كلية العلوم

القسم : **الكيمياء**

السنة : **الاولى**

المادة : فيزياء عامة١

المحاضرة : السابعة/نظري/دكتورة

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

14

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

الفصل الأول
الخواص الميكانيكية للمادة

1-1- مقدمة:

تتكون كل المواد من ذرات تربط فيما بينها قوى، وهذه القوى ذات طبيعة كهربائية أساساً، لأن الذرات نفسها مكونة من جسيمات مشحونة (الكترونات وبروتونات). والطريقة التي ترتب بها الذرات نفسها في المادة، هي التي تحدد السلوك الحجمي للمادة.

هذه الخواص الحجمية للمادة، تعرف عادة بالخواص الميكانيكية، وهي التي تمثل غالباً القدر الأكبر من الأهمية لمعظم الأغراض العلمية، بدلاً من الوصف الذري التفصيلي للمادة. وسوف نتناول بالدراسة في هذا الفصل بعض الخواص الميكانيكية كالكثافة والمرونة وضغط وانسياب الموائع.

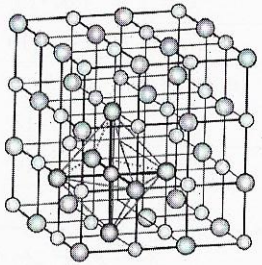
1-2- حالات المادة:

يتكون العالم من حولنا من ثلاثة أنواع متميزة من المواد: الجوامد والسوائل والغازات، وتسمى هذه الأنواع حالات المادة الثلاث. ويكمن الفرق الأساسي بين هذه الحالات في طريقة تأثير القوى بين الذرات، أو الجزيئات المكونة للمادة. ففي الغازات تكون القوى بين الذرات غير موجودة عملياً إلا أثناء التصادمات التي تحدث بين جزيئات الغاز. وهذا ما يسمح لذرات (أو جزيئات) الغاز المنفردة أن تتحرك مستقلة عن بعضها البعض. هذه الحرية في الحركة تسمح لأي غاز أن يملأ أي حجم متاح له.

أما في السوائل والجوامد، فإن هذه القوى تكون كبيرة جداً إلى درجة أن القوى الخارجية، لا يمكنها أن تغير الحجم الذي تشغله عينة من المادة الصلبة، أو السائلة تغيراً محسوساً، ولهذا يقال أن الجوامد والسوائل غير قابلة للانضغاط، علماً أنه في الجوامد ترتب القوى الذرية ذرات المادة في نظام جاسئ ثلاثي الأبعاد، أو بنية شبكية، ولهذا السبب لا تكون الجوامد غير قابلة للانضغاط وحسب، بل تكون جاسئة أيضاً بحيث تقاوم محاولات تغير شكلها. ونظراً لأن هذه البنية ثلاثية الأبعاد غير موجودة في السوائل، فإن قابلية

تشوه السوائل كبيرة بحيث تأخذ شكل الوعاء الذي توضع فيه ويمكنها الانسياب تحت تأثير القوى المؤثرة عليها.

تتوقف الحالة التي توجد فيها مادة معينة على درجة حرارتها، والضغط الخارجي المؤثر عليها. فالماء مثلاً تتغير حالته من الصلبة إلى السائلة إلى الغازية (البخارية) عند امتصاصه للحرارة. بالرغم من أن هذا التقسيم الذي يبدو بسيطاً، فإن هناك حالات كثيرة يصعب فيها التمييز بين حالات المادة. فمثلاً: معظم الجوامد لها شبكة مركبة ثلاثية الأبعاد، وتعرف هذه الجوامد بالجوامد البلورية. يمثل الشكل (1-1) التماثل المكعبي لأحد الجوامد البلورية، وهو ملح الطعام. وهناك أيضاً نوع آخر من الجوامد تكون ذراته مرتبة بطرقٍ عشوائية لا تتميز بهذا الترتيب المنتظم بعيد المدى. هذه الجوامد تسمى الجوامد الأمورفية، أو غير البلورية، وهي غالباً تنساب ببطء شديد جداً جداً، ويتغير شكلها بمرور السنين، وليس لها نقطة انصهار محددة. فعند تسخين هذه المواد تزداد تشابهاً مع السوائل بشكل تدريجي وليس فجائياً وتزداد مع