدات التالية:

جول / كغم .درجة	كيلوسعر / كغم .درجة	سعر / كغم .درجة

جدول يبين الحرارة النوعية لبعض المواد (ح ن)

المادة	جول / كغم .درجة	كيلوسعر / كغم .درجة	المادة	جول / كغم .درجة	كيلوسعر / كغم .درجة
الرصاص	130	0.03	المنيوم	880	0.21
النحاس	380	0.09	الثلج	1800	0.43
الخارصين	380	0.09	الكيروسين	2100	0.51
الفولاذ	460	0.11	الكحول	2500	0.6
الزجاج	800	0.19	الماء	4200	1.0

فالحرارة النوعية للنحاس 380 جول\(كغم. درجة) وهذا يعني أن تسخين كغم من النحاس درجة مئوية واحدة يحتاج كمية من الحرارة مقدارها 380 جول (أو عند تبريد كغم من النحاس درجة مئوية واحدة فإنه يطلق كمية من الحرارة مقدارها 380 جول).

والحرارة النوعية تبين كم من الجولات أو السعرات التي تزداد فيها الطاقة الداخلية الكيلو غرام واحد من المادة، عند تسخينها درجة مئوية واحدة، لهذا فماء البحر والمحيطات عند تستخينه في الصيف، يمتص كمية حرارة كبيرة جدا، لذلك لا يكون الجو في الصيف في المناطق الساحلية حارا بالنسبة للمناطق البعيدة عن الساحل، وفي الشتاء يبرد ماء البحر بإعطائه كمية كبيرة من الحرارة، ولذلك فالشتاء يكون الجو في المناطق الساحلية معتدلا. وبسبب كبر الحرارة النوعية للماء فإنه يعتبر من أحسن السوائل استعمالا للتدفئة المنزلية.

والحرارة النوعية للمادة الواحدة لا تعتبر مقدار ثابتا ثبوتا مطلقا، فهي تعتمد على درجة حرارة المادة، فالحرارة النوعية للمواد الصلبة تقل درجة حرارتها ولكنها في حالة ثبوت درجة الحرارة، فإنها لا تتغير تغيرا كبيرة وذلك فهي تعتبر ثابتة، كما أن الحرارة النوعية للمادة المعينة تعتمد أيضا على حالة تلك المادة (هل هي في حالة الصلابة أم هي في حالة السيولة أم الغازية) فالحرارة النوعية للثلج مثلا أقل مرتين من الحرارة النوعية للماء.

<u>حساب كمية الحرارة اللازمة لتسخين الجسم والتي يعطيها عند تبريده:</u>

لقد عرفنا الكميات الفيزيائية التي تعتمد عليها كمية الحرارة وهي الكتلة، ونوع المادة وتغير درجة حرارتها، وكذلك عرفنا وحدات قياسها. أن هذه المعلومات ضرورية جدا لحساب مقدار التغير في الطاقة الداخلية للجسم، عند حصول عملية التبادل الحراري، وبكلمات أخرى أنها ضرورية لحساب كمية الحرارة، فلحساب كمية الحرارة يجب أن نعرف الحرارة النوعية لها وكتلتها بالإضافة إلى درجة حرارتها الابتدائية والنهائية.

وبما أن الحرارة النوعية (ح ن) تمثل كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كغم واحد من المادة، درجة مئوية وأحدة، لذلك فعند تسخين جسم كتلته عدة كيلوغرامات مقدار درجة مئوية واحدة فإننا سوف نحتاج إلى كمية من الحرارة أكثر بعدة مرات مما هي عليه فيما لو كانت كتلته كيلوغراما واحدا.

وإذا رفعت درجة حرارة الجسم عدة درجات حرارة بدلا من درجة مئوية واحدة فإن كمية الحرارة الضرورية سوف تزداد بعدد أكبر من المرات عما هي عليه عند رفع درجة حرارته درجة مئوية واحدة، فلحساب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة قطعة من الفولاذ كتلتها 5 كغم من درجة الصفر المئوي إلى 600 °C، نتبع الخطوات التالية:

1. لتسخين 1 كغم من الفولاذ درجة مئوية وأحد يلزمنا 460 جول، لأن الحرارة النوعية للفولاذ 460 (جول \ كغم. درجة) لاحظ جدول رقم (4).
2. ولتسحين 5 كغم من الفولاذ درجة مئوية واحدة يلزمنا كمية تساوي خمسة أضعاف مقدار الحرارة النوعية أي: 460 × 5 = 2300 جول.
3. ولتسخين 5 كيلو جرام من الفولاذ ورفع درجة حرارتها 600°C أكثر مما هي عليه يلزمنا كمية من الحرارة تعادل 600 ضعف المقدار 2300 جول أي أننا نحتاج 2300×600 = 1380000 جول.

ومعروف هنا أن 600 °C تمثل درجة الحرارة التي ارتفعت إليها درجة حرارة القطعة الفولاذية عما كانت عليه (درجة الصفر المئوي) أي أنها تساوي الفرق بين درجة حرارتها الابتدائية والنهائية. ولهذا فلحساب كمية الحرارة اللازمة لتسخين جسم معين:

ح = مقدار حرارته النوعية (ح ن) × كتلته × الفرق بين درجة حرارته الابتدائية والنهائية

ح = ح ن × ك × ($د_2$–$د_1$)

حيث أن (ح) هي كمية الحرارة، (ح ن) هي الحرارة النوعية لمادة الجسم، (ك) كتلته، $د_2$، $د_1$ هما درجة حرارته الإبتدائية والنهائية على التوالي.

مثال (1): إناء حديدي كتلته 10 كغم يحتوي على كمية من الماء مقدارها 20 كغم، احسب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الإناء ومحتوياته من 10°C إلى 100°C .

الحل

أن المادتين، الحديد والماء سوف تسخنان معا، ويحدث بينهما تبادل حراري لذلك يمكن اعتبار درجة حرارتهما متماثلة، فالإناء والماء سوف ترتفع درجة حرارتهما بمقدار 100 – 10 = 90 °C ، ولكن كمية الحرارة التي سوف يستلمها الماء لكي ترتفع درجة حرارته إلى 100 °C وذلك بسبب الاختلاف في كتلتي المادتين ومقدار الحرارة النوعية لكل منهما.

كمية الحرارة التي يكتسبها الإناء (ح1)= ح ن1 × ك1 × (د2–د1)

كمية الحرارة التي يكتسبها الإناء (ح1) = 460 (جول/كغم.درجة) ×10 كغم ×90 درجة

كمية الحرارة التي يكتسبها الإناء (ح1) = 400000 جول

كمية الحرارة التي يكتسبها الماء (ح2)= ح ن2 × ك2 × (د2–د1).

كمية الحرارة التي يكتسبها الماء (ح2)= 4200 (جول/كغم.درجة) ×20 كغم×90 درجة

كمية الحرارة التي يكتسبها الماء (ح2) =7600000 جول

كمية الحرارة اللازمة = ح1 + ح2

كمية الحرارة اللازمة = 400000 + 7600000 = 8000000 = 8 × 10^6جول

كمية الحرارة اللازمة = 8 × 10^6 جول · (كيلو سعر\4190 جول)

كمية الحرارة اللازمة = 1900 كيلو سعر

مثال (2) مزج 0.8 كغم ماء بدرجة حرارة 25 °C بماء آخر كتلته 0.2 كغم ودرجة حرارته 100 °C فإذا كانت درجة الحرارة النهائية للخليط 40 °C، قارن بين كمية الحرارة التي فقدها الماء الساخن وبين كمية الحرارة التي اكتسبها الماء البارد وناقش المسألة.

الحل:

عندما برد الماء الساخن من درجة 100 °C إلى 40 °C لهذا فإن كمية الحرارة التي فقدها الماء الساخن هي:

(ح1)= ح ن ×ك× (د2– د1)

(ح1) = 4200 (جول/كغم.درجة) ×0.2 كغم × (40–100) درجة

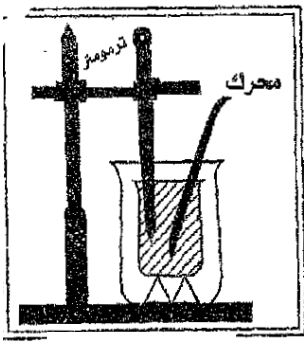
(ح1) = 50400 جول وهي كمية الحرارة التي فقدها الماء الساخن

أما الماء البارد فقد سخن من 25 °C إلى 40 °C ولهذا فإن كمية الحرارة التي اكتسبها الماء البارد.

(ح2)= 4200 (جول/كغم.درجة) ×0.8 كغم × (40–25) درجة

(ح2) = 50400 جولا وهي كمية الحرارة التي اكتسبها الماء البارد

وعلى هذا الأساس فإن (ح1 = ح2) أي أن كمية الحرارة التي فقدها الماء الساخن قد امتصها كاملا الماء البارد لرفع درجة حرارته في التجربة، ولكن يجب أن نأخذ بعين الاعتبار أن حالة تساوي الحرارة (ح1) و (ح2) هي حالة مثالية إذ لا يمكن الحصول على هذا التساوي إلا إذا عزل جهاز التجربة عزلا تأما فالحرارة من المخلوط سوف تنتقل إلى الهواء إذا جرت التجربة بدون العزل التام وأن الفرق بين كمية الحرارة المكتسبة (ح1) وكمية الحرارة المفقودة (ح2) يقل كلما ازداد عزل جهاز التجربة، أي كلما قل احتمال تسرب الحرارة إلى المحيط الخارجي ولكن يمكن أن يقال من الناحية العملية أن: **كمية الحرارة المفقودة = كمية الحرارة المكتسبة**



شكل (12)

وفي الحالات التي يجب فيها قياس كمية الحرارة المكتسبة والمفقودة خلال عملية التبادل الحراري بشكل دقيق ومضبوط يستعمل لهذ الغرض جهاز يسمى المسعر (الكالوري ميتر) وهو كما مبين في الشكل (12) يتألف من إناءين، خارجي كبير وداخلي صغير معزولين عن بعضهما البعض من الأسفل بمادة عازلة، والإناء الداخلي مصنوع من مادة جيدة التوصيل للحرارة كالنحاس مثلا، وذلك لكي تكون درجة حرارته هي نفس درجة حرارة السائل الذي في داخل وفي الإناء الداخلي الذي يلامس الإناء الخارجي يوضع ثرمومتر لقياس درجة الحرارة كما يوضع محرك لخلط المحتويات.

السعة الحرارية سعح

تعرف السعة بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم بأكمله درجة مئوية وأحدة، فإذا كانت كتلة الجسم تساوي (ك) وان حرارته النوعية (ح ن) فإن السعة الحرارية لذلك الجسم

سعح = الحرارة النوعية × الكتلة = ح ن × ك

لكن كمية الحرارة (ح) = ح ن × ك × (د2–د1) = = سعح × (د2 – د1)

و من ملاحظتنا للمعادلة السابقة نجد أنه إذا كان الجسم مصنوع من مواد مختلفة فإنه من الأنسب وصف التغير الحاصل في طاقته الداخلية بمساعدة السعة الحرارية .

ومن المعادلة السابقة أيضا نجد أن:

$$\text{سعح} = \frac{\text{ح}}{\text{د2} - \text{د1}}$$

ومن المعادلات السابقة نجد أن وحدة السعة الحرارية هي: $\frac{\text{جول}}{\text{درجة}}$ ، $\frac{\text{كيلو سعر}}{\text{درجة}}$ ، $\frac{\text{سعر}}{\text{درجة}}$

مثال (1): أحسب السعة الحرارية لكتلة من النحاس مقدارها 20 كغم إذا علمت أن حرارتها النوعية 380 جول\(كغم درجة)

الحل:

سعح = ح ن × ك

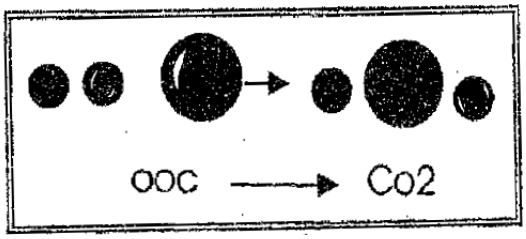
سعح = 380 $(\frac{\text{جول}}{\text{كغم.درجة}})$ × 20 كغم = 7600 $\frac{\text{جول}}{\text{درجة}}$

طاقة حرق الوقود

من المعروف أن المادة تتكون من ذرات فجزئية الماء H_2O مثلا تتكون من ذرة أوكسجين واحدة متحدة مع ذرتي هيدروجين. لقد أثبتت التجارب أن تكون الجزيء من ذرات منفصلة، مثلا ذرة أوكسجين وذرتي هيدروجين التي تكون (جزيء الماء)، يؤدي إلى إعطاء طاقة إلى الوسط الخارجي، بينما تجزئة الجزيء نفسه إلى ذراته المكونة له يتطلب صرف طاقة كافية للتغلب على قوى التجاذب بين الذرات المكونة لذلك الجزيء، ويمكن فهم عملية الارتباط بين ذرات الجزيء بالمثال التالي:

إن بين الأرض وكل الأجسام الموجودة عليها توجد قوة جذب، فإذا رفعنا جسما من سطح الأرض، تطلب ذلك صرف شغل للتغلب على جاذبية الأرض، وعلى العكس إذا ترك ذلك الجسم يسقط إلى الأرض بتأثير قوة جذب الأرض فإنه في هذه الحالة يمتلك طاقة وبإمكانه أن ينجز شغلا.

إن استعمال الوقود كالخشب والفحم والنفط وغيره أثناء الحرق يستند إلى حقيقة أن تكون الجزيء من ذراته المنفصلة، يؤدي إلى إعطاء طاقة إلى الوسط المحيط، فالأنواع التي ذكرناها من الوقود تحتوي على عنصر الكربون في تركيبها، وعند الاحتراق فإن ذرة الكربون هذه تتحد مع ذرات الأوكسجين الموجودة في الهواء، حيث أن كل ذرة كربون تتحد بذرتين من الأوكسجين، كما في الشكل (13) لتكون جزئية من غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2، وأن هذا الاتحاد يؤدي إلى إعطاء طاقة حرارية.



شكل (13)

توجد في الطبيعة أنواع مختلفة من الوقود منها الفحم الحجري والفحم النباتي، الخشب، النفط، الغاز القابل للاشتعال .. الخ، وعند تصميم المحركات التي تشتغل بالوقود، يجب أن نعرف بالضبط كمية الحرارة التي يعطيها ذلك الوقود عند حرقه، وهذا يستلزم معرفة كمية الحرارة التي نحصل عليها من حرق كميات متساوية من أنواع مختلفة من الوقود عن طريق التجربة.

إن كمية الحرارة الناتجة من الحرق الكامل للكيلو غرام واحد من الوقود تسمى **حرارة حرق الوقود**، والتي يمكن تحديدها في المختبر باستعمال أجهزة معقدة التركيب وهي تقاس بوحدات : $\frac{\text{جول}}{\text{كغم}}$ ، $\frac{\text{كيلو سعر}}{\text{كغم}}$ ، $\frac{\text{سعر}}{\text{غم}}$ وفي الجدول التالي مقادير حرارة حرق بعض أنواع الوقود.

جدول يبين حرارة حرق الوقود

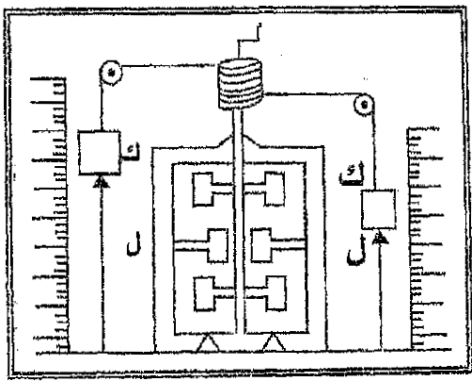
الوقود	جول / كغم	كيلو سعر / كغم	الوقود	جول / كغم	كيلو سعر / كغم
خشب جاف	1.0×10^7	2500	غاز طبيعي	4.4×10^7	10400
فحم نباتي	1.4×10^7	3400	النفط	4.4×10^7	10500
فحم حجري	2.9×10^7	7000	البنزين	4.6×10^7	11000
الكحول	2.7×10^7	6500	الكيروسين	4.6×10^7	11000
فحم الخشب	3.1×10^7	7000	الهيدروجين	14×10^7	34000

ومن الجدول السابق يتضح أن حرارة حرق فحم الخشب تساوي 3.1×10^7 $\frac{\text{جول}}{\text{كغم}}$ أو ما يعادل 7000 $\frac{\text{كيلو سعر}}{\text{كغم}}$، وهذا يعني أن الحرق الكامل لكغم واحد من فحم الخشب يؤدي إلى إعطاء 3.1×10^7 $\frac{\text{جول}}{\text{كغم}}$ أو ما يعادل 7000 $\frac{\text{كيلو سعر}}{\text{كغم}}$ من الحرارة. وان كمية الحرارة الناتجة من حرق أي كتلة من الوقود تساوي (حرارة حرق الوقود × كتلته المحترقة بشكل تام).

تغير الطاقة الداخلية في عملية إنجاز الشغل – تجربة جول:

أن الظواهر الحرارية في الأجسام مشروطة بحركة جزيئاتها وذراتها، لكن عملية تسخين الجسم لا تتم فقط بطريقة انتقال الحرارة من جسم إلى آخر **(عملية تبادل حراري)** وإنما تتم أيضاً عند إنجاز شغل على الجسم بطرقة أو تغيير شكله أو دلكه، وهنا يطرح السؤال التالي: هل أن مقادير الشغل المتساوية المنجزة على جسم تنتج كميات حرارة متساوية من كل حالة من حالات إنجاز الشغل؟

وللإجابة على هذا السؤال أجرى العالم د. جول عام 1843م تجربة مبينة في شكل (14)، فالثقلان (ك) في الجهاز المبين في الشكل معلقان بخيطين يمران حول بكرتين ويلفان على إسطوانة، يمكن تدويرها يدويا، وهذه الإسطوانة الدوارة متصلة بوتد يدخل داخل مسعر الخلط وقد ربطت صفائح دوارة (تدور مع الوتد عند دورانه). أما مسعر الخلط، فقد صمم بشكل خاص، إذ يحتوي على صفائح ثابتة، وتوجد بين صفائح المسعر الثابتة هذه وصفائح الوتد الدوارة مسافات صغيرة لغرض زيادة الاحتكاك داخل المسعر.



شكل (14)

عمل الجهاز:

ترتفع الأثقال إلى أعلى بواسطة تدوير الأسطوانة كما مبين في الشكل، ثم يثبت المقبض لمنع الإسطوانة من الدوران العكسي ونزول الأثقال بعدها يملىء المسعر بسائل مثل الماء وعند تحرير مقبض الإسطوانة تهبط الأثقال (ك) من الجهتين فتنزل بفعل جاذبية الأرض إزاحة مقدارها (ل) مؤدية بذلك إلى تدوير الأسطوانة والتي بدورها تؤدي إلى تدوير صفائح الوتد الدوارة، وعند إهمال الاحتكاك في البكرات الصغيرة فإنه يمكن القول بأن الطاقة الميكانيكية التي تعادل الشغل الذي أنجزه نزول الأثقال (ك) والذي يساوي (2× ك×ل) تتحول إلى طاقة داخلية للمسعر والماء الموجود في داخله الا أن هذه الطاقة الميكانيكية تؤدي إلى تسخين المسعر ومحتوياته من الماء.

وعند قياس درجة حرارة المسعر بواسطة الثرمومتر، يمكن لنا تحديد العلاقة بين الشغل الميكانيكي المنجز من نزول الأثقال (ك) والزيادة الحاصلة في الطاقة الداخلية للمسعر ومحتوياته. لقد وجد باستخدام هذه التجربة أن تسخين 1 كغم من الماء من 19.5 °C الى 20.5 °C يستلزم صرف طاقة (شغل) مقدارها 4186.8 جولا وهذا يعني أن الحرارة النوعية للماء (ح ن) = 4186.8 ($\frac{\text{جول}}{\text{كغم.درجة}}$).

لكن (ح ن) للماء= 1 ($\frac{\text{جول}}{\text{كغم.درجة}}$) (1 كيلو سعر = 4186.8 جولا)

وعند تقريب هذا المقدار نجد ان (1 كيلو سعر = 4190 جولا)

تمدد المواد بالحرارة

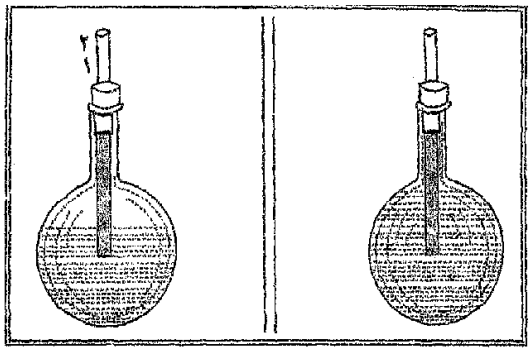
لماذا وكيف تتمدد المواد بالحرارة؟

أن للحرارة تأثيرات عددية على الأجسام من بينها أن جميع الأجسام عند تسخينها تتمدد وعند تبريدها تتقلص، ما عدا بعض المواد التي تشذ عن هذه القاعدة مثل الماء عندما يكون في حدود درجات حرارة معينة، حيث أن الزيادة في درجة حرارة الجسم يؤدي إلى زيادة متوسط الطاقة الداخلية لجزيئاته، وهذا يعني أيضا زيادة متوسط الطاقة الحركية التي تمتلكها جزيئات الجسم مما يؤدي إلى تمدد الجسم عند ارتفاع درجة حرارته، أما إذا انخفضت درجة حرارة الجسم، فإن هذا يؤدي إلى انخفاض متوسط الطاقة الحركية لجزيئاته أيضا وبالتالي يؤدي إلى تقلص الجسم.

والآن تجري التجربة التالية لإيضاح هذه الخاصية:

1. لنأخذ قطعة من أنبوب زجاجي مفتوح الطرفين وندخل فيه كمية صغيرة من الزئبق ثم ندخل الأنبوب في دورق خلال سداد فليني، يغلق الدورق بإحكام، كما في الشكل (15). ثم نسخن الهواء الموجود في الدورق (حرارة اليد كافية لتسخينه) سنلاحظ تحرك عمود الزئبق الموجود في الأنبوبة إلى الأعلى دلالة على تمدد الهواء عند التسخين.

2. لنضع في دورق ماء ملون ولنغلقه بإحكام بواسطة سداد يخترقه أنبوب زجاجي كما في الشكل (16) بحيث يرتفع الماء الملون إلى العلامة (1) على الأنبوبة الزجاجي فإذا سخنا الدورق سنلاحظ أن الماء الملون يرتفع إلى الأعلى حتى العلامة (2) دلالة على تمدد الماء عند تسخينه.



شكل (15-16)

لقد أكدت التجارب، أن تمدد السوائل أقل من تمدد الغازات، وأن المواد الصلبة ايضا تتمدد بالحرارة ولكن تمددها أقل من تمدد السوائل، وأن هذا التمدد يمكن إظهاره بالتجربة التالية:

فإذا أخذنا كرة معدنية يمكن أن تدخل بسهولة خلال حلقة معدنية في درجة حرارة الغرفة، فعند تسخين هذه الكرة إلى درجات حرارة أعلى نلاحظ عدم إمكانية دخولها خلال الحلقة.

<u>التمدد الطولي للمواد الصلبة</u>

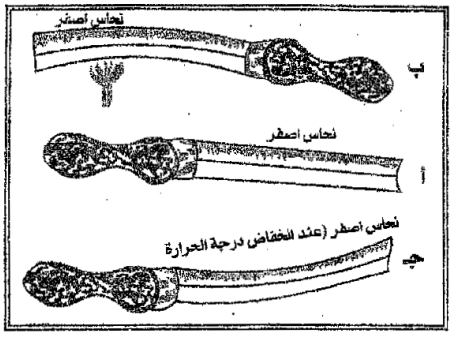
في حالات كثيرة تدعو الحاجة في التكنولوجيا إلى حساب التغير الحاصل في أبعاد المواد الصلبة في اتجاه واحد فقط، مثل حساب التغير في طول أسلاك الكهرباء بين عمود وآخر من أعمدتها وليس حساب مقدار التغير في قطر تلك الأجسام عند زيادة درجة الحرارة أيام الصيف أو انخفاضها أيام الشتاء ففي الصيف تزداد درجة الحرارة فتتمدد أسلاك الكهرباء ويزداد طولها، بينما في الشتاء تنخفض درجة الحرارة فتتقلص تلك الأسلاك ويقصر طولها. إن التغير الحاصل في بعد واحد من أبعاد الجسم عند تغير درجة الحرارة درجة مئوية واحدة يدعى بالتمدد الطولي أو التقلص الطولي في حالة انخفاض درجة الحرارة درجة مئوية واحدة .

فإذا رمزنا إلى طول الجسم الأصلي في درجة حرارة (د ^{o}م) بالرمز (ل$_{o}$) ورمزمنا إلى طوله في درجة حرارة (د ^{o}م) بالرمز (ل)، فإن التمدد الطولي للجسم Δل= ل$_{د}$ – ل$_{o}$، وقد أكدت التجربة أن التمدد الطولي للجسم عند التسخين يتناسب طرديا مع طول الجسم الأصلي ومع مقدار الزيادة في درجة الحرارة (Δد). ولهذا فإن الزيادة في طول الجسم يمكن وصفها في الصيغة الرياضية:

Δل **(يتناسب طرديا مع)** ل$_{o}$ × Δد

ومنه نجد أن

Δل = م $_{ط}$ × ل$_{o}$ × Δد .....(1)



شكل (17)

حيث أن (مط) معامل التناسب هو مقدار واحد لجميع الأجسام المصنوعة من مادة واحدة كما تؤكد التجارب، ولكنه يختلف بالنسبة للأجسام المصنوعة من مواد مختلفة، ويطلق عليه اسم معامل التمدد الطولي، ويرمز له بالرمز (مط).

لناخذ شريطا معدنيا مزدوجا وهو عبارة عن شريطين معدنيين مختلفين مثل الحديد والنحاس وقد ثبتا فوق بعضهما باللحام أو بالمسامير، كما في الشكل (17)

فلو كان التسخين يؤدي إلى تمدد المعادن المختلفة بمقدار واحد، فإن الشريط المزدوج سوف يبقى على استقامته دون تقوس ولكن التجربة تثبت أن تسخين الشريط المزدوج يؤدي إلى تقوسه بحيث يكون النحاس، الشريط الخارجي من القوس لأن تمدد النحاس أكبر من تمدد الحديد، عندما يكون المعدنان في ظروف تسخين واحدة.

إن معامل التمدد الطولي (مط) = $\frac{\Delta ل}{ل_{o} \times \Delta د}$ .....(2)

ومن المعادلة (2) يمكن أن نعرف معامل التمدد الطولي، بأنه نسبة الزيادة الحاصلة في طول الجسم إلى طوله الأصلي، عند ارتفاع درجة الحرارة بالتسخين درجة مئوية واحدة، أما وحدة قياس (مط) هي (درجة)$^{-1}$ كما نستنتج من المعادلة رقم (2).

نشير هنا إلى أن (م ط) يزداد بازدياد درجة الحرارة ولكن تلك الزيادة قليلة جدا إلى حد يمكن إهمالها فيه وخاصة عند عدم حدوث تغير في درجة الحرارة ولهذا يعتبر (م ط) مقدارا ثابتا لكل مادة. في الجدول التالي قيم (م ط) التي استحصلت بالتجربة.

جدول يوضح قيم معامل التمدد الطولي لبعض المواد

المادة	م ط (درجة)$^{-1}$	المادة	م ط (درجة)$^{-1}$
الالمنيوم	0.000023	النحاس	0.00017
البرونز	0.000018	الرصاص	0.000028
الفولاذ	0.000012	الزجاج	0.000009
الذهب	0.000014	الابونايت	0.000070

ملحوظة: اشتقاق وحدة قياس م ط.

م ط = $\frac{\Delta ل}{ل_{o} \times \Delta د}$ = $\frac{\text{سم}}{\text{سم} \times \text{درجة}}$ = (درجة)$^{-1}$

وبما أن Δ ل = ل$_{د}$ – ل$_{o}$ ، Δ د = د – د$_{o}$.

$$م_{ط} = \frac{ل_د - ل_o}{ل_o \times (د - د_o)}$$

ومنه نجد ان:

$$ل_د = ل_o \ [1 + م_{ط} (د - د_o)] \quad .....(3)$$

اي ان الطول النهائي بعد التسخين (ل) يساوي حاصل ضرب الطول الاصلي ($ل_o$) مضروبا (1 + حاصل ضرب معامل التمدد الطولي في فرق درجات الحرارة).

مثال (1): أحسب الطول النهائي لقضيب نحاسي طوله 100cm في درجة 20 C° عند تسخينه إلى درجة 120C° ، ($م_{ط}$) للنحاس 0.000017 درجة $^{-1}$.

الحل

$$ل_د = ل_o [1 + م_{ط} (د - د_o)]$$

$$ل_{120} = 100 \text{ cm} \times [1 + 0.000017 \text{ C°}] = 100 \text{ cm} \times [1 + 0.000017 \times (120 - 20) \text{ C°}^{-1}] = 100.17 \text{ cm}$$

$ل_{120}$ = الطول النهائي بعد التسخين.

التمدد الحجمي للأجسام ($م_ح$)

التمدد الحجمي هو تمدد الجسم في جميع الاتجاهات، وسوف نتطرق هنا فقط إلى الأجسام التي يكون تمددها الحجمي متماثلا. فإذا رمزنا إلى حجم الجسم الأصلي ($ح_o$) وإلى حجمه في درجة د ^{o}م يساوي ($ح_د$)، فإن التغير في الحجم:

$$\Delta ح = ح_د - ح_o$$

إن التغير في حجم الجسم عند التسخين ($\Delta ح$) هو الآخر يتناسب طرديا مع الحجم الأصلي ($ح_o$) ومع تغير درجة الحرارة ($\Delta د$)، أي أن:

$$\Delta ح = م_ح \times \Delta د$$

ومعامل التناسب ($م_ح$) يسمى معامل التمدد الحجمي وهو كمية فيزيائية تبين علاقة التمدد الحجمي بنوع مادة الجسم، ومن المعادلة السابقة نجد أن:

$$م_ح = \frac{\Delta ح}{ح_o \times \Delta د} = \frac{cm}{cm \times \text{درجة}} = (\text{درجة})^{-1}$$

ومن المعادلة السابقة واضح أن وحدة قياس معامل التمدد الحجمي (درجة)$^{-1}$ أيضا.

وبما أن $\Delta ح = ح_د - ح_o$ ، $\Delta د = د - د_o$

$$م_ح = \frac{ح - ح_o}{ح_o \times (د - د_o)}$$

ومنه نجد ان:

ح د = ح$_{o}$ [1+م$_{ح}$ (د–د$_{o}$)]

أي أن الحجم النهائي للجسم = الحجم الأصلي ×(1+ معامل التمدد الحجمي × فرق درجات الحرارة).

<u>علاقة كثافة المادة بدرجة حرارتها</u>

إن مقدار كتلة الجسم لا يتغير بتغير درجة الحرارة بينما يتغير حجم الجسم عند تغير درجة الحرارة، وعلى هذا الأساس فإن كثافة مادة الجسم (ث) يجب أن تتغير بتغير درجة الحرارة. فإذا فرضنا أن الكثافة الأصلية (ث$_{o}$) فإن:

$$ث_{o} = \frac{ك}{ح_{o}} \quad .....(أ) \quad \text{(الكثافة الاصلية)}$$

ولكن عند تغير درجة الحرارة فتصبح مساوية إلى (د ^{o}م)، فإن:

$$ث_{د} = \frac{ك}{ح_{د}}$$

لكن ح د = ح$_{o}$ [1+م$_{ح}$ (د–د$_{o}$)] وعلى هذا الأساس فإن:

$$ث_{د} = \frac{ك}{ح_{o}(1+م_{ح}\times(د-د_{o}))} \quad .....(ب)$$

ومن قسمة طرفي المعادلة رقم (ب) على طرفي المعادلة رقم (أ) نجد أن:

$$ث_{د} = \frac{ث_{o}}{\left(1+م_{ح}\times\left(د-د_{o}\right)\right)}$$

أي أن كثافة المادة في أي درجة حرارة تساوي كثافتها في درجة الصفر المئوي، مقسومة على مجموع (1+ معامل التمدد الحجمي × فرق درجات الحرارية).

ومن المعادلة الأخيرة نجد أن كثافة المادة تقل بازدياد درجة الحرارة، ولكنها تزداد في حالة انخفاض درجة الحرارة.

<u>خصوصية تمدد المواد الصلبة بالتسخين</u>:

العلاقة بين معاملي التمدد الحجمي والطولي (م ط، م ح):

لقد جرت العادة إعطاء قيم معامل التمدد الطولي في الجداول فقط ولا ندرج فيها معامل التمدد الحجمي وذلك بسبب بساطة حساب معامل التمدد الحجمي إذا عرفنا معامل التمدد الطولي، ذلك أن معامل التمدد الحجمي يساوي تقريبا ثلاثة أمثال معامل التمدد الطولي، أي أن:

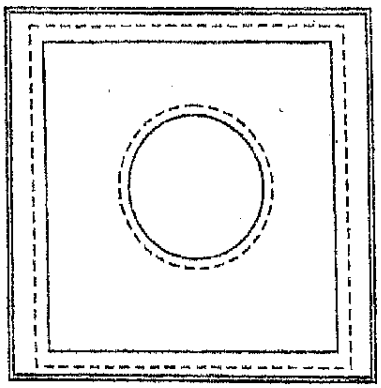
م ح = 3× م ط معامل التمدد الحجمي يساوي (3 × مقدار معامل التمدد الطولي).

وعلى هذا الأساس فإن معادلة الحجم النهائي ستأخذ الشكل التالي:

ح د= ح$_{o}$ [1 + 3 م$_{ط}$ (د–د0)]

زيادة كبر الثقوب الموجودة في الأجسام الصلبة عند تسخينها

* لنفرض وجود صفيحة معدنية حاوية على ثقب كروي في وسطها كما في الشكل (18)، فالتجربة تبين لنا أن ارتفاع درجة حرارة الصفيحة يؤدي ليس فقط إلى زيادة مساحتها بل ويؤدي كذلك إلى زيادة كبر الثقب الموجودة فيها، وهذا موضح في الشكل بالخطوط المنقطة، ومثل هذه النتيجة المختبرية تبدو غريبة للوهلة الأولى، إذ لو فرضنا أن الصفيحة تتمدد خارجا وداخلا (داخل الثقب) عند التسخين، فإن ذرات المعدن الموجودة على محيط الثقب ستقترب من بعضها البعض وسيصغر بذلك محيط الثقب، ولكننا نعرف أن التسخين يؤدي إلى زيادة المسافات بين ذرات المعدن وليس إلى نقصانها.



شكل (18)

* فإذا رسمنا دائرة على صفيحة غير مثقوبة فإن تسخين الصفيحة سوف يؤدي على هذا الأساس إلى زيادة محيط الدائرة المرسومة حتى ينطبق على الخط المنقط كما مبين في الشكل (18) عند بلوغها نفس درجة حرارة الشق الأول من التجربة. لهذا فإن الثقوب والتجاويف في الجسم الصلب تزداد عند التسخين، وتقل عند التبريد (أي تتناقص).

خصوصية تمدد السوائل

في الفقرات السابقة ذكرنا أن السوائل تتمدد بالحرارة أكثر مما هو عليه في المواد الصلبة، وهذا يمكن ملاحظته عند مقارنة معاملات التمدد الحجمي للسوائل مع معاملات التمدد الحجمي للمواد الصلبة، الجدول التالي يبين قيم معامل التمدد الحجم لبعض السوائل.

جدول المعاملات التمدد الحجمي لبعض السوائل (درجة $^{-1}$)

السائل	م ح	المادة	م ح
الاسبتون	0.0014	الماء عند درجة حرارة	
الكلسرين	0.0005		
الكيروسين	0.0010	5 – 10 م^{o}	0.00053
الزئبق	0.00018	10 – 20 م^{o}	0.000150
الكحول الاثيلي	0.0010	20 – 40 م^{o}	0.000302

أن تسخين إناء يحتوي على سائل لا يؤدي إلى تمدد السائل فحسب، وإنما يؤدي أيضا إلى تمدد الإناء نفسه، ولما كان تمدد السوائل أكبر من تمدد المواد الصلبة بشكل عام فإن تمدد السوائل على الدوام أكبر من تمدد الأواني

الحاوي لها، وأن ملاحظة زيادة حجم السوائل الموجودة في الأواني أثناء التسخين دليل على ذلك. وهكذا فإن التمدد المنظور للسائل أثناء التسخين يكون دائما أقل من تمدد السائل نفسه (تمدده الحقيقي).

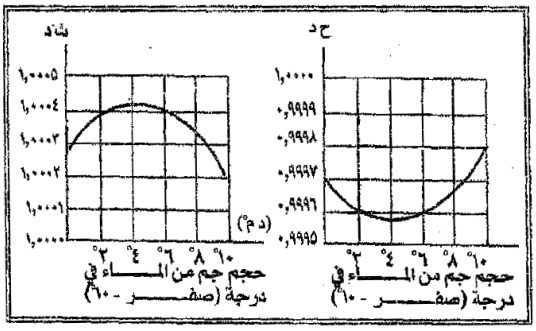
إن التمدد المنظور للسائل يطلق عليه اسم **التمدد الظاهري**، ولهذا يمكن القول بأن التمدد الحقيقي للسوائل عند التسخين يساوي التمدد الظاهري مضافا إليه تمدد الإناء الذي يحتوي على السائل، لذا:

التمدد الحقيقي = التمدد الظاهري + تمدد الإناء

<u>شذوذ تمدد الماء</u>:

ذكرنا في الفقرات السابقة أن جميع المواد تتمدد بالحرارة ما عدا بعض المواد التي تشذ عن هذه القاعدة، والماء من بين هذه المواد، فالتجربة تبين أن الماء عند ارتفاع درجة حرارته من الصفر المئوي إلى 4 C^o يتقلص حجمه .

وعند انخفاض درجة حرارته من 4 C^o إلى الصفر المئوي يتمدد فيزداد حجمه ولكن عندما تبدأ درجة حرارة الماء بالارتفاع ابتداء من 4 C^o فإنه يتمدد ويزداد حجمه وعلى هذا الأساس فإن حجم كتلة من الماء يبلغ في 4 C^o أقل ما يمكن مما يؤدي إلى أن تكون كثافته أكبر ما يمكن، كما في الشكل (19).



شكل (19)

إن هذه الظاهرة تلعب دورا كبيرا في الطبيعة حيث أنها تقي الأحياء المائية من التجمد فتساعدها على البقاء في المناطق الباردة ذلك أن مياه سطح الأنهار والبحيرات والمحيطات في هذه المناطق تنخفض درجة حرارتها إلى4 C^o تزداد كثافتها لتنزل إلى الأعماق، إذا استمرت درجة حرارة الهواء بالإنخفاض فإن مياه السطح تبدأ بالتمدد فتقل كثافتها لذلك تجمد مياه سطح الأنهار والبحيرات وحتى المحيطات، بينما تبقى درجة حرارة مياه الأعماق 4 C^o مما يجنب الأحياء المائية من التجمد ويمكنها من العيش كما ذكرنا.

مثال (1):

أ. أحسب كم سيكون حجم 100 L من الكيروسين في درجة الصفر المئوي، عندما ترتفع درجة الحرارة إلى 40 C^o علما بأن معامل التمدد الحجمي للكيروسين يساوي 0.0010 $(C^o)^{-1}$ (أحسب الحجم باللتر).

الحل

$$L\ 100 = L\ 100 \times 1000\ L/cm^3$$

$$L\ 100 = 100000\ cm^3$$ حجم الكيروسين عند درجة (0) C^o

$$ح_د = ح_o [1+م_ح (د-د_o)]$$

ح$_{40}$ = 1000000 cm^3 × [1+ 0.0010 $C^{o\,-1}$ (0−40) C^o] ~~C^o~~

ح$_{40}$ = 100000 cm^3 × 1.04 = 104000 cm^3 × $\frac{L}{1000\ cm^3}$

ح$_{40}$ = 104 لتر حجم الكيروسين في درجة حرارة (40 C^o)

ب) قنينة حجمها يساوي 400 cm^3، ملئت إلى حافتها بالزئبق وسخنت من الصفر المئوي إلى درجة 100 C^o، خرج من القنينة الزجاجية عند التسخين مقدار من الزئبق بقدر 6.12 cm^3، المطلوب حساب معامل التمدد الحجمي للزئبق، إذا علمت أن (م ط) للزجاج = 0.000009 $C^{o\,-1}$.

الحل

حجم القنينة في درجة الصفر المئوي= 400 cm^3

ح= 400 cm^3 × 4 × 10^{-4} m^3 \ [cm^3 $(100)^3$] = m^3

خرج من الزئبق عند التسخين حجم مقداره 6.12 cm^3

ح $_{ظ}$= 6.12 cm^3 (التمدد الظاهري للزئبق)

= 6.12 cm^3 × m^3 \ [cm^3 $(100)^3$] = 6.12 × 10^{-6} m^3

معامل التمدد الحجمي للزجاج= 3 × معامل التمدد الطولي

معامل التمدد الحجمي للزجاج = 3 × 0.000009 $(C^o)^{-1}$ = 0.000027 $(C^o)^{-1}$

م ح (زئبق) = $\frac{\Delta ح}{\Delta د \times ح_o}$ لكن Δح (الحقيقية) = Δح (الظاهرية) + Δح (زجاج)

أي أن الزيادة الحقيقة = الزيادة الظاهرة + الزيادة في حجم الزجاج

الزيادة في حجم الزجاج = م ح (زجاج) × $ح_o$ × Δد

م ح (زئبق)= الزيادة الحقيقية \(الحجم الأصلي × فرق درجات الحرارة)

م ح (زئبق)= $\frac{6.12\times10^{-6}\ m^3+0.000027\ C^{-1}\times4\times10^{-4}m^3\times100C}{4\times10^{-4}m^3\times(100-0)C}$ = $\frac{(6.12\times10^{-6}+1.08\times10^{-6})m^3}{4\times10^{-4}m^3\times100C}$

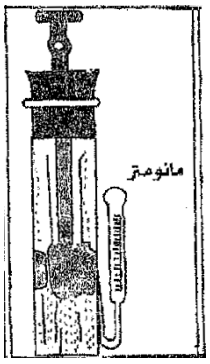
م ح (زئبق)= 0.00018 $C^{o\,-1}$

تمدد الغازات

عند إجراء أية عملية على غاز، فإن عوامله الثلاث (الحجم والضغط ودرجة الحرارة) سوف تتغير جميعها في آن واحد، لكن أبسط العمليات التي تجري على الغاز، هي التي تحصل نتيجة لظروف يمكن من خلالها أن يتغير عاملان فقط من هذه العوامل الثلاث، مثل تغير الضغط والحجم، وبقاء درجة الحرارة ثابتة، أو تغير الضغط ودرجة الحرارة وبقاء الحجم ثابتا، أو تغير الحجم ودرجة الحرارة وبقاء الضغط ثابتا.

وإن مثل هذه العمليات تسمي **بعمليات التساوي**، فالعملية التي تجري بتغير الضغط والحجم والتي تبقى خلالها درجة حرارة الغاز ثابتة دون تغير تسمى عملية تساوي درجة الحرارة **(عملية إيزوثيرمية)** والعملية التي تجري على الغاز بتغير الضغط ودرجة الحرارة وبقاء حجمه ثابتة دون تغير، تسمى عملية تساوي الحجم **(عملية أيزوكورية)** أما العملية التي يكون فيها الضغط ثابتا ويتغير الحجم ودرجة الحرارة فتسمى عملية تساوي الضغط **(عملية أيزوبارية)**.

العملية الإيزوثيرمية – قانون بويل– ماريوت



شكل (20)

كما ذكرنا في هذه العملية التي تجري على الغاز تبقي درجة الحرارة ثابتة بينما يتغير حجم الغاز وضغطه. ففي الشكل (20) جهاز لإجراء عملية إيزوثيرمية على الغاز، والجهاز محكم الإغلاق ويتكون من اسطوانة تحتوي على كمية ثابتة من الغاز، وفيها مكبس يمكن تحريكه صعودا ونزولا بحيث يمكننا من التحكم بحجم الغاز داخل الأسطوانة كما يوجد في الأسطوانة مقياس الضغط الغاز، مانوميتر (ن).

في الحالة الأولى: حجم الغاز بقدر حجم الأسطوانة لأن المكبس في أعلاها، نقرأ المانوميتر ونسجل مقدار ضغط الغاز فإذا كان حجم الغاز في هذه الحالة= $ح_1$ فإن ضغطه= $ض_1$

في الحالة الثانية: حجم الغاز نصف حجم الأسطوانة، وعندما نقرأ الضغط نجده ضعف مقدار الضغط الأول، أي عندما:

$$ح_2 = \frac{1}{2} ح_1 \quad \leftarrow \quad ض_2 = 2 \ ض_1$$

في الحالة الثالثة: حجم الغاز ثلث حجمه الأصلي، وعندما نقرأ الضغط تجده يساوي ثلاثة أمثال ضغطة الأولى، أي عندما:

$$ح_3 = \frac{1}{3} ح_1 \quad \leftarrow \quad ض_3 = 3 \ ض_1$$

وهكذا نلاحظ أن ضغط الغاز عندما تكون درجة الحرارة ثابتة يتغير عكسية مع الحجم، أي أن:

$$\frac{ض_1}{ض_2} = \frac{ح_2}{ح_1} \quad \text{او} \quad ض_1 \times ح_1 = ض_2 \times ح_2 = \text{كمية ثابتة}.$$

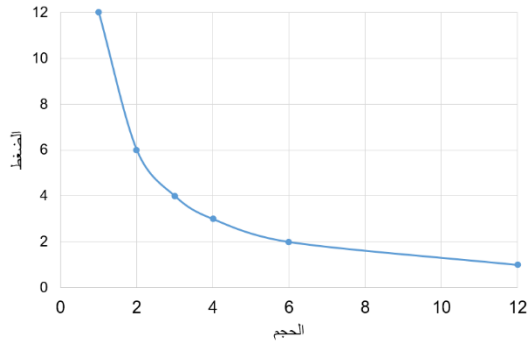
لهذا فإن الحرارة النوعية للمواد بوحدات جول\(كغم.درجة) تساوي حاصل ضرب، مقدارها بوحدات كيلو سعر\(كغم.درجة) × 4190 جول \ كيلو سعر

إن هذه الحقيقة تكون اساس قانون بويل– ماريوت الذي ينص على أن: (حجم كمية معينة من غاز × ضغطه عند ثبوت درجة الحرارة يساوي كمية ثابتة).

أي ان: ض × ح = كمية ثابتة

وفي الجدول أدناه فإن قيم الضغط والحجم لكمية معينة من غاز وجدت بالتجربة عند ثبوت درجة الحرارة وقد رسم على أساسها الخط البياني الذي يبين علاقة الضغط بالحجم عند ثبوت درجة الحرارة، كما في الشكل (21)

ح	12	6	4	3	2	1
ض	1	2	3	4	6	12



شكل (21)

وكما ذكرنا فإن كتلة الغاز تبقى خلال العملية الأيزوثيرمية مقدرا ثابتا، ولنفرض انه يساوي (ك) فإذا كان حجم الغاز في الحالة الأولى ($ح_1$) فإن كثافة الغاز تساوي ث وعليه فإن:

$$ث_1 = \frac{ك}{ح_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (أ)$$

وعندها يتغير الحجم إلى ($ح_2$) فإن كثافة تصبح ($ث_2$) وعليه فإن:

$$ث_2 = \frac{ك}{ح_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (ب)$$

ومن قسمة العلاقتين (أ) و (ب) نجد:

$$\frac{ث_1}{ث_2} = \frac{ح_2}{ح_1} \quad \text{لكن} \quad \frac{ض_1}{ض_2} = \frac{ح_2}{ح_1} \quad \text{(من قانون بويل – ماريوت)}$$

وعليه فإن

$$\frac{ث_1}{ث_2} = \frac{ض_1}{ض_2}$$

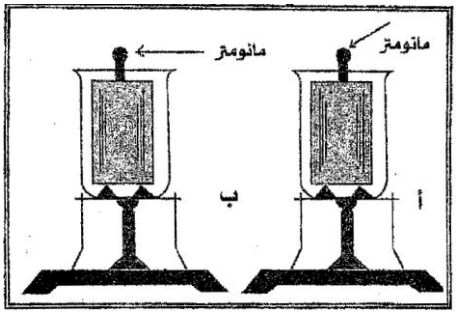
ومن المعادلة السابقة نستنتج أن كثافة الغاز تتناسب طرديا مع الضغط الواقع علية عند ثبوت درجة الحرارة.

تعريف الغاز المثالي

هو الغاز الذي يبقى على حالته الغازية عند أية درجة حرارة، كما انه عند أي ضغط يخضع لقانون بويل– ماريوت، أي أن حجمه يتناسب عكسيا مع ضغطه عند ثبوت درجة الحرارة. إن الغالبية العظمى من الغازات المعروفة مثل الأوكسجين، النتروجين، الهيدروجين والهليوم تعتبر غازات مثالية.

العملية الأيزوكورية – قانون شارل:

في هذه العملية التي تجري على الغاز، يبقى الحجم ثابتا بينما يتغير الضغط ودرجة الحرارة. ففي الشكل (22) جهاز لإجراء عملية أيزوكورية محكم الإغلاق ويتكون من اسطوانة معدنية تحتوي على غاز وفي الأسطوانة مقياس الضغط الغاز – مانوميتر (ن)، توضع هذه الأسطوانة في إناء، ويحتاج في هذه العملية إلى إناء وحامل ومسخن (مصباح بنزن) وإلى جليد وماء ولما كان تمدد أو تقلص المواد الصلبة أقل من تمدد أو تقلص الغاز فهو يمكن إهماله بالنسبة لحجم الغاز داخل الأسطوانة. فإذا أحطنا الأسطوانة المعدنية الحاوية على الغاز في بداية القياس بالثلج، لاحظ الشكل (22) فإن درجة حرارة الغاز تساوي (صفر مئوي) وعند هذه الدرجة نقيس ضغطه وليكن (ض).



شكل (22)

أي عندما تكون درجة الحرارة (د)= صفر مئوي، الضغط=ض، وبعد ذلك نبدل الجليد بالماء ونبدا بالتسخين، ونقيس ضغط الغاز بواسطة جهاز المانوميتر (ن) في كل مرة تقيس فيها درجة الحرارة

فعند درجة الحرارة ($د_1$) .....ض = $ض_1$

وعند درجة الحرارة ($د_2$) ..... ض= $ض_1$ وهكذا.

لقد وجد بواسطة هذه التجربة أن التغير في ضغط الغاز (Δض) يتناسب طردية مع ضغطة الابتدائي (ض) ومع التغير في درجة الحرارة (Δد).

أي أن: Δض يتناسب $ض_o$ Δد

Δض = ثابت × $ض_o$ × Δد

Δض = $م_{ض}$ × $ض_o$ × Δد

حيث أن المقدار الثابت يسمى معامل الضغط الحراري ونرمز له بالرمز ($م_{ض}$) وهو معامل التناسب ويدعي بمعامل الضغط الحراري ومن المعادلة السابقة نجد أن قيمته هي:

$م_{ض}$ = Δض \ ($ض_o$ Δد)

ومن العلاقة الأخيرة نجد أن وحدة قياس ($م_{ض}$) هي (درجة$^{-1}$) لكن:

Δض = (ض– $ض_o$) ، Δد= (د– $د_0$) وبتعويض هذه القيم في المعادلة السابقة نجد إن:

ض – $ض_o$= $م_{ض}$ × $ض_o$× Δد

أو أن ض = $ض_o$ (1 + $م_{ض}$ × Δد)

ولقد وجد العالم الفرنسي شارل (1746–1823) أن معامل الضغط الحراري (مض) هو مقدار واحد في جميع الغازات وهو يساوي (1\273) كما وجد فيما بعد أن هذا القانون الذي يعرف بقانون شارل ينطبق على الغازات المثالية ذات الكثافة القليلة إذا كلما زادت كثافة الغاز المثالي كلما زاد اختلاف مقدار (مض) عن(1\273).

وعلى هذا الأساس فإن الغازات المثالية التي تكون كثافتها قليلة وأن تغير درجة حرارتها ليس كبيرة هي التي تخضع لقانون شارل وبناء على ما مر أعلاه فإن الصيغة الرياضية لقانون شارل تكون كالتالي:

$$ض = ض_{o} (1+ \frac{1}{273} د)$$

الصفر المطلق:

ذكر سابقا أن درجة الحرارة هي مقياس لمتوسط الطاقة الحركية لجزيئات الغاز الانتقالية وعلى هذا الأساس فإن انخفاض درجة الحرارة يعني أن الطاقة الحركية للجزيئات الانتقالية تقل بدورها أيضاً ومنه نستنتج أن الغاز يمكن تبريده حتى تتوقف جزيئاته عن الحركة الانتقالية وعلى هذا الأساس يجب أن تكون هناك حدود لانخفاض درجة الحرارة والتي تتوافق مع عدم وجود الحركة الانتقالية للجزئيات.

إن درجة الحرارة التي تتوقف عندها الحركة الانتقالية لجزيئات الغاز تسمى **بالصفر المطلق**، وعليه فإنه لا يمكن أن توجد في الطبيعة درجة حرارة أقل من درجة الصفر المطلق. وطالما كان الغاز المثالي يحتفظ بخواصه الغازية في جميع درجات الحرارة فإن المعادلة:

$$ض = ض_{o} (1+ \frac{1}{273} د)$$

يجب أن تنطبق أيضا على درجة الصفر المطلق، والتي يكون عندها ضغط الغاز يساوي صفرا.

وعليه فإن:

ض= 0 وبتعويض قيمة ض من صيغة قانون شارل نجد أن:

$$0 = ض_{o} (1+ \frac{1}{273} د)$$

لكن $ض_{o} \neq 0$

فإن $1+ \frac{1}{273} د = 0$ من العلاقة الأخيرة، نجد أن: $د = -273\ C°$.

أي أن درجة الصفر المطلق تساوي (C°273−) فعند هذه الدرجة توقف جزيئات الغاز المثالي عن الحركة الانتقالية، وقد وجد العالم الإنجليزي **كلفن**، أن درجات الصفر المطلق لا تخص الحركة الجزيئية في الغازات فقط، وإنما تخص الحركة الميكانيكية الانتقالية لجزئيات جميع المواد.

لقد جرى التوصل في المختبرات إلى درجة قريبة جدا من درجة الصفر المطلق حيث أن الدرجة التي تم التوصل إليها، لا تزيد إلا بمقدار 0.0044 C° عن (−273 C°).

قياس درجة الحرارة– التدرج المئوي والتدريج المطلق:

يستعمل الثرمومتر الزئبقي لأجل قياس درجة الحرارة، حيث يعمل على أساس التمدد المنتظم للزئبق عند تغير درجة الحرارة، في حدود واسعة، فقد وجد أن درجة تجمد الزئبق تبلغ (−39°C) وأن درجة غليانه تبلغ (357°C).

وعند تدريج الثرمومتر المئوي، وفقا للقياس العالمي، اتخذت درجة حرارة انصهار الجليد، كنقطة البداية القياس، كما اتخذت درجة حرارة غليان الماء عند الضغط الجوي الاعتيادي (760 ملمازئبق) كنقطة ثانية للقياس ثم قسمت المسافة بين هاتين النقطتين إلى 100 تقسيمة، سمي كل قسم منها (بالدرجة المئوية) وهكذا تكون درجة انصهار الجليد هي درجة الصفر المئوي، بينما تكون درجة غليان الماء في 100 درجة مئوية، وقد سمي هذا التدريج بالتدريج المئوي.

وكان العالم البريطاني كلفن قد اقترح تدريجا آخر لقياس درجة الحرارة، دعي بالتدريج المطلق، فطالما أن الصفر المطلق يتوافق مع أقل درجة حرارة ممكنة يمتلكها الجسم (−273 °C) فمن المناسب أن تؤخذ هذه الدرجة كنقطة بداية لقياس درجة الحرارة، بحيث يبقى طول التدريج الواحد، كما هو عليه في التدريج المئوي (الدرجة المئوية).

ووفق هذا الإقتراح تكون درجة انصهار الجليد مساوية إلى (0+273) = 273 مطلقة.

وان درجة غليان الماء مساوية إلى (100 +273)= 373 (مطلقة) وبشكل عام إذا كانت درجة حرارة الجسم بالتدريج المئوي تساوي (د) فإن درجة حرارته بالتدريج المطلق تساوي (د م) وأن العلاقة بين التدريجين هي كالتالي:

التدريج المطلق (د م) = د° + (273) م

قانون الغازات العام:

لنأخذ كمية معينة من غاز مثالي، ولنفرض في الحالة رقم (1) والتي تكون فيها درجة الحرارة= $د_1$، الضغط = $ض_1$، الحجم = $ح_1$ وعندما تكون درجة الحرارة $د_2$ سيكون الضغط = $ض_2$، الحجم= $ح_2$. فإذا فرضنا أيضا أن انتقال كمية الغاز المثالي هذه من الحالة رقم (1) إلى الحالة رقم (2) يتم على مرحلتين وفي المرحلة الأولى تجري عملية تحول الغاز بدون تغير الضغط (عملية إيزوبارية) إلى حالة مؤقتة (م) حيث تكون درجة الحرارة = $د_2$ والضغط = $ض_2$ (كمية ثابتة)، والحجم= ح م، وفي هذه الحالة المؤقتة تتحقق بالمعادلة التالية :

$$\frac{ح_1}{ح_م} = \frac{د_1}{د_2} \quad \ldots\ldots (أ)$$

أي أن الحجم بتناسب طرديا مع درجة الحرارة عند ثبوت الضغط ويدعى هذا بقانون **جاي لوساك**.

في المرحلة الثانية، يجري التحول بدون تغير درجة الحرارة (عملية أيزوثيرمية) وفيها تكون درجة الحرارة = $د_2$ (كمية ثابتة)، الضغط = $ض_2$، الحجم =$ح_2$، وبموجب قانون **بويل– ماريوت** فإن:

$$ح_م \times ض_1 = ح_2 \times ض_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (ب)$$

ومن المعادلة (أ) نجد ان $ح_م = ح_1 \frac{د_2}{د_1}$

بتعويض قيمة (ح م) التي أوجدناها من المعادلة (أ) في المعادلة (ب) نجد أن:

$ح_1 \times \frac{د_1}{د_2} \times ض_1 = ح_2 \times ض_2$ اي ان

$$\frac{ح_1 \times ض_1}{د_1} = \frac{ح_2 \times ض_2}{د_2}$$

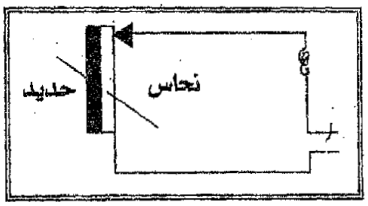
إن المعادلة السابقة تسمى **بالمعادلة العامة للغاز**، وتكون درجة الحرارة فيها بالمقياس المطلق.

أهمية ظاهرة تمدد المواد بالتسخين في الطبيعة والتكنولوجيا

في الطبيعة نجد أن عدم التسخين المتساوي للمياه بسبب اختلاف كثافتها من مكان إلى آخر والذي بدوره يكون أحد الأسباب في جريان مياه البحار والمحيطات، كما أن تذبذبات درجة الحرارة على مدى اليوم أو السنة، يؤدي إلى تمدد الصخور والتربة كما يؤدي إلى تقلصها الأمر الذي يسبب أحداث تشققات فيها وأحيانا يؤدي إلى تحطيم الكتل الصخرية.

وفي التكنولوجيا يحظى تمدد الأجسام بزيادة درجة الحرارة أو تقلصها عند انخفاضها بأهمية كبيرة، فعند بناء الجسور أو مد خطوط السكك الحديدية يستلزم حساب مقدار الزيادة أو النقصان المحتمل في أطوالها عند تغير درجة الحرارة على مدى اليوم أو السنة.

وفي صناعة خيوط مصابيح الإضاءة الكهربائية الذي يسخن أثناء الإضاءة إلى درجات حرارة عالية جدا فإن جزئه المار خلال الزجاج يصنع من مادة يكون تمددها مماثلا للتمدد الحجمي للزجاج، كذلك يستعمل الشريط المعدني المزدوج في الدائرة الكهربائية للثلاجة أو السيارة لتنظيم درجة حرارتها (ثرموستات) فهذا الشريط يكون عادة جزء من الدائرة الكهربائية بحيث يعمل على قطع الدائرة الكهربائية للجهاز عند زيادة درجة الحرارة عند حد معين كما في الشكل (23)، إذ أن زيادة درجة الحرارة، يؤدي إلى انحناء الشريط المزدوج فيقطع الدائرة الكهربائية، وعندما تنخفض درجة الحرارة يعود الشريط إلى حالته الأولى فينفصل التيار الكهربائي.



شكل (23)

لماذا وكيف تتمدد المواد بالحرارة؟

تغير حالة المادة

أن المادة يمكن أن تكون في حالة الصلابة أو السيولة أو الغازية، اعتمادا على كيفية انتظام وحركة جزيئاتها فالجليد يمكن تحويله بالتسخين إلى ماء، والماء يمكن تحويله بالتسخين أيضا إلى بخار.

وفي الطبيعة يجري تغير في حالات المادة أيضا، ولكن بمقياس أكبر، يشمل مساحات واسعة جدا، فنتيجة لتبخر مياه المحيطات والبحار والبحيرات وتصاعده في الغلاف الغازي للأرض تتكون السحب، وفي ظروف معينة يسقط

منها الأمطار، فتتكون الأنهار والبحيرات التي تتجمد في مناطق كثيرة من العالم بسبب فقدان كمية كبيرة من حرارتها أيام الشتاء.

أما في التكنولوجيا، فإن تحول المادة من حالة إلى أخرى يستغل على نطاق واسع في التطبيق العملي، فبخار الماء الذي يمكن الحصول عليه من تسخين الماء، يمكن استغلاله في تحريك القطارات والبواخر وتوربينات المحطات الكهربائية، كما أن غاز الأمونيا الذي يمكن اسالته في درجة الحرارة الاعتيادية باستخدام الضغط، حيث يستفاد منه على نطاق واسع في صناعة الثلاجات وأجهزة التبريد الأخرى، كذلك يستفاد من تحول المواد الصلبة من حالة إلى أخرى في صناعة السبائك المعدنية المختلفة كالفولاذ.

إن المسافات بين جزيئات الغاز، كما ذكرنا في ظروف الضغط الجوي الاعتيادي، اكبر بكثير من قطر الجزيء نفسه، ولذلك تكون قوى الجذب بين جزيئات الغاز في مثل هذه الظروف ضعيفة، وأن هذه الجزيئات تمتلك متوسط جزيئات الغاز نفسه، لذلك يستطيع الغاز أن يتمدد في جميع الجهات عند رفع الضغط عنه.

أما الأجسام السائلة والصلبة، التي كثافتها أكبر بعدة مرات من كثافة الغاز، لأن جزيئاتها تكون قريبة من بعضها البعض، فإن متوسط الطاقة الحركية التي تمتلكها هذه الجزيئات، غير كاف لإنجاز الشغل اللازم للتغلب على قوى التجاذب فيما بينها، لذلك فإن جزيئات المواد السائلة والصلبة، لا يمكنها أن تبتعد عن بعضها البعض.

وبالإضافة إلى ذلك فإن جزيئات المادة الصلبة تترتب في انتظام معين، إذا حاولنا أن نغيره فإننا نحتاج إلى بذل شغل للتغلب على قوى التجاذب بين الجزيئات، مما يؤدي إلى زيادة الطاقة الداخلية للمادة.

من هذا نستنتج أنه عند تحويل جسم من حالة الصلابة إلى حالة السيولة ومن ثم إلى الحالة الغازية، فإن الطاقة الداخلية لذلك الجسم يجب أن تزداد حتى ولو لم ترتفع درجة حرارته، كذلك عند تحويل المادة من الحالة الغازية إلى حالة السيولة ثم إلى حالة الصلابة، فإن الجسم يعطي كمية معينة من طاقته الداخلية إلى الوسط الذي يحيطه ونتيجة لذلك فإن طاقة الجسم الداخلية تقل.

<u>انصهار وتجمد المواد الصلبة البلورية التركيب وغير البلورية التركيب:</u>

لقد عرفنا أن المادة يمكن تحويلها بالتسخين من حالة الصلابة إلى حالة السيولة ومن ثم إلى الحالة الغازية كما يمكن تحويلها بالتبريد من الحالة الغازية إلى حالة السيولة ومن ثم إلى حالة الصلابة.

إن تحول المادة من حالة الصلابة إلى حالة السيولة يسمى الإنصهار وأن درجة الحرارة التي عندها تنصهر المادة، تسمى درجة حرارة الانصهار لتلك المادة فالجليد مثلا عند انصهاره يتحول إلى ماء في درجة الصفر المئوي، وعلى هذا الأساس فإن درجة انصهار الجليد هي الصفر المئوي.

كذلك فإن تحويل المادة من حالة السيولة إلى حالة الصلابة يسمى التجمد وان درجة الحرارة التي تبدأ عندها المادة بالتجمد تسمى درجة حرارة الانجماد، فالماء يبدا بالتجمد عندما يكون في درجة حرارة الصفر المئوي، لذلك نقول أن درجة حرارة تجمده واحدة، وهي الصفر المئوي.

أن المادة الصلبة، إما أن تكون بلورية التركيب أو غير بلورية التركيب، فكيف يسلك كل من هذين الصنفين من المادة الصلبة خلال عملية الانصهار والتجمد؟

1. انصهار وتجمد المواد البلورية التركيب:

لكل مادة بلورية التركيب درجة حرارة انصهار معينة فالجليد له درجة حرارة أنصهار منخفضة هي الصفر المئوي وأن درجة حرارة انصهار النفثالين 80 °C، لكن درجة حرارة انصهار الحديد النقي تبلغ 1535 °C.

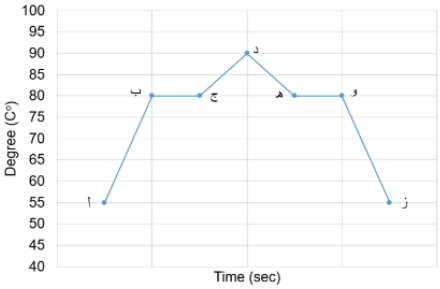
كذلك فإن لمثل هذه المواد (البلورية التركيب) درجة حرارة تجمد، وأن درجة حرارة تجمد الماء هي الصفر المئوي أيضاً، كما أن درجة حرارة تجمد منصهر النفثالين هي 80 °C وكذلك بالنسبة للحديد النقي فان درجة حرارة تجمد منصهره تبلغ 1535 °C (لاحظ الجدول التالي) وعلى هذا الأساس فإن درجة حرارة تجمد المواد البلورية المنصهره تساوي درجة حرارة انصهارها.

جدول يوضع درجة حرارة انصهار وتجمد بعض المواد (درجة مئوية)

المادة	درجة مئوية	المادة	درجة مئوية	المادة	درجة مئوية
الهيدروجين	259−	الصوديوم	98	النحاس	1083
الاوكسجين	219−	القصدير	232	زهر الحديد	1200−1100
النتروجين	210−	الرصاص	327	الفولاذ	1500−1300
الكحول	117−	الكهرب	280−350	الحديد النقي	1535
الزئبق	39−	الزنك	420	البلاتين	1770
الجليد	0	الالمنيوم	660		
البوتاسيوم	63	الذهب	1063		

فإذا سخنا مادة بلورية التركيبه مثل النفثالين فإنه يمكن ملاحظة أن درجة حرارتها تبدأ بالارتفاع حتى لحظة بداية انصهارها، فخلال كل وقت عملية الإنصهار تبقى درجة النفثالين ثابتة دون تغيير حتى انصهار آخر جزء من المادة وبعدها تبدأ درجة حرارة منصهر النفثالين بالارتفاع مرة أخرى.

ففي الشكل (24) رسم الخط البياني لنتائج تجربة تسخين النفثالين وهي مادة بلورية التركيب، وكانت درجة حرارة النفثالين في بداية التجربة 55 °C، ويمثل الخط البياني تغير درجة حرارة النفثالين بالتسخين بالنسبة للزمن فكان المحور العمودي (محور الصادات) يمثل درجة الحرارة بينما كان المحور (محور السينات) يمثل الزمن بالثواني، فعندما نستمر بالتسخين، ترتفع درجة حرارة النفثالين كما ذكرنا، حتى تبلغ 80 °C، لاحظ الجزء (ب ج) من الخط

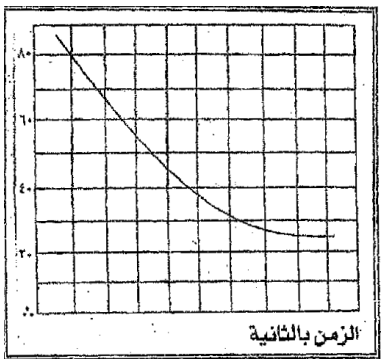


شكل (24)

البياني، وبعدها تبدأ درجة حرارة النفثالين المنصهر بالارتفاع، وحين بلوغها C° 90 (لاحظ الجزء (ج د) من الخط البياني) أوقف التسخين، فبدأت درجة حرارته بالانخفاض، وحتى بلوغها C° 80، لاحظ الجزء (دهـ) من الخط البياني، بدأ منصهر النفثالين بالتجمد وبقيت درجة حرارته C° 80 دون تغير، لاحظ الجزء (هـ و) من الخط البياني، إلى أن تتجمد جميع أجزاء النفثالين، وعندها بدأت درجة حرارته بالانخفاض مرة أخرى، إلى أن عادت درجة C° 55 التي بدأ عندها التسخين، لاحظ الجزء (و ز) من الخط البياني.

ب) انصهار وتجمد المواد غير البلورية التركيب:

لقد لاحظت كيف أن المواد البلورية التركيب تمتلك كل واحدة منها درجة انصهار وتجمد واحدة، لكن المواد غير البلورية التركيب كالأسفلت والزجاج والبلاستيك لا تمتلك درجة انصهار أو تجمد معينة، فهي تلين خلال التسخين وتتغير درجة حرارتها باستمرار إلى أن تتحول من حالة الصلابة إلى حالة السيولة، وعندما يبرد منصهر هذه المواد فإن درجة حرارته تنخفض بالتدريج إلى أن يتحول من حالة السيولة إلى حالة الصلابة فعند ملاحظة الخط البياني لانصهار القطران شكل (25) لا نجد فيه أجزاء أفقية. كالتي لاحظناها في الخط البياني لانصهار النفثالين في الشكل السابق.



شكل (25)

الحرارة الكامنة النوعية للانصهار

عند إمعان النظر في الخط البياني للشكل (24) يظهر لنا بوضوح أن درجة حرارة النفثالين خلال عملية الانصهار لا تتغير رغم استمرار التسخين، لاحظ الجزء (ب ج) الأفقي من الخط البياني ولكن حالما يتم تحول النفثالين جميعه من حالة الصلابة إلى حالة السيولة، تبدا درجة حرارته بالارتفاع، فعلى أي شيء تصرف الطاقة التي يحصل عليها النفثالين من المصدر الحراري خلال عملية الانصهار؟

إن الجواب على هذا السؤال واضح تماما ذلك أن هذه الطاقة تصرف على تهديم بلورات النفثالين الأمر الذي يؤكد قانون حفظ الطاقة وعلى هذا الأساس فإن الطاقة التي تحصل عليها المواد البلورية التركيب خلال عملية الانصهار تصرف على تغيير طاقتها الداخلية خلال تحولها من حالة الصلابة إلى حالة السيولة. إن مقدار الطاقة التي تلزم لصهر كتلة 1 كغم من المادة البلورية التركيب وتحويلها إلى سائل في درجة حرارة الانصهار تسمى (الحرارة الكامنة النوعية للانصهار) وعلى هذا الأساس فإن وحدة الحرارة النوعية للإنصهار هي (جول \ كغم أو كيلو سعر\ غم) كما أن مقدارها يختلف من مادة إلى أخرى، لاحظ الجدول التالي:

جدول يبين الحرارة الكامنة النوعية للانصهار

المادة	جول\كغم	كيلو سعر\كغم سعر\ غم	المادة	جول\كغم	كيلو سعر\كغم سعر\ غم
الالمنيوم	3.9×10^5	92	الفولاذ	0.84×10^5	20
الجليد	3.4×10^5	80	القصدير	0.59×10^5	14
الحديد	2.7×10^5	65	الرصاص	0.25×10^5	6
النحاس	1.8×10^5	42			

فالحرارة الكامنة النوعية لانصهار الجليد في الصفر المئوي وتحويله إلى ماء في درجة الصفر المئوي تساوي كما هو واضح من الجدول السابق 3.4×10^5 (جول \ كغم) أو ما يعادل 80 (كيلو سعر\ كغم)، وهذا يعني أن تحويل جزء من الجليد كتلته 1 كغم ودرجة حرارته الصفر المئوي إلى ماء في درجة الصفر المئوي يتطلب صرف طاقة مقدارها 3.4×10^5 (جول\كغم) أو 80 (كيلو سعر\ كغم)، تذهب إلى زيادة الطاقة الداخلية للسائل إذ أن طاقة المادة (الداخلية) خلال عملية الإنصهار سوف تزداد كثيرة.

وعلى هذا الأساس فعند درجة حرارة الانصهار تكون الطاقة الداخلية لكتله 1 كغم من المادة في حالة السيولة أكبر من الطاقة الداخلية لنفس هذه الكتلة من المادة في حالة الصلابة بمقدار الحرارة النوعية لانصهار تلك المادة. فالطاقة الداخلية لكتلة 1 كغم من الماء في درجة حرارة الصفر المئوي أكبر أيضاً من الطاقة الداخلية لنفس هذه الكتلة من الجليد في درجة الصفر المئوي أيضا.

<u>الطاقة التي تعطيها المادة خلال التجميد</u>

لنرجع إلى الخط البياني لانصهار النفثالين في الشكل (24) ولنمعن النظر في جزئه الذي يمثل درجة حرارة النفثالين بعد إيقاف التسخين. فخلال التبريد تنخفض درجة حرارة منصهر النفثالين، ولكن حالما يبدا بالتجمد يتوقف انخفاض درجة الحرارة عند (80°C)، رغم استمرار النفثالين بإعطاء طاقته الداخلية إلى الأجسام المرتبطة به لأن درجة حرارته أعلى من درجة حرارة الأجسام المحيطة به، ويستمر النفثالين على هذه الحالة إلى أن يتجمد جميعه، وعند ذلك تبدأ درجة حرارته بالانخفاض مرة أخرى، فلماذا لم تنخفض درجة حرارة النفثالين خلال عملية التجمد؟

سبق أن علمت أن الجسم عندما يكون في درجة التجمد، فإن طاقته الداخلية في حالة السيولة، أكبر من طاقته الداخلية في حالة التجمد، وعلى هذا الأساس فإن الجسم يعطي الفرق بين طاقته في الحالتين خلال عملية التجمد نتيجة التبريد لذلك فإن متوسط طاقة الجزيء، وبالتالي درجة حرارة الجسم تبقى ثابتة دون تغيير طالما لم تنته عملية

التجمد وفي لحظة انتهاء عملية التجمد، تبدأ درجة حرارة الجسم (الذي أصبح صلباً) بالانخفاض لأنه يكون في هذه الحالة قد فقد كل طاقته الفائضة.

لقد أكدت التجارب أنه عند تجمد المواد البلورية التركيب فإنها تعطي بالضبط نفس مقدار الطاقة التي امتصتها خلال عملية انصهارها. فعند تجمد كتلة 1 كغم من الماء في درجة الصفر المئوي فإنها تعطي الأجسام المحيطة بها طاقة مقدارها 80 (كيلو سعر\كغم) أي ما يعادل 3.4×10^5 (جول\كغم). وهذا المقدار من الطاقة يساوي نفس المقدار من الطاقة التي امتصتها كتلة 1 كغم من الجليد في درجة حرارة الصفر المئوي، عند تحولها إلى ماء في درجة حرارة الصفر المئوي.

مثال (1): **سبيكة من الفولاذ درجة حرارتها تساوي درجة حرارة انصهارها، أحسب الطاقة الواجب صرفها بالجولات، وبالسعر، لأجل صهر هذه السبيكة في نفس درجة الحرارة إذا علمت أن كتلتها 300 كغم.**

الحل:

من الجدول السابق نجد أن : الحرارة النوعية لإنصهار الفولاذ 0.84×10^5 جول \ كغم

الطاقة اللازم صرفها= 0.84 × جول\كغم × 300 كغم = 252 جول

كذلك، نجد من نفس الجدول أن الحرارة النوعية لانصهار الفولاذ 20 (كيلو سعر\ كغم)

الطاقة الواجب صرفها (ح) = 20 (كيلو سعر \ كغم) × 300 كغم

الطاقة الواجب صرفها (ح) = 6000 كيلو سعر

مثال (2): **كم هي كمية الطاقة (جول) الواجب صرفها لأجل صهر كتلة من الألمنيوم مقدارها 100 كغم عندما تكون في درة حرارة 20 °C.**

الحل:

أن الألمنيوم يبدأ بالانصهار عندما تكون حرارته 660 °C وعلى هذا الأساس يجب تسخين 100 كغم من الألمنيوم بحيث ترتفع درجة حرارته من20 °C إلى 660 °C

$ح = ح_{ن} \times ك \times (د - د_0)$

ومن الجدول السابق ح ن للألمنيوم = 880 جول\ (كغم. درجة)

$ح_1$ = 880 (جول\كغم.درجة) × 100 كغم (660 − 20) درجة

$ح_1 = 5632 \times 10^4$ جول

الحرارة اللازمة لصهر الألمنيوم في 660 °C = $ح_2$

$ح_2 = ح_{ص} \times ك$

$ح_{ص}$ = الحرارة الكامنة النوعية للإنصهار = 3.9×10^5 جول \ كغم

لاحظ الجدول السابق:

$ح_2 = 3.9 \times 10^5$ جول \ كغم × 100 كغم = 3.9×10^7 جول

كمية الحرارة الواجب صرفها $ح = ح_1 + ح_2 = 10^4 \times 5632 + 10^7 \times 3.9 = 10^7 \times 9.532$ جول

التبخر والتكاثف:

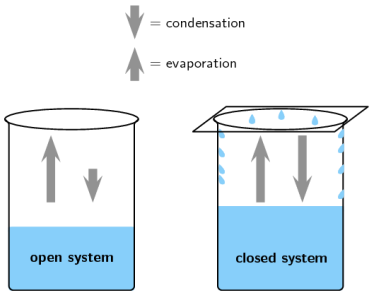
إن درجة حرارة الأجسام في حالاتها الثلاث الصلبة والسائلة والغازية، مرتبطة مع سرعة حركة جزيئات المادة فكلما كان متوسط سرعة حركة الجزيئات كبيرة كانت درجة حرارة المادة كبيرة أيضا.

غير انه عند درجة حرارة معينة توجد في السائل جزيئات منفردة تتحرك بسرعة أكبر من متوسط سرعة الجزيئات الأخرى، كما توجد أيضا جزيئات تمتلك سرعة أبطئ من ذلك المتوسط فإذا كانت سرعة جزيئة من جزيئات سطح السائل كبيرة لدرجة كافية فإن طاقتها الحركية سوف تمكنها من التغلب على قوى التجاذب بينها وبين جزيئات السطح المجاورة لها فتنفصل طائرة على السائل، والجزيئات الطائرة من سطح السائل التي كانت تمتلك سرعة أكبر من متوسط سرعة جزيئات السائل الأخرى تكون على سطح السائل البخار، وإن عملية تحول جزيئات السائل إلى بخار تسمى بالتبخر.

إن مثل هذه الجزيئات التي تمتلك سرعة أكبر من متوسط سرعة جزيئات السائل الأخرى، موجود في جميع درجات الحرارة، لذلك فإن التبخر يجري في جميع درجات الحرارة، وهذا يفسر سبب تبخر مياه البرك والمستنقعات في جميع أوقات السنة.

لكن التبخر أيام الصيف وبخاصة في منتصف النهار يكون أسرع مما يجري عليه في بقية الأوقات، فكلما كانت درجة حرارة السائل مرتفعة، فإن أعدادا كبيرة من الجزيئات سوف تمتلك طاقة حركية تمكنها من التغلب على قوى التجاذب بينها وبين الجزيئات المجاورة لها، فتفلت من السائل طائرة من سطحه لذلك تجري عملية التبخر بسرعة أكبر.

وفي نفس الوقت الذي تتحول فيه بعض جزيئات السائل إلى بخار تجري عملية عكسية، فالحركة العشوائية للجزيئات المتطايرة فوق سطح السائل قد تؤدي ببعض هذه الجزيئات للعودة ثانية إلى سطح السائل كما في الشكل(26) فإذا جرت عملية التبخر في قنينة مغلقة فإن عدد الجزيئات التي تغادر سطح السائل يساوي عدد الجزيئات التي تعود ثانية إلى السطح، لذلك فإن كمية السائل في المحلات المغلفة تبقى ثابتة دون تغير، رغم أن جزيئات السائل تستمر في حركتها.



شكل (26)

ولكن عندما يجري التبخر في الأماكن المفتوحة، فإن كمية السائل نتيجة التبخر تتناقص بالتدريج، لأن عددا كبيرا من الجزيئات يترك سطح السائل إلى الهواء ولا يعود ثانية إلى السائل لذلك يزداد التبخر عند زيادة سرعة الريح إذ أن الريح السريعة تحول دون عودة الجزيئات المتبخرة إلى السائل مرة أخرى.

امتصاص الطاقة خلال عملية التبخر

إن الجزيئات التي تفلت من سطح السائل تتغلب على قوى التجاذب بينها وبين الجزئيات المتجاورة، وهذا يعني انها تنجز شغلا ضد قوى جذب تلك الجزئيات اضافة الى ان البخار الذي يتكون من تلك الجزئيات المتطايرة ينجز شغلا ايضا.

ان تكون البخار فوق سطح السائل يعني فقدان السائل للجزئيات التي تمتلك سرعة كبيرة، مما يؤدي الى نقصان متوسط الطاقة الحركية لجزيئات السائل الباقية لذلك فان الطاقة الداخلية للسائل المتبخر في حالة عدم وجود مصدر خاص للطاقة يزود السائل بالطاقة اللازمة لرفع درجة حرارته.

ان انخفاض درجة حرارة السال المتبخر يمكن ملاحظته خلال التجربة. فاذا بللنا ايدينا بالاثير، احسسنا ببرودة اليدين، كذلك اذا خرجنا من الماء في يوم حار شعرنا بالبرودة فالماء عندما يتبخر من سطح جسمنا يأخذ قسما من حرارة الجسم، ولكن عندما يتبخر الماء الموجود في قدح، فلن نلاحظ انخفاض درجة حرارته، لأن الماء سوف يعوض الحرارة التي يفقدها، من الحرارة التي سوف يأخذها من الهواء المحيط به، لذلك تستمر عملية التبخر، طالما بقي القدح مكشوفا في الهواء.

إن هذا يؤكد ضرورة وجود مصدر حراري لكي تستمر عملية التبخر فلأجل تبخر كتلة 1 كغم من الماء عند درجة حرارة $35\ ^\circ C$ ، نحتاج إلى 576 كيلو سعر من الحرارة، أما تبخر كتلة 1 كغم من الأثير عند نفس درجة الحرارة هذه ($35^\circ C$) فيتطلب كمية أقل من الحرارة (85 كيلو سعر)، فلماذا تحتاج إلى تبخر 1 كغم من الماء طاقة حرارية أكبر؟

إن الجواب على هذا السؤال واضح وخاصة إذا تذكرنا أن قوة التماسك بين جزئيات الماء أكبر من قوة التماسك بين جزيئات الأثير، الأمر الذي يجعل جزيئات الماء تحتاج إلى طاقة أكبر لأجل أن تتغلب على قوة التجاذب بينها وبين الجزئيات المجاورة لها لذلك تحتاج إلى طاقة حرارية لتبخر الماء أكبر من الطاقة الحرارية التي تحتاجها لتبخر الأثير.

التكاثف:

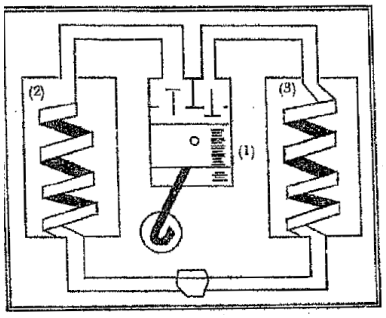
تسمى عملية تحول بخار المادة إلى سائل بالتكاثف، ولما كانت الطاقة الداخلية التي تمتلكها المادة في الحالة الغازية أكبر من الطاقة الداخلية في حالة السيولة، فإن تكاثف بخار المادة يصاحبه إعطاء طاقة حرارية من المادة المتكاثفة إلى الوسط.

فعند اي درجة من درجات الحرارة التي يتبخر عندها السائل، يمتص كمية من الحرارة تزيد الطاقة الداخلية للمادة لكي تتحول إلى الحالة الغازية (بخار) فالكيلو غرام الواحد من الماء في درجة حرارة ($35°C$) يحتاج إلى 576 كيلو سعر من الطاقة الحرارية لتبخره ولكنه عندما يتكاثف مرة أخرة يعطي 576 كيلو سعر إلى الوسط ويتحول إلى ماء في درجة حرارة ($35°C$)، وهكذا يقال أن حرارة التكاثف تساوي حرارة التبخر.

عمل الثلاجة

إن تحول المادة من حالة إلى أخرى يستغل على نطاق واسع في التطبيق العملي، وأن ظاهرة التبخر والتكاثف تستغل في صناعة الثلاجات وأجهزة التبريد الأخرى، والثلاجة تتكون أساسا من ثلاثة أقسام هي:

1- المكبس. 2- المكثف. 3- المبخر



شكل (27)

والجزئان الأخيران (2، 3) يتكون كل منهما من أنبوب حلزوني بحيث يمر المبخر في المجمد freezer بينما يقع المكثف خارج مخزن الثلاجة كما في الشكل (27).

يستعمل في الثلاجة غاز الأمونيا أو غيره من الغازات التي يسهل تحويلها إلى حالة السيولة بواسطة الضغط عند درجة الحرارة الاعتيادية.

فعند ضغط غاز الأمونيا بواسطة المكبس (1) يتحول من الحالة الغازية إلى حالة السيولة، وفي نفس الوقت يحدث تخلخل في الإنبوبة الحلزوني للمبخر، وعبر الصمام المنتظم (م) يتجه سائل الأمونيا إلى المبخر، فيمر عبر الأنبوب الحلزونين وهنا يتبخر سائل الأمونيا بسرعة، فيصاحب هذا التبخر امتصاص للحرارة بسرعة من الهواء، لذلك يمتص الهواء البارد داخل الثلاجة حرارة المواد الموجودة في مخزن الثلاجة، فتبرد ويجري التبريد على أشده في المجمد freezer بعد ذلك يعود غاز الأمونيا إلى المكبس حيث يتحول إلى سائل مرة أخرى ويمر عبر الصمام المنتظم (م) إلى المبخر (2) وهكذا يستمر عمل الثلاجة.

الغليان:

شكل (28)

عند تسخين الماء في إناء مفتوح كما في الشكل (28) يجري التبخر أولا في سطح الماء، فيتكون ضباب داخل الدورق نتيجة تكاثف البخار المتكون بسبب اختلاطه مع الهواء البارد الموجود داخل الدورق.

وباستمرار عملية التسخين ترتفع درجة حرارة الماء ونلاحظ ظهور فقاعات صغيرة عديدة داخل الماء وهذه الفقاعات يزداد حجمها بالتدريج، وهي فقاعات هوائية ناشئة من تمدد الهواء المذاب في الماء ولكنها لا تحوي هواء فقط وإنما يوجد فيها أيضا بخار الماء بسبب التبخر الذي يجري داخل السائل.

وكلما استمر التسخين ازداد حجم الفقاعات كما يزداد عددها. وبازدياد حجم الفقاعة تزداد القوة الصعودية لها، فتصعد إلى سطح الماء حيث تنفجر، كما في الشكل (28) ويصاحب هذه الانفجارات صوت فوران الماء.

وباستمرار التسخين تنشأ داخل السائل فقاعات صغيرة أخرى تكبر بدورها وتصعد إلى سطح السائل حيث تنفجر هي الأخرى، لكن الفقاعات في هذه الحالة تحتوي بخار الماء مع قليل من الهواء، وهي تصعد من نقاط مختلفة داخل السائل بسرعة واحدة بعد الأخرى، ويزداد حجمها عند اقترابها من السطح حيث تنفجر على السطح ويتصاعد بخار الماء في الجو.

فالغليان هو عملية تبخر السائل التي لا تجري في سطح السائل فحسب، وإنما تجري ايضا داخل السائل.

إن درجة الحرارة التي يغلي عندها السائل، تسمى درجة غليان ذلك السائل، وإن لكل سائل درجة غليان معينة كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول يوضح درجة غليان بعض المواد وأن درجة غليان المادة ثابتة لا تتغير اثناء عملية الغليان

المادة	د مئوية	المادة	د مئوية	المادة	د مئوية
الهيدروجين	253−	غاز الامونيا	33−	الكحول	78
الزئبق	357	النحاس	2580	الاوكسجين	183−
الاثير	35	الماء	100	الرصاص	1750
الحديد	3050				

في الجدول السابق نلاحظ أن المادة التي هي في الظروف الاعتيادية غاز وحولت بالتبريد والضغط إلى سائل مثل الهيدروجين المسال والأوكسجين المسال، تغلي في درجة حرارة واطئة جدا، فالهيدروجين المسال يغلي في درجة (C°235−) والأوكسجين المسال يغلي في درجة C°183− ، بينما نلاحظ أن المواد التي هي في الظروف الاعتيادية مواد صلبة منصهرة، تغلي في درجات حرارة عالية جدا فالحديد يغلي في درجة حرارة C°3050 كما يلاحظ من الجدول السابق.

الحرارة الكامنة النوعية للتبخر

لاجل إبقاء درجة حرارة السائل المتبخر ثابتة لا بد من إعطاء طاقة حرارية كافية، والغليان كما ذكر هو تبخر أيضاً ولكنه لا يجري في سطح السائل فحسب، وإنما يجري في داخله أيضا. وتتكون خلاله فقاعات بخار وتبقى درجة حرارة السائل ثابتة خلال عملية الغليان.

فلأجل استمرار عملية الغليان لا بد من إعطاء كمية معينة من الطاقة الحرارية، ولكن هذه الطاقة تصرف على زيادة طاقة البخار الذي يتكون خلال عملية الغليان.

أن كمية الطاقة الحرارية اللازمة لتحويل كتلة 1 كغم من السائل إلى بخار في درجة غليان ذلك السائل تسمي **(الحرارة الكاملة النوعية للتبخر)** وقد ذكر في الفقرة السابقة أن تحويل 1 كغم من الماء عند درجة حرارة 35°C إلى بخار يتطلب صرف 576 كيلو سعر، وعليه فإن الحرارة الكامنة النوعية لتبخر الماء عند هذه الدرجة (35 °C) تساوي 576 كيلو سعر\ كغم، وقد أكدت التجارب بان الحرارة الكامنة النوعية لتكون بخار الماء عند درجة غليانه (100°C) تساوي 539 كيلو سعر\ كغم، وبعبارة أخرى، فلأجل تحويل كتلة 1 كغم من الماء في درجة (100°C) إلى بخار في نفس الدرجة (100°C) يجب أن تصرف 539 كيلو سعر أي ما يعادل 2.3×10^6 جول.

إن لكل مادة حرارة كامنة نوعية للتبخر، لاحظ الجدول السابق، وأن وحدة الحرارة الكاملة النوعية للتبخر لا تختلف عن وحدة الحرارة الكامنة النوعية للانصهار (كيلو سعر\ غم، جول \ كغم) وهي تشير إلى مقدار الطاقة الواجب إعطاؤها لتحويل 1 كغم من المادة في درجة الغليان إلى غاز في نفس تلك الدرجة وعلى هذا الأساس فإن الطاقة الداخلية أي (1كغم) من بخار الماء عند درجة 100 °C تزيد على الطاقة الداخلية لـ(1كغم) من بخار الكحول في درجة 78 °C تزيد على طاقة (1 كغم) من الكحول السائل في نفس هذه الدرجة بمقدار 204 كيلو سعر.

جدول يوضح الحرارة الكامنة النوعية للتبخر

المادة	كيلو سعر\كغم	المادة	كيلو سعر\كغم
الماء	539	الاثير	85
سائل الامونيا	327	الزئبق	70
الكحول	204		

إن القسم الأكبر من الطاقة المصروفة في تحويل السائل إلى بخار يذهب إلى زيادة الطاقة الداخلية للبخار، إذ أن 539 كيلو سعر التي تصرف لتحويل واحد كغم من الماء في درجة حرارة 100 °C إلى بخار في نفس الدرجة. يذهب 500 كيلو سعر منها إلى زيادة الطاقة الداخلية للبخار، أما ال (39) كيلو سعر الباقية فتصرف لإنجاز شغل للتغلب على الضغط الخارجي وبشكل رئيسي ضد الضغط الجوي.

إن حجم وحدة الكتل لبخار الماء تحت الضغط الجوي الاعتيادي وفي درجة حرارة 100 °C يبلغ تقريبا 1700 مرة أكبر من حجم وحدة كتل الماء عند نفس تلك الظروف، وعلى هذه الصورة فإن الطاقة الداخلية لكتلة 1 كغم من بخار الماء عند درجة 100°C أكبر من الطاقة الداخلية لكتلة 1 كغم من الماء في نفس الدرجة 100°C بحوالي 500 كيلو سعر أي ما يعادل 2.3×10^6 جول.

ولكن عند تكاثف البخار وتحوله إلى سائل في نفس الدرجة يعطي كما ذكرنا نفس الطاقة التي امتصها خلال تحوله، وعلى هذا الأساس فعند تحول 1 كغم من بخار الماء في درجة حرارة 100 °C إلى ماء في نفس الدرجة 100 °C فإنه يعطي 539 كيلو سعر إلى الوسط المحيط به، وهذه هي الطاقة المحررة.

مثال (1): **احسبه مقدار الطاقة الواجب صرفها (بالجول) لتحويل 2 كغم من الماء في درجة 20 °C إلى بخار في درجة حرارة 100 °C**

الحل: إن الحرارة الواجب صرفها من أجل تحويل الماء من درجة 20 °C إلى 100 °C يمكن حسابها من المعادلة الآتية:

$ح = ح_{ن} \times ك \times (د - د_0)$

$ح_1 = 2$ كغم $\times$ 4200 (جول\كغم درجة) $\times$ (100−20) درجة

$ح_1 = 4200 \times 160$ جول $= 672000$ جول

لتحويل 1 كغم من الماء في 100 °C يجب ان تصرف 2.3×10^6 جول

$ح_2 = 2.3 \times 10^6$ (جول\كغم) $\times$ 2 كغم $= 46000000$ جول

$ح = ح_1 + ح_2$

ح = 46672000 (جول) وهي الطاقة الواجب صرفها.

<u>البخار المشبع والبخار غير المشبع:</u>

سبق وأن ذكرنا أن سطح الأواني المكشوفة والمعرضة للهواء لا يبقى على حالته بل ينخفض على الدوام نتيجة لعملية التبخر التي تجري في جميع درجات الحرارة، فالهواء المتحرك (الرياح) ياخذ معه جزيئات السائل المتطايرة من سطح السائل نفسه، نتيجة عملية التبخر، فيقلل من عدد الجزيئات المتطايرة، التي قد تعود مرة أخرى راجعة إلى سطح السائل أثناء عملية التكاثف.

أما إذا كان الإناء الحاوي للسائل مغلفة، فإن مستوى السائل يبقى دون تغير ويعود ذلك إلى جزئيات السائل المتطايرة، أثناء عملية التبخر يعود بعضها إلى سطح السائل مرة أخرى، أي أنها تتكاثف، وتجري هذه العملية

بحيث أن عدد جزيئات السائل التي تترك سطح السائل في عملية التبخر يساوي عدد جزيئات السائل المتكاثفة والتي تعود مرة أخرى إلى السائل نفسه.

ويمكن القول أن عملية التبخر في الأواني المغلفة توازنها عملية التكاثف، الأمر الذي يبقى مستوى سطح السائل في مثل هذه الأواني المغلقة دون تغير. إن مثل هذا التوازن بين عملية التبخر وعملية التكاثف، التي تجري في السائل يدعى بالتوازن الديناميكي، وأن البخار الذي يكون في حالة توازن ديناميكي، **يدعى بالبخار المشبع.**

أما إذا كانت عملية التبخر تجري، بحيث أن عدد جزيئات السائل التي تترك سطحه نتيجة عملية التبخر، اكبر من عدد الجزيئات التي تعود خلال عملية التكاثف إلى سطح السائل، فإن بخار السائل لا يكون في حالة توازن ديناميكي، ويدعى في مثل هذه الحالة **بالبخار غير المشبع.**

إن ضغط وكثافة البخار المشبع يعتمد على نوع المادة المتبخرة، وأن ضغط البخار المشبع يزداد كلما زادت درجة الحرارة، ليس فقط بسبب زيادة متوسط الطاقة الحركية لجزيئاته، وإنما بسبب زيادة عدد الجزئيات المتبخرة من السائل أيضاً، أما إذا انخفضت درجة حرارة البخار المشبع، فإن ضغطه يقل بسرعة، وان كثافته تقل أيضاً فيجري تكاثف جزء منه، وعلى هذا الأساس، فإن درجة حرارة البخار المشبع لا تحدد فقط ضغطه وإنما تحدد أيضاً كثافته.

إن تكاثف جزء من بخار الماء المشبع، الموجود في الجو، عند انخفاض درجة حرارته هو السبب في تكوين الغيوم، فعندما يرتفع الهواء المشبع ببخار الماء، بسبب تيارات الحمل الصاعدة، أو نتيجة تلاقي كتلتين من الهواء احدهما باردة والأخرى حارة مشبعة ببخار الماء تنخفض درجة حرارة البخار المشبع الموجود في الهواء، مما يؤدي إلى تكاثف قسم منه في أعالي الجو على هيئة غيوم، كذلك أن مثل هذا التكاثف قد يجري قرب سطح الأرض بسبب برودته نتيجة الإشعاع الحراري أو بسبب اختلاط الهواء المشبع ببخار الماء بهواء بارد قرب سطح الأرض، فيتكون الضباب، كما أن الندى يتكون هو الآخر نتيجة تكاثف جزء من بخار الماء المشبع في درجة حرارة معينة على الأغصان وأوراق الأشجار أو على الحشائش والأعشاب نتيجة انخفاض درجة حرارتها بسبب فقدان الحرارة الناشئة بسبب الإشعاع، وخاصة في أيام الصحو.

<u>درجة الحرارة والضغط الحرج للسائل:</u>

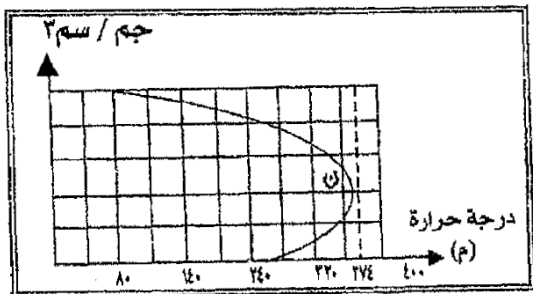
عند تسخين سائل في دورق محكم الإغلاق، فمن الممكن أن يجري تسخينه إلى درجة حرارة عالية جدا، قد تصل أعلى بكثير من درجة غليانه. إن هذا التسخين يصحبه طبعا تبخر السائل وبالتالي زيادة ضغطه وكثافة بخاره المشبع.

وقد أكدت التجربة أن السائل نفسه يتمدد وتقل كثافته، وعلى هذا الأساس فكلما زاد التسخين، في الدورق المغلق، كلما قلت كثافة السائل المسخن من جهة وزادت كثافة بخاره المشبع من جهة أخرى، فهل يمكن الاستمرار على

عملية التسخين هذه بحيث تصل إلى درجة حرارة يتساوى فيها كثافة السائل مع كثافة بخاره المشبع؟ وإذا كان هذا ممكنا، فهل يبقى فرق في مثل هذه الحالة بين السائل نفسه وبين بخاره المشبع؟

لقد أكدت ابحاث العالم الروسي مندليف (1834–1907م) أن لكل سائل درجة حرارة تتساوى فيها كثافة بخاره المشبع، مع كثافة السائل نفسه، وقد أطلق على درجة الحرارة هذا اسم **(درجة الحرارة الحرجة للسائل)**.

ففي الشكل (29) نلاحظ التقاء الخط البياني لكثافة الماء (الخط البياني الأعلى) مع الخط البياني لكثافة بخاره (الخط البياني الأسفل) عند النقطة (ن)، والتي تحدد درجة الحرارة الحرجة للماء، والتي تبلغ 374 °C لاحظ الشكل، وعلى هذا الأساس فإن درجة الحرارة الحرجة تعرف **بأنها الدرجة التي تتساوى فيها كثافة السائل مع كثافة بخاره المشبع.**



شكل (29)

الجدول التالي يوضح درجات الحرارة الحرجة لبعض المواد

المادة	د مئوية	المادة	د مئوية	المادة	د مئوية
الماء	374.2	الاوكسجين	118.4–	الهيدروجين	341–
الكحول	243.1	النتروجين	147.1–	الهيليوم	267.9–
الاثير	193.8	النيون	228.7–	الارجون	122.4–

ولكن ليس فقط (تساوي كثافة السائل مع كثافة بخاره المشبع) هو الذي يحدد درجة الحرارة الحرجة للسائل، وإنما يحددها أيضا ضغط البخار المشبع لذلك السائل، وعلى هذا الأساس فإن ضغط البخار المشبع عند درجة حرارة السائل الحرجة، يطلق عليه اسم **الضغط الحرج** لذلك السائل، وهو يعرف أنه أكبر ضغط ممكن ان يمتلكه البخار المشبع للسائل.

إن المادة في الحالة الغازية، عندما تكون درجة حرارتها أكبر من درجة الحرارة الحرجة لسائلها تسمى غازا، أما إذا كانت درجة حرارتها أقل من درجة حرارة سائلها الحرجة، فتسمى عندئذ بخارا، فالماء في الحالة الغازية يكون غازا عندما تكون درجة حرارته أكبر من 374 °C ويسمى بخارا عندما تكون حرارته أقل من 374 °C وهي درجة الماء الحرجة.

الفصل الثاني (الحركة التوافقية)

7.1 الحركة التوافقية البسيطة

The Simple Harmonic Motion

إذا تحرك جسم حول نقطة مبتعداً عنها تارة ومقترباً منها تارة أخرى فإن هذه الحركة تسمى **بالحركة الاهتزازية**.

وسوف ندرس في هذا الباب نوعاً منها هو الحركة الاهتزازية البسيطة "التوافقية" ومن أمثلتها حركة جسم معلق بحلزون، حركة البندول البسيط، حركة الرقاص في الساعة، حركة الأوتار، وكذلك فإن حركة الجزيئات في الأجسام الصلبة تكاد تكون حركة توافقية بسيطة.

إن دقائق الوسط الذي تنتشر فيه الموجة مهما كان شكلها تهتز اهتزازاً توافقياً. ويتضح ذلك حتى مع الأمواج الكهرومغناطيسية التي تتحرك في الفضاء الخارجي، لكن المقادير المهتزة هنا هي المجال الكهربائي والمغناطيسي المصاحب للموجة. ومثال أخير على الحركة الاهتزازية وهو الدائرة للتيار المتردد والذي يُعرف بدلالة الجهد، التيار، والشحنات الكهربية، والذي يهتز Oscillates مع الزمن.

ومن هذا يتضح أن دراسة الحركة التوافقية هو أمر أساسي ومقدمة مهمة لدراسة عدد من فروع الفيزياء.

تعريفات أساسية:

الزمن الدوري τ Periodic Time

هو الزمن اللازم لجسم ليعمل هزة كاملة أو دورة كاملة. فالبندول البسيط يبدأ من نقطة ثم يعود إليها ليكمل الدورة. والموجة تقطع مسافة تعرف بطول الموجة في هذا الزمن لتكرر نفسها بعد ذلك وهكذا.

التردد Frequency

هو عدد الاهتزازات الكاملة في وحدة الزمن. ومن الواضح أن التردد يساوي مقلوب الزمن الدوري أي أن $f = \frac{1}{\tau}$ ووحدته الدولية هي دورة لكل ثانية وتسمى هيرتز Hertz ($1\ \text{Hz} = 1\ \text{s}^{-1}$). ويعرف تبعاً لها التردد الزاوي وهو قيمة ثابتة لها الصيغة $\omega = 2\pi f$

السعة Amplitude

يرمز له بالرمز A وهو أكبر إزاحة رأسية للموجة عن خط الاتزان شكل (7.1) أي أن $A = |x|_{max}$.

طول الموجة Wavelength

يرمز لها بالرمز λ وهي الإزاحة التي تتحركها الموجة لتكرر نفسها بعد ذلك شكل (7.1) وتحسب من المعادلة:

$$\lambda = v\tau \qquad (7.1)$$

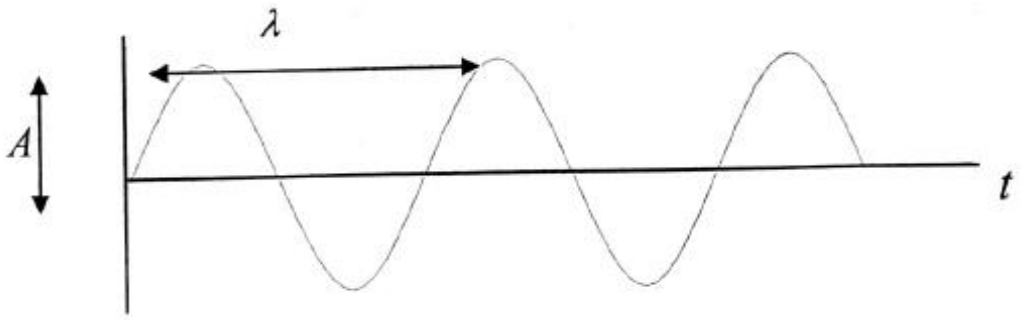
$$= v/f \qquad (7.2)$$

حيث v هي سرعة الموجة.

قوة الإعادة The Restoring Force

عند دراستنا للمرونة رأينا أنه عند التأثير على جسم بقوة F فاستطال مسافة x فإنه وفي حدود المرونة التامة تكون العلاقة بينهما طردية أي أن:

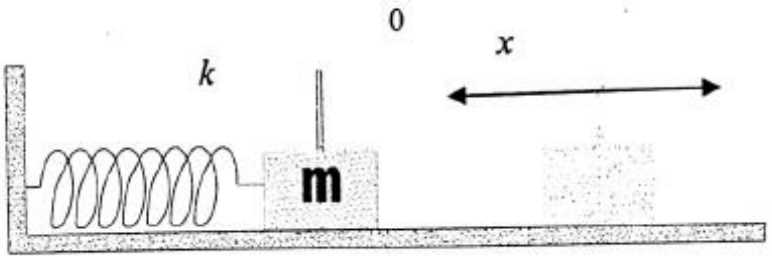
$$F' = kx$$



شكل (7.1) حركة اهتزازية

k ويسمى ثابت القوة أو ثابت التناسب ويسمى أحياناً ثابت هوك Hook's constant إذ أن القانون أعلاه يعرف بقانون هوك. إذا رفعت القوة التي أحدثت التمدد x فإن الجسم يعود إلى حالته بتأثير قوة جذب تسمى قوة الإعادة وهي القيمة السالبة لقوة التأثير شكل (7.2) أي أن:

$$F = - k x \qquad (7.3)$$



شكل (7.2) قوة الإعادة

مثال 7.1

احسب طول الموجة لموجة راديو AM تتحرك في الهواء بتردد 1MHz وكذلك بتردد 100MHz .

الحل :

1- نعلم أن موجات الراديو في الفراغ لها سرعة الضوء وعليه فإن:

$$\lambda_1 = v\tau_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3\times10^8\, m/s}{1MHz} = 300m$$

2- وفي الحالة الثانية فإن:

$$\lambda_2 = \frac{3\times10^8\, m/s}{100MHz} = 3m$$

7.2 معادلات الحركة التوافقية البسيطة

Equations of Simple Harmonic Motion

للوصول إلى معادلات الحركة التوافقية البسيطة نساوي القوة في المعادلة (7.3) بتلك في قانون نيوتن الثاني

$$F = -kx = ma \qquad (7.4)$$

حيث m هي كتلة الجسم و a هي تسارعه الخطي.

ويعاد كتابة المعادلة (7.4) في صيغتها التفاضلية على الصورة التالية:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \qquad (7.5)$$

أي أنه عند لحظة معينة يتناسب التسارع طرداً مع القيمة السالبة للإزاحة.

وقبل استنتاج المعادلات نتعرف على شكل طاقة الوضع والطاقة الكلية للجسم لأهميتها ثم ليسهل استنتاج معادلات الحركة.

ولمعرفة الطاقة الكلية للجسم المهتز نحسب أولاً الطاقة المخزونة أو طاقة الوضع Potential energy من تكامل القوة

$$U = \int_{x}^{0} F dx = \frac{1}{2} k\, x^2 \qquad (7.6)$$

وحيث إن الطاقة الكلية هي مجموع طاقتي الحركة والوضع وهي دائماً ثابتة أي أن:

$$E = K + \mathrm{U} = \text{ثابت}$$

أو

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2 = \text{ثابت} \qquad (7.7)$$

وللفائدة ، فإننا نعيد استنتاج هذه المعادلة باستخدام حقيقة أن القوة تمثل معدل تغير كمية الحركة بالنسبة للزمن

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) = \frac{d}{dx}\frac{dx}{dt}(mv) = \frac{dv}{dx}(mv) = -kx$$

إذن

$$mvdv + kxdx = 0.0$$

وبالتكامل نحصل على المعادلة (7.7).

ولمعرفة الثابت فإننا نعلم أنه عند $x = A$ أي عند أقصى نقطة يصلها المهتز تنعدم السرعة وتكون الطاقة كلها طاقة وضع ،

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} k A^2 \qquad (7.8)$$

وعندما تكون السرعة أكبر ما يمكن أي عند $x = 0.0$ فإن الطاقة كلها طاقة حركة،

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 \qquad (7.9)$$

ومن المعادلات (7.8) و (7.9) نحصل على العلاقات بين السعة والطاقة الكلية والسرعة الكبرى للمهتز

$$v_{max} = \sqrt{\frac{k}{m}} A \qquad (7.10)$$

$$v_{MAX} = \sqrt{\frac{2E}{m}} \qquad (7.11)$$

$$A = \sqrt{\frac{2E}{k}} \qquad (7.12)$$

ومن المعادلة (7.8) نجد أن:

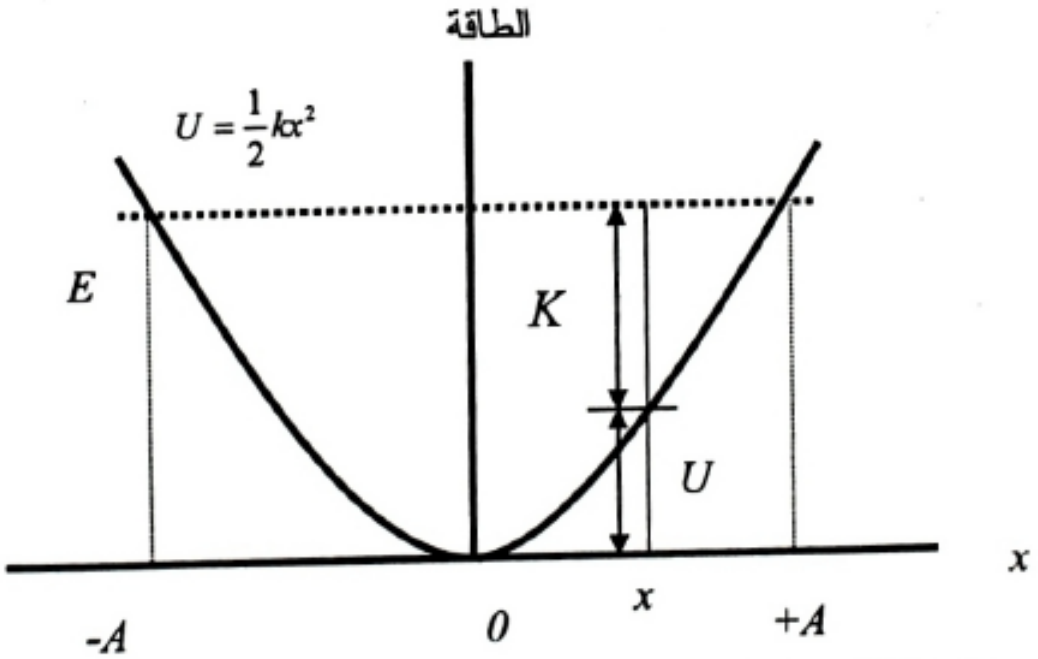
$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}}\ \sqrt{A^2 - x^2} \qquad (7.13)$$

أو

$$v^2 = \frac{k}{m}(A^2 - x^2) = v_{max}^2 - \frac{k}{m}x^2$$

وهي معادلة تشبه شكلاً معادلة الحركة الخطية

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$



شكل (7.3) ويمثل العلاقة بين الطاقة الكلية والطاقة الحركية والطاقة الكامنة.

ويبين الشكل (7.3) أهمية المعادلة (7.8) إذا رسمنـا الطاقة عمودياً و x أفقياً ومثلنا U و K فإننا نلاحظ من الرسم ماذكرناه عن قانون حفظ الطاقة إذ أنه عند أي نقطة على الرسم نجد دائما أن **U+K = ثابت** .

ولاستنتاج معادلة الحركة نعوض في المعادلة (7.13) عن السرعة v بالمشتقة $\frac{dx}{dt}$

$$\frac{dx}{dt} = \pm\sqrt{\frac{k}{m}}\sqrt{A^2 - x^2}$$

وبفصل المتغيرات نحصل على:

$$\int \frac{dx}{\sqrt{A^2 - x^2}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \int dt$$

ولإجراء التكامل نفرض الزاوية θ في مثلث وتره A ومقابل الزاوية x

$$\sin\theta = \frac{x}{A} \rightarrow \; dx = A\cos\theta \; d\theta$$

وبالتعويض في المعادلة أعلاه يكون:

$$\int \frac{A\cos\theta \, \mathrm{d}\theta}{\sqrt{\mathrm{A}^2 - \mathrm{A}^2 \sin^2\theta}} = \int d\theta = \sqrt{\frac{k}{m}} \int dt$$

أي أن:

$$\theta = \sqrt{\frac{k}{m}} \; t + C$$

عند الزمن $t = 0$ تكون $\theta_0 = C$

أي أن:

$$\theta = \theta_0 + \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

ومنها مع المعادلة (7.15) نجد أن:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

وغالباً ما تكتب المعادلات السابقة بدلالة ω والتي لها وحدة radian/second أو rad/sec والآن نعيد كتابة معادلتي الإزاحة والسرعة

$$x = A \sin(\omega t + \theta_0) \quad (7.16)$$

$$v = \pm \omega\sqrt{A^2 - x^2} \quad (7.17)$$

ويمكن الحصول على السرعة والتسارع بتفاضل الإزاحة

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \theta_0) \quad (7.18)$$

$$a = \frac{d2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \theta_0) \quad (7.19)$$

أو

$$a = -\omega^2 x \quad (7.20)$$

وهذه هي المعادلة (7.5) بدلالة التردد الزاوي.

جدول (7.1)يبين معادلات الحركة التوافقية البسيطة والحركة الخطية

الحركة التوافقية البسيطة	الحركة الخطية ذات التسارع الثابت
$x = A \sin(\omega t + \theta_\circ)$	$x = x_o + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$
$v = \pm \omega\sqrt{A^2 - x^2}$	$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$
$v = \omega A \cos(\omega t + \theta_\circ)$	$v = v_0 + at$
$a = -\omega^2 x$	$a =$ ثابت
$a = -\omega^2 A \sin(\omega t + \theta_\circ)$	

يمكن تلخيص معادلات الحركة التوافقية البسيطة ومقارنتها بمعادلات الحركة الخطية كما يظهر في الجدول (7.1).

بالرجوع إلى المعادلة (7.2) نجد أن :

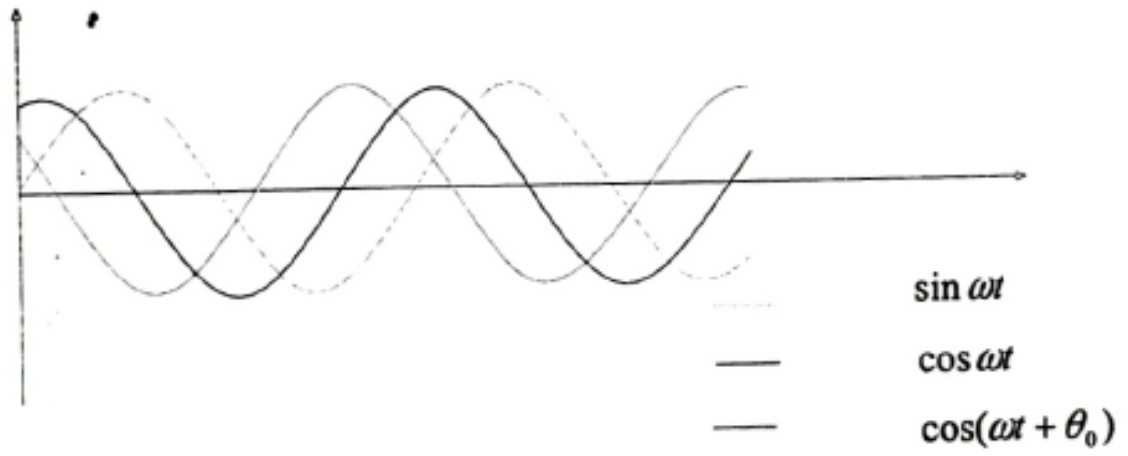
$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

وهذه معادلة تفاضلية تعني أن x دالة إذا فاضلناها مرتين نحصل على ثابت سالب مضروب في الداله نفسها وهذا ينطبق على العديد من الدوال منها:

$$x = A \sin \omega t \qquad (7.21a)$$

$$x = A \cos \omega t \qquad (7.21b)$$

$$x = A \cos (\omega t + \theta_o) \qquad (7.21c)$$



شكل(7.4) علاقة الطور للمعادلات (7.21)

والفرق بين الثلاث معادلات هو في زاوية الطور ، انظر الشكل (7.4) ، ولكي نعرف أي المعادلات السابقة نستخدم نعود إلى الزمن $t = 0$ ونرى نوع السرعة والإزاحة، فمثلاً المعادلة $x = A \sin \omega t$ لها القيم الابتدائية $x_o = 0.0$ و v_o

$= A\omega$. إذن إذا أعطى الجسم المهتز سرعة ابتدائيـة قصوى وبغير إزاحة ابتدائية فإننا نستخدم $x = A\sin\omega t$. أما المعادلة $x = A\cos\omega t$ فإنها تستخدم عند إزاحة ابتدائية قصوى وسرعة ابتدائية تساوي صفراً . عندما يُعطى الجسم المهتز سرعة ابتدائية لا تساوي الصفر وكذلك إزاحة ابتدائية لا تساوي الصفر فإن المعادلة المستخدمة هي $x = A\cos(\omega t + \theta_0)$. ولمعرفة العلاقة بين زاوية الطور والسعة والإزاحة الابتدائية x_o فإننا نستخدم المعادلة (7.21c) حيث:

$$x_o = A\cos\theta_\circ \tag{7.22}$$

و

$$v_o = -\omega A\sin\theta_0 \tag{7.23}$$

نقسم المعادلة (7.23) على ω ثم نُربع المعادلتين ونستخدم الحقيقة

$$\sin^2\theta_\circ + \cos^2\theta_\circ = 1.0 \tag{7.24}$$

لنجد أن:

$$A^2 = x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2} \tag{7.25}$$

ولمعرفة قيمة زاوية الطور نقسم المعادلة (7.23) على المعادلة (7.22) لنجد أن

$$\tan\theta_0 = -\frac{v_0}{\omega\, x_0} \tag{7.26}$$

مثال 7.2

سيارة كتلتها $1500.0\ kg$ وبها أربعة رُكّاب متوسط كتلة الراكب $70.0\ kg$ لها أربعة مساعدات حلزونية ثابت القوة لكل منها $25000.0\ N/m$.

احسب التردد لاهتزاز السيارة إذا مرت على مطب وكم الزمن للسيارة لتعمل اهتزازين.

الحل :

كتلة السيارة مع الركاب = 1780.0kg

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{25000.0\ \text{N/m}}{1780.0\ \text{kg}}} = 0.6\ \text{Hz}$$

$$\tau = \frac{2.0}{f} = 3.35\ \text{seconds}$$

مثال 7.3

ربط الطرف الحر لحلزون بجسم كتلته $1.0kg$ وسحب مسافة $10.0\ cm$ ليترك يهتز. إذا علمت أن القوة تتناسب طرداً مع الإزاحة وأن قوة قدرها $10.0N$ تعطي إزاحة قدرها $5.0cm$.

أ- احسب زمن الدورة والتردد الزاوي .

ب- احسب أقصى سرعة وأقصى تسارع .

ج- احسب السرعة والتسارع عند إزاحة $4.0cm$.

د- احسب الزمن اللازم للجسم ليتحرك إلى منتصف المسافة بين موضع سكونه والإزاحة القصوى.

الحل :

أ- نعلم أن

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

لكن

$$k = \frac{F}{x} = \frac{10.0\ N}{0.05\ m} = 200.0\ N/m$$

إذن

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{1.0kg}{200.0\text{N/m}}} = 0.444 \text{ s};$$

$$f = \frac{1}{\tau} = 2.25\,\text{Hz};$$

$$\omega = 2\pi f = 14.14\,\text{s}^{-1}$$

ب-

$$v_{max} = \pm\omega A = \pm 1.414\,\text{m/s}$$

$$a_{max} = -\omega^2 A = 19.99\,\text{m/s}^2$$

جـ- السرعة عند إزاحة قدرها $4.0\ cm$

$$v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$$

$$= \pm 14.14\,\text{s}^{-1}\sqrt{0.1^2 m^2 - 0.04^2 m^2} = \pm 1.3 m/s$$

د- لحساب الزمن ليصل الجسم إلى منتصف المسافة فإننا نعود إلى الشروط الابتدائية حيث إنه عند الزمن $t = 0.0\text{sec}$ كانت الإزاحة $10.0cm$ والسرعة الابتدائية تساوي صفراً. فإن المعادلة الأنسب هي:

$$x = A\cos\omega t$$

هنا

$$x = \frac{A}{2}$$

$$\frac{A}{2} = A\cos\omega t$$

أو

$$0.5 = \cos\omega t$$

إذن

$$(14.14\,s^{-1})t = \cos^{-1} 0.5 = 60.0^0 = \frac{\pi}{3}$$

$$t = \frac{\pi}{3 \times 14.14\,s^{-1}} = 0.074\,s$$

مثال 7.4

في المثال السابق أُعطي الجسم إزاحة ابتدائية قدرها $2.0cm$ وسرعة ابتدائية قدرها $1.0m/s$ احسب السعة ، زاوية الطور والطاقة الكلية، ثم اكتب معادلة مكان الجسيم.

الحل:

من المعادلة (7.25)

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_o}{\omega}\right)^2} = \sqrt{(0.02m)^2 + (\frac{1.0m/s}{14.14\,s^{-1}})^2}$$
$$= 0.0735\,m$$

ومن المعادلة (7.26)

$$\theta_0 = \tan^{-1}(-\frac{v_0}{\omega x_0}) = \tan^{-1}\frac{-1.0m/s}{(14.14s^{-1})(0.02m)} = -74.2^{\circ} = 1.3rad$$

لحساب الطاقة لدينا

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2} \times 200.0\frac{N}{m} \times (0.0735m)^2$$
$$= 0.54\,J$$

أو تحسب من المعادلة

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}kx_0^2$$
$$= 0.5\ x1.0kgx\ (1.0m/s)^2 + 0.5x200.0N/m\ x\ (0.02m)^2$$
$$= 0.54\ J$$

$$(14.14\,s^{-1})t = \cos^{-1} 0.5 = 60.0^0 = \frac{\pi}{3}$$

$$t = \frac{\pi}{3 \times 14.14\,s^{-1}} = 0.074\,s$$

مثال 7.4

في المثال السابق أُعطي الجسم إزاحة ابتدائية قدرها $2.0cm$ وسرعة ابتدائية قدرها $1.0m/s$ احسب السعة ، زاوية الطور والطاقة الكلية، ثم اكتب معادلة مكان الجسيم.

الحل:

من المعادلة (7.25)

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_o}{\omega}\right)^2} = \sqrt{(0.02m)^2 + (\frac{1.0m/s}{14.14\,s^{-1}})^2}$$
$$= 0.0735\,m$$

ومن المعادلة (7.26)

$$\theta_0 = \tan^{-1}(-\frac{v_0}{\omega x_0}) = \tan^{-1}\frac{-1.0m/s}{(14.14s^{-1})(0.02m)} = -74.2^{\circ} = 1.3rad$$

لحساب الطاقة لدينا

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2} \times 200.0\frac{N}{m} \times (0.0735m)^2$$
$$= 0.54\,J$$

أو تحسب من المعادلة

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}kx_0^2$$
$$= 0.5\ x1.0kgx\ (1.0m/s)^2 + 0.5x200.0N/m\ x\ (0.02m)^2$$
$$= 0.54\ J$$

من المعادلة العامة للإزاحة

$$x = A\cos(\omega t + \theta_0)$$

نحصل على

$$x = 0.073m\cos[14.14\ s^{-1}t - 1.3\ rad]$$

مثال 7.5

جسم كتلته $0.5kg$ مربوط بحلزون أفقي ، حرك حركة توافقية بسيطة وفقاً للمعادلة $x = 0.1\cos(\frac{\pi}{2}t + \frac{\pi}{3})$

1 - عين الموقع الذي عنده تتساوى طاقتا الحركة والوضع .

2 - احسب القيمة الكبرى لكل من طاقتي الحركة و الوضع وعين قيمة ثابت الحلزون وأكبر سرعة للجسم .

3 - احسب كلا من طاقتي الوضع والحركة عند 0.04m .

4 - احسب النسبة بين طاقتي الحركة والوضع عند إزاحة تعادل نصف السعة .

الحل:

1 - تتساوى طاقة الحركة و طاقة الوضع عند الشرط $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2$

و في هذه الحالة تكون $E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$

أي عند

$$x = \pm\frac{A}{\sqrt{2.0}} = \pm\frac{0.1}{\sqrt{2.0}} = \pm 0.071m$$

2 - تأخذ طاقة الوضع قيمتها الكبرى عندما تساوي الطاقة الكلية وكذلك الحال بالنسبة لطاقة الحركة ، أي أن

$$E = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

أي أن:

$$U_{max} = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\times 0.5kg\times(\frac{\pi}{2})^2(0.1m)^2 = 6.16\times10^{-3}J = K_{max}$$

يحسب الثابت k بأكثر من طريقة منها

$$k = \frac{2E}{A^2} = 1.23N/m$$

أقصى سرعة للجسم هي

$$v_m = \sqrt{\frac{2E}{m}} = 1.57m/s$$

3 - طاقة الوضع عند $x = 0.04m$

$$U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}\times 1.23N/m\times 0.04m^2 = 9.84\times10^{-4}J$$

طاقة الحركة عند نفس الإزاحة

$$K = E - U = (6.16\times10^{-3} - 9.84\times10^{4})J = 5.18\times10^{-3}J$$

4 - النسبة بين طاقتي الوضع والحركة عند إزاحة $x = \frac{1}{2}A$

$$U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}k(\frac{1}{2}A)^2 = \frac{1}{8}kA^2$$

$$K = E - U = \frac{1}{2}kA^2 - \frac{1}{8}kA^2 = \frac{3}{8}kA^2$$

إذن

$$\frac{U}{K} = \frac{\frac{1}{8}kA^2}{\frac{3}{8}kA^2} = \frac{1}{3}$$

7.3 حركة الحلزون الرأسية

Motion of A body Suspended from A spring

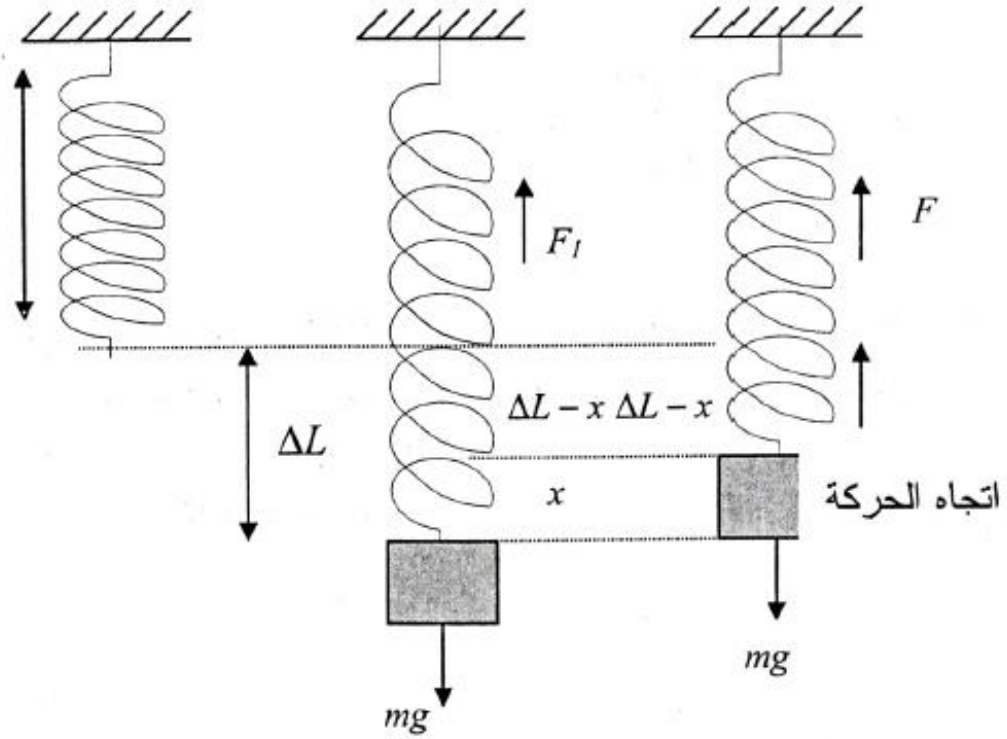
لنعلق حلزون طوله l ثم نعلق به جسم وزنه mg ليستطيل بمقدار ΔL مما يتسبب في قوة إعادة معاكسة لاتجاه الوزن ولها القيمة $F_1 = k\,\Delta L$ حيث k هو ثابت الزنبرك ومساوية للوزن أي أن:

$$k\Delta L = mg$$

والآن نفرض أن المجموعة في حالة حركة ولندرسها عند اللحظة التي يبعد الجسم عن نقطة الاتزان مسافة x ، وفي هذه الحالة فإن الاستطالة هي $\Delta L - x$ وهنا تكون القوة إلى أعلى تساوي $k\,(\Delta L - x)$ ويكون صافي القوة هو:

$$F = k\,(\Delta L - x) - mg = -kx$$

وهنا يكون صافي القوة يتناسب طرداً مع إزاحة الجسم عن مكان الاتزان ويهتز الجسم رأسياً بتردد زاوي $\omega = \sqrt{k/m}$



شكل (7.5) ويمثل الشكل الحلزون قبل تعليق الجسم ثم الحلزون والجسم في حالة اتزان وأخيراً الحلزون مع اتجاه حركة الجسم إلى أعلى.

مثال 7.6

علق جسيم راسياً بحلزون طوله L ليستطيل بمقدار 1.0cm وليكون في حالة اتزان ، احسب زمنه الدوري؟

الحل:

حيث إن الجسم في حالة اتزان فإن $x=0.0$ وبالتعويض فإن:

$$F = k\left(\Delta L - x\right) - mg = 0.0$$

أي أن:

$$k = \frac{mg}{\Delta L}$$

لكن: $\omega = \sqrt{k/m}$ ،

إذن:

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta L}{g}} = 0.1\text{sec}$$

مثال 7.7

وضع جسم كتلته $10.0kg$ على طاولة تم ربطه بسلك من الفولاذ طوله $5.0m$ ليربط الكلاب في السقف ، إذا أزيلت الطاولة فإن السلك يستطيل ويبدأ الجسم في الاهتزاز إلى أعلى وإلى أسفل بحركة توافقية بسيطة . إذا كانت مساحة مقطع السلك $1.0mm^2$ ومعامل يونج لمادته $1.9\times10.0^{11}Pa$.

فاحسب زمن الدورة للجسم .

الحل:

نعلم أن معامل يونج يعطى بالعلاقة

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

وبإعادة ترتيبها فإن القوة :

$$F = Y\frac{\Delta L}{L}A$$

لكن قانون نيوتن الثاني هو :

$$F = m\,a$$

ومن المعادلتين أعلاه نجد صيغة للتسارع هي:

$$a = \frac{F}{m} = \left(\frac{Y\,A}{m\,L}\right)\Delta L \qquad (1)$$

أي أن التسارع يتناسب طرداً مع الاستطالة وهذا يدل أن لدينا حركة توافقية بسيطة, ومعلوم في هذه الحالة أن

$$a = \omega^2\,x \qquad (2)$$

وبمقارنة المعادلتين (1) و (2) نجد أن

$$\omega^2 = \frac{\mathrm{Y\,A}}{\mathrm{m\,L}} = 4\,\pi^2\,\mathrm{f}^2$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\,\pi}\sqrt{\frac{Y\,A}{m\,L}} = \frac{1}{2\,\pi}\sqrt{\frac{1.9\times10^{11}\times\left(1.0\times10^{-6}\right)}{10.0\times5.0}}\ Hz$$

$$= 9.8\ Hz$$

$$\tau = \frac{1}{\mathrm{f}} = 0.1\,\mathrm{s}$$

مثال 7.8

علق جسم كتلته $2.0\ kg$ رأسياً بحلزون ليستطيل $5.0cm$. ثم سحب إلى أسفل مسافة إضافية قدرها $2.5cm$ ثم ترك يهتز. **احسب** زمنه الدوري وصافي قوة الهز .

الحل :

عندما كان الجسم في حالة اتزان فإن:

$$k\,\Delta L = mg$$

$$k = \frac{mg}{\Delta L} = \frac{2.0 \times 9.8}{0.05}\ N/m = 392.0\ N/m$$

$$\tau = 2\,\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\,\pi\sqrt{\frac{2.0}{392.0}} = 0.45\ s$$

وصافي قوة الهز هي

$$F = -kx = (-392.0N/m)(0.025m) = 9.8N$$

مثال 7.8

سحبت قوة مقدارها $28.0N$ حلزون رأسي ليستطيل بمقدار $12.0cm$ ، احسب كتلة جسم يعلق بالحلزون بحيث إذا اهتز كان زمنه الدوري $0.5sec$.

الحل :

لدينا قوة السحب والاستطالة ومنها يمكن معرفة ثابت الزنبرك

$$k = \frac{F}{\Delta L} = \frac{28.0\ N}{0.12\ m} = 233.3\ N/m$$

لكن

$$\tau = 2\,\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

ومنها فإن

$$m = \frac{k\,\tau^2}{4\,\pi^2} = \frac{233.3 \times 0.5^2}{4\,\pi^2}\ kg = 1.48kg$$

$$(14.14\,s^{-1})t = \cos^{-1} 0.5 = 60.0^0 = \frac{\pi}{3}$$

$$t = \frac{\pi}{3 \times 14.14\,s^{-1}} = 0.074\,s$$

مثال 7.4

في المثال السابق أُعطي الجسم إزاحة ابتدائية قدرها $2.0cm$ وسرعة ابتدائية قدرها $1.0m/s$ احسب السعة ، زاوية الطور والطاقة الكلية، ثم اكتب معادلة مكان الجسيم.

الحل:

من المعادلة (7.25)

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_o}{\omega}\right)^2} = \sqrt{(0.02m)^2 + (\frac{1.0m/s}{14.14\,s^{-1}})^2}$$
$$= 0.0735\,m$$

ومن المعادلة (7.26)

$$\theta_0 = \tan^{-1}(-\frac{v_0}{\omega x_0}) = \tan^{-1}\frac{-1.0m/s}{(14.14s^{-1})(0.02m)} = -74.2^{\circ} = 1.3rad$$

لحساب الطاقة لدينا

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2} \times 200.0\frac{N}{m} \times (0.0735m)^2$$
$$= 0.54\,J$$

أو تحسب من المعادلة

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}kx_0^2$$
$$= 0.5\ x1.0kgx\ (1.0m/s)^2 + 0.5x200.0N/m\ x\ (0.02m)^2$$
$$= 0.54\ J$$

من المعادلة العامة للإزاحة

$$x = A\cos(\omega t + \theta_0)$$

نحصل على

$$x = 0.073m\cos[14.14\ s^{-1}t - 1.3\ rad]$$

مثال 7.5

جسم كتلته $0.5kg$ مربوط بحلزون أفقي ، حرك حركة توافقية بسيطة وفقاً للمعادلة $x = 0.1\cos(\frac{\pi}{2}t + \frac{\pi}{3})$

1 - عين الموقع الذي عنده تتساوى طاقتا الحركة والوضع .

2 - احسب القيمة الكبرى لكل من طاقتي الحركة و الوضع وعين قيمة ثابت الحلزون وأكبر سرعة للجسم .

3 - احسب كلا من طاقتي الوضع والحركة عند 0.04m .

4 - احسب النسبة بين طاقتي الحركة والوضع عند إزاحة تعادل نصف السعة .

الحل:

1 - تتساوى طاقة الحركة و طاقة الوضع عند الشرط $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2$

و في هذه الحالة تكون $E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$

أي عند

$$x = \pm\frac{A}{\sqrt{2.0}} = \pm\frac{0.1}{\sqrt{2.0}} = \pm 0.071m$$

2 - تأخذ طاقة الوضع قيمتها الكبرى عندما تساوي الطاقة الكلية وكذلك الحال بالنسبة لطاقة الحركة ، أي أن

$$E = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

أي أن:

$$U_{max} = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\times 0.5kg\times(\frac{\pi}{2})^2(0.1m)^2 = 6.16\times10^{-3}J = K_{max}$$

يحسب الثابت k بأكثر من طريقة منها

$$k = \frac{2E}{A^2} = 1.23N/m$$

أقصى سرعة للجسم هي

$$v_m = \sqrt{\frac{2E}{m}} = 1.57m/s$$

3 - طاقة الوضع عند $x = 0.04m$

$$U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}\times 1.23N/m\times 0.04m^2 = 9.84\times10^{-4}J$$

طاقة الحركة عند نفس الإزاحة

$$K = E - U = (6.16\times10^{-3} - 9.84\times10^{4})J = 5.18\times10^{-3}J$$

4 - النسبة بين طاقتي الوضع والحركة عند إزاحة $x = \frac{1}{2}A$

$$U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}k(\frac{1}{2}A)^2 = \frac{1}{8}kA^2$$

$$K = E - U = \frac{1}{2}kA^2 - \frac{1}{8}kA^2 = \frac{3}{8}kA^2$$

إذن

$$\frac{U}{K} = \frac{\frac{1}{8}kA^2}{\frac{3}{8}kA^2} = \frac{1}{3}$$

7.3 حركة الحلزون الرأسية

Motion of A body Suspended from A spring

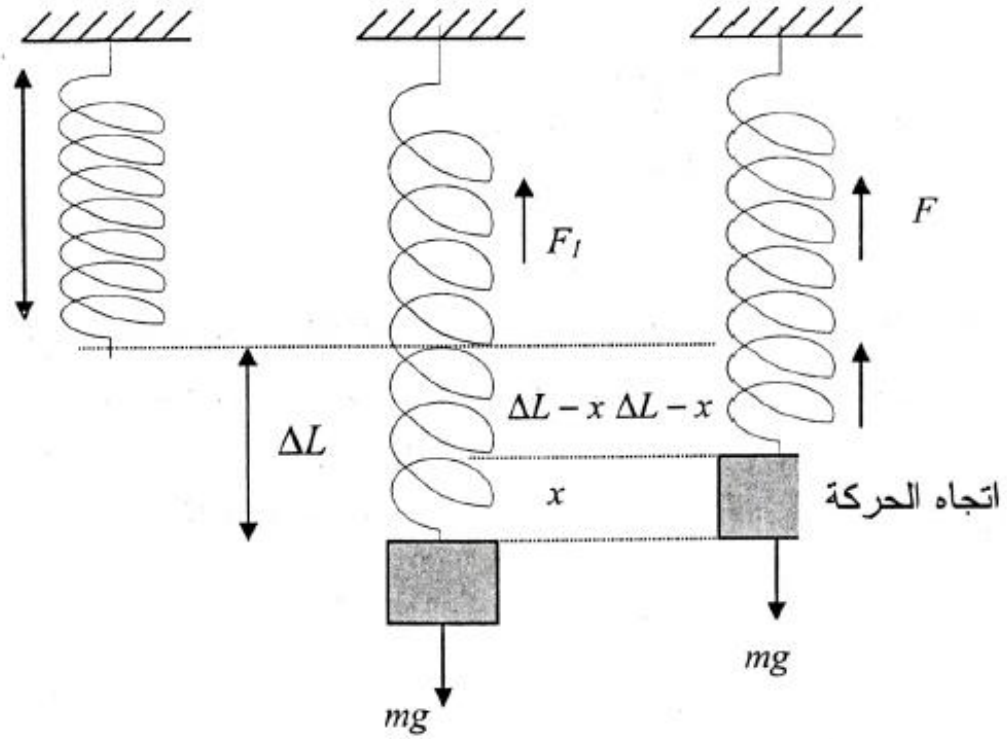
لنعلق حلزون طوله l ثم نعلق به جسم وزنه mg ليستطيل بمقدار ΔL مما يتسبب في قوة إعادة معاكسة لاتجاه الوزن ولها القيمة $F_1 = k\,\Delta L$ حيث k هو ثابت الزنبرك ومساوية للوزن أي أن:

$$k\Delta L = mg$$

والآن نفرض أن المجموعة في حالة حركة ولندرسها عند اللحظة التي يبعد الجسم عن نقطة الاتزان مسافة x ، وفي هذه الحالة فإن الاستطالة هي $\Delta L - x$ وهنا تكون القوة إلى أعلى تساوي $k\,(\Delta L - x)$ ويكون صافي القوة هو:

$$F = k\,(\Delta L - x) - mg = -kx$$

وهنا يكون صافي القوة يتناسب طرداً مع إزاحة الجسم عن مكان الاتزان ويهتز الجسم رأسياً بتردد زاوي $\omega = \sqrt{k/m}$



شكل (7.5) ويمثل الشكل الحلزون قبل تعليق الجسم ثم الحلزون والجسم في حالة اتزان وأخيراً الحلزون مع اتجاه حركة الجسم إلى أعلى.

مثال 7.6

علق جسيم راسياً بحلزون طوله L ليستطيل بمقدار 1.0cm وليكون في حالة اتزان ، احسب زمنه الدوري؟

الحل:

حيث إن الجسم في حالة اتزان فإن $x=0.0$ وبالتعويض فإن:

$$F = k\left(\Delta L - x\right) - mg = 0.0$$

أي أن:

$$k = \frac{mg}{\Delta L}$$

لكن: $\omega = \sqrt{k/m}$ ،

إذن:

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta L}{g}} = 0.1\text{sec}$$

مثال 7.7

وضع جسم كتلته $10.0kg$ على طاولة تم ربطه بسلك من الفولاذ طوله $5.0m$ ليربط الكلاب في السقف ، إذا أزيلت الطاولة فإن السلك يستطيل ويبدأ الجسم في الاهتزاز إلى أعلى وإلى أسفل بحركة توافقية بسيطة . إذا كانت مساحة مقطع السلك $1.0mm^2$ ومعامل يونج لمادته $1.9\times10.0^{11}Pa$.

فاحسب زمن الدورة للجسم .

الحل:

نعلم أن معامل يونج يعطى بالعلاقة

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

وبإعادة ترتيبها فإن القوة :

$$F = Y\frac{\Delta L}{L}A$$

لكن قانون نيوتن الثاني هو :

$$F = m\,a$$

ومن المعادلتين أعلاه نجد صيغة للتسارع هي:

$$a = \frac{F}{m} = \left(\frac{Y\,A}{m\,L}\right)\Delta L \qquad (1)$$

أي أن التسارع يتناسب طرداً مع الاستطالة وهذا يدل أن لدينا حركة توافقية بسيطة, ومعلوم في هذه الحالة أن

$$a = \omega^2\,x \qquad (2)$$

وبمقارنة المعادلتين (1) و (2) نجد أن

$$\omega^2 = \frac{\mathrm{Y\,A}}{\mathrm{m\,L}} = 4\,\pi^2\,\mathrm{f}^2$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\,\pi}\sqrt{\frac{Y\,A}{m\,L}} = \frac{1}{2\,\pi}\sqrt{\frac{1.9\times10^{11}\times\left(1.0\times10^{-6}\right)}{10.0\times5.0}}\ Hz$$

$$= 9.8\ Hz$$

$$\tau = \frac{1}{\mathrm{f}} = 0.1\,\mathrm{s}$$

مثال 7.8

علق جسم كتلته $2.0\ kg$ رأسياً بحلزون ليستطيل $5.0cm$. ثم سحب إلى أسفل مسافة إضافية قدرها $2.5cm$ ثم ترك يهتز. **احسب** زمنه الدوري وصافي قوة الهز .

الحل :

عندما كان الجسم في حالة اتزان فإن:

$$k\,\Delta L = mg$$

$$k = \frac{mg}{\Delta L} = \frac{2.0 \times 9.8}{0.05}\ N/m = 392.0\ N/m$$

$$\tau = 2\,\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\,\pi\sqrt{\frac{2.0}{392.0}} = 0.45\ s$$

وصافي قوة الهز هي

$$F = -kx = (-392.0N/m)(0.025m) = 9.8N$$

مثال 7.8

سحبت قوة مقدارها $28.0N$ حلزون رأسي ليستطيل بمقدار $12.0cm$ ، احسب كتلة جسم يعلق بالحلزون بحيث إذا اهتز كان زمنه الدوري $0.5sec$.

الحل :

لدينا قوة السحب والاستطالة ومنها يمكن معرفة ثابت الزنبرك

$$k = \frac{F}{\Delta L} = \frac{28.0\ N}{0.12\ m} = 233.3\ N/m$$

لكن

$$\tau = 2\,\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

ومنها فإن

$$m = \frac{k\,\tau^2}{4\,\pi^2} = \frac{233.3 \times 0.5^2}{4\,\pi^2}\ kg = 1.48kg$$

ويحسب الزمن الدوري من المعادلة (7.40)

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{0.9kg.m^2}{2.5kg \times .9.8m/s^2 \times 0.6m}} = 1.55\,\text{sec}\,onds$$

7.6 الحركة التوافقية البسيطة المخمدة :

Damped Simple Harmonic Motion

تطرقنا عند شرح الحركة التوافقية البسيطة المثالية إلى أن القوة التي تحدث هذه الحركة هي قوة محافظة . كانت هذه القوة هي قوة الحلزون في حالة جسم مربوط بحلزون وفي الرقاص كانت قوة الجاذبية الأرضية في البندول البسيط . ولكن مثل هذه الحركات تتعرض لقوى غير محافظة كقوة الاحتكاك ومقاومة المائع (الهواء مثلا) التي تحاول إخماد هذه الحركة عن طريق تبديد الطاقة الميكانيكية التي تصحب حركة الجسم أو خلال الوسط الذي ينتج القوة غير المحافظة .

إن مقاومة المائع أو قوة الاحتكاك تتناسب طردًا مع سرعة الجسم بشكل تقريبي وعليه فإن قانون نيوتن الثاني الذي يصف حركة الجسم يمكن كتابته بشكل أكثر دقة كالتالي :

$$m\frac{d2x}{dt^2} = -kx - b\frac{dx}{dt}$$

أو

$$m\frac{d2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + kx = 0 \qquad (7.41)$$

حيث يصف الحد $-b\frac{dx}{dt}$ مقاومة المائع أو قوة الاحتكاك وb ثابت موجب يسمى عامل الإخماد (Damping coefficient) . إن الحل العام للمعادلة

التفاضلية أعلاه هو:

$$x = A_0 e^{-bt/2m}\cos(\omega' t + \theta) = A_0 e^{-\omega_b t}\cos(\omega' t + \theta) \qquad (7.42)$$

حيث تكون سعة الذبذبة في هذه الحالة هي $A_0 e^{-\omega_b t}$ والتي تتغير مع الزمن نتيجة لضياع جزء من الطاقة الميكانيكية للجسم المهتز الذي يتذبذب بتردد زاوي مقداره ω'.

وقيمتها يمكن معرفتها من تعويض المعادلة (7.42) في المعادلة (7.41) فينتج أن:

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - (\frac{b}{2m})^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \omega_b^2} \qquad (7.43)$$

أما قيم الثابتين θ و A_0 فيمكن معرفتهما من شروط بدء الحركة أي موقع وسرعة الجسم عند بداية الحركة أي عند الزمن $t=0$. ويُسمى الثابت $\omega_b = \frac{b}{2m}$ بالتردد الزاوي الإخمـادي (Damping angular frequency) و A_0 بسعة الذبذبة عند بدء الحركة .

إن طبيعة الحركة الاهتزازية مع الزمن يعتمد على قيمة $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ بالنسبة لقيمة w_b

7.7 الرنين والحركة التوافقية البسيطة المجبرة

Resonance and Forced Simple Harmonic Motion

لنأخذ جسماً يتحرك حركة توافقية بسيطة وتؤثر عليه قوة غير محافظة تحاول إخماد حركته بالإضافة إلى قوة خارجية محركة تجبره على الاهتزاز مثل

$$F = F_0 \cos\omega t$$

حيث تكون القيمة العظمى للقوة المحركة F تساوي الثابت F_0 وتتغير مع الزمن كدالة جيب التمام $(\cos\omega t)$ ويسمى هذا النوع من الحركة بالاهتزاز المجبر (Forced oscillation). يلاحظ أن معادلة الحركة تحوي ثلاثة ترددات زاوية تختلف في مصدرها وطبيعتها وقيمتها عن بعضها فالأولى هي التردد الزاوي للقوة المحدثة للاهتزاز المجبر F ، والثانية التردد الزاوي الطبيعي $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ والمصحوبة بالاهتزاز المثالي . والثالثة التردد الزاوي الإخمادي $\omega_b = \frac{b}{2m}$ ويمكن أن يأخذ التردد الزاوي ω أية قيمة بينما تعتمد ω_0 وω_b على الجسم والقوة المحدثة للاهتزاز مثل قوة الزنبرك (F_s) وطبيعة الوسط .

تؤثر على الكتلة المهتزة في هذه الحالة ثلاث قوى هي قوة الإعادة $(-kx)$ وقوة الإخماد والقوة المحركة $(F_0 \cos\omega t)$ وعند تطبيق قانون نيوتن الثاني على حركة جسم كتلته m فإن معادلة الحركة تصبح :

$$m\frac{d2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + kx - F_0\cos\omega t = 0 \quad (7.44)$$

وسنكتفي بالإشارة إلى الحل وشرح ظاهرة الرنين (Resonance) فقط . أما الحل للمعادلة(7.44) فهو :

$$x = A\cos(\omega t + \theta) \quad (7.45)$$

حيث تكون سعة الذبذبة في هذه الحالة :

$$A = \frac{F_0/m}{[(\omega_0^2 - \omega^2) + (2\omega\omega_b)^2]^{1/2}} \quad (7.46)$$

وفي الحالة التي يكون التردد الزاوي ω للقوة F مساويا للتردد الزاوي الطبيعي ω_0 للجسم المهتز دون إخماد عندها نقول إن الجسم قد تناغم في تردده مع

وبقسمة المعادلة الثانية على المعادلة الأولى فإن

$\tan\theta = 1$ أي أن $\theta = \frac{\pi}{4}$

وبالتعويض عن θ فإن

$$a = 10\sqrt{2}cm = 14.14cm$$

أي أن سعة الموجة هي

$$(14.14e^{-t})$$

وبالتعويض عن السعة في المعادلة (1) فإن موضع الجسم عند أي لحظة هو

$$x = 14.14e^{-t}\cos(t + \frac{\pi}{4})$$

$$10\frac{d2x}{dt^2}+20\frac{dx}{dt}+50x=0$$

والتي لها الحل العام

$$x=ae^{-bt/2m}\cos(\omega t+\theta) \qquad (1)$$

حيث a هي السعة. هذا الحل يمكن كتابته أيضا بالصيغة

$$x=e^{-bt/2m}(A\cos\omega_b t+B\sin\omega_b t)$$

وحيث إنه عند $t=0.0$ تكون $x=10.0cm$ فإن $A=10.0cm$

إذن

$$x=e^{-t}(10\cos t+B\sin t)$$

وبالتفاضل نحصل على

$$\frac{dx}{dt}=-x+e^{-t}(-10\sin t+B\cos t)$$

ومن الشروط الابتدائية عند $t=0.0$ و $\frac{dx}{dt}=0.0$ فإن

$$-10.0cm+B=0$$ ومنها فإن $B=10.0cm$

إذن يكون للحل الصيغة

$$x=10e^{-t}(\cos t+\sin t) \qquad (2)$$

ولمعرفة زاوية الطور θ فإننا نساوي المعادلتين (1) و (2) لنحصل على

$$10\cos t+10\sin t=a(\cos t\cos\theta+\sin t\sin\theta)$$

من هـذه المعادلة نجد أن

$$10=a\cos\theta \quad و \quad 10=a\sin\theta$$

مسـائـل

1- أثرت قوة سحب أفقية على جسم كتلته $0.2kg$ ربط بزنبرك ثابت الإعادة له $100.0N/m$ بدأ الجسم حركته التوافقية بطاقة كامنة $0.5J$ وطاقة حركة $0.3J$ احسب :

أ–السعة ، التردد ، الزمن الدورى ، التردد الزاوي .

ب– الطاقة الكامنة عند إزاحة تساوى نصف السعة .

ج–الإزاحة التى عندها تتساوى طاقتا الحركة والكمون .

د–السرعة عند منتصف المسار.

2– يتحرك جسم توافقيا بتردد $5.0\ Hz$ وسعة $15.0\ cm$ احسب :

أ– القيمة الكبرى للسرعة والتسارع.

ب– السرعة والتسارع عند إزاحة $8.0\ cm$.

ج– الزمن اللازم ليتحرك الجسم من نقطة الاتزان إلى نقطة تبعد $10.0\ cm$ عنها.

3 – علق جسم كتلته $0.5\ kg$ في زنبرك يصنع 5.0 ذبذبات في الثانية وسعته $5.0cm$. احسب طاقة الحركة له عند إزاحة $2.5\ cm$.

4 – ربط جسم كتلته $0.5kg$ في زنبرك أفقي وعلى سطح أملس. عند تحريكه صنع 5.0 ذبذبات في الثانية. إذا أستبدل الجسم بآخر كتلته $0.25kg$, فكم يكون عدد الذبذبات في الثانيه؟

5– ربط جسم كتلته m في زنبرك أفقي وعلى سطح أملس. عند تحريكه كان تردده 1.0Hz, عند اضافة جسم آخر كتلته 1.5kg أصبح التردد 0.5Hz. احسب كتلة الجسم.

6 – جسم كتلته $250.0\ g$ ربط بحلزون ثابتة $250.0\ N/m$ ..عند الزمن صفر بدأت الحركة بإزاحة ابتدائية قدرها $10.0cm$ لتبدأ الحركة بسرعة قدرها $10.0m/s$. احسب:

أ – الزمن الدوري و التردد الزاوي . ب – الطاقة الكلية .

جـ – سعة الموجة . د – زاوية الطور .

هـ – أقصى سرعة وأقصى تسارع . و – مكان وسرعة وتسارع المكان عند زمن قدره $5.0\ sec$.

7– مكبس ماكينة سيارة يتحرك توافقيا وكان طول الأسطوانة $7.0cm$ وتردد دوران الماكينة $60.0rev/s$ وكتلة المكبس $0.5kg$. **احسب**:

أ – تسارع المكبس عند نهاية الأسطوانة .

ب – قوة الإعادة عند نهاية الأسطوانة .

ج – سرعة المكبس عند منتصف الأسطوانة .

8– يتحرك جسم حركة توافقية بسيطة ومعادلة حركته هي

$$x = 0.15\cos\left(\frac{\pi}{3}t + \frac{\pi}{4}\right)$$

احسب ما يلي :

أ – سعة الذبذبة ، زمنها ، ترددها ، وثابت الطور لها .

ب– موقع الجسم وسرعته وتسارعه بعد ثلاث ثوان من ابتداء الحركة .

ج – القيمة العظمى للسرعة والتسارع .

9- يتحرك جسم كتلته $100.0g$ حركة توافقية بسيطة وفقا للمعادلة

$$x = a\cos(\omega t + \phi_0)$$

إذا كان تردده $4.0Hz$ وسرعتة $9.0m/s$ عندما كان موقعه $0.2m$ احسب :

أ – السعة ، زاوية الطور والزمن الدورى .

ب – الطاقة الكلية للجسم .

ج – عين موقع الجسم بعد 3.0 ثوان .

10- علق جسم وزنه $50.0\ N$ من حلزون رأسي فاستطال $10.0\ cm$ حرك الجسم ليتحرك بتردد $1.5\ Hz$.

أ – احسب كتلة الجسم .

ب – احسب مكان الجسم واتجاهه عند زمن قدره $0.25sec$.

ج – احسب قوة الإعادة عند إزاحة $2.0\ cm$ تحت نقطة الاتزان .

11- علق جسم كتلته $5.0\ kg$ من حلزون . عند هزه كان تردده $2.0Hz$. كم النقص في طوله عند ازاحة الجسم ؟

12- ربط جسم كتلته $0.2\ kg$ بخيط طوله $1.0m$ حرك حركة بندولية . إذا كان طول القوس الذي يتحرك عليه الجسم $10.0\ cm$ فاحسب :

أ – تردد الجسم و سعة الذبذبة .

ب – السرعة الزاوية الكبرى وأكبر تردد زاوي .

ج – السرعة عندما يكون الجسم عند $\theta = 1.0\times10^{-2}\ rad$.

13- طفل كتلته $20.0kg$ يجلس في أرجوحة طولها L أعطيت إزاحة أفقية مقدارها $0.5\ m$ ليتحرك الطفل حركة توافقية بسيطة وبزمن دوره $15.0sec$ احسب:

أ – التردد الزاوي و طول الخيط .

ب – السعة الزاوية وأكبر سرعة زاوية, وكذلك أكبر تسارع زاوي .

ج – سرعة الطفل الخطية عند نقطة الاتزان .

د– السرعة الزاوية عند البعد الزاوي $\theta = 2.5^{\circ}$

14 – سلك خفيف يمكن إهمال وزنه طوله L يهتز حول أحد طرفيه ويحمل ثلاثة أجسام كتلها متساوية ، m ، وعلى الأبعاد $L, \frac{2L}{3}, \frac{L}{3}$ من نقطة التعليق .

احسب زمن الذبذبة .

15 – بندول بسيط زمنه الدوري $2.0\ sec$ احسب الزمن الدورى لهذا البندول على سطح القمر حيث $g_m = 1.7m/s^2$

16- طفل وزنه $160.0N$ يجلس في أرجوحة طولها $1.5m$. أعطي إزاحة أفقية مقدارها $0.4m$ فبدأ الطفل يتحرك توافقياً وبزمن دوري يساوي 10.0sec.

أ– احسب طول الأرجوحة . ب– احسب السعة الزاوية .

ج– استنتج معادلة الحركة للطفل .

د– احسب سرعة الطفل الخطية والزاوية عند نقطة الاتزان .

هـ– احسب أكبر عزم زاوي على محور الدوران .

17– أسطوانة مفرغة نصف قطر قاعدتها R وارتفاعها L وكتلتها M علقت من أحد طرفيها لتهتز اهتزازا توافقيا . احسب زمنها الدورى ثم احسب الزمن الدوري لو كانت مصمتة.

18 – مسطرة منتظمة طولها L تهتز حول نقطة تبعد مسافة X من مركزها .

أ – اثبت أن التردد الزاوى يعطى بالصيغة $\omega = \sqrt{\frac{g\,X}{L^2/12 + X^2}}$.

ب – اثبت أن أكبر قيمة للتردد الزاوي يكون عند $\left(X = \frac{L}{\sqrt{12}}\right)$.

ج – ما طول المسطرة عندما يأخذ التردد الزاوي القيمة $2\pi\,rad/s$.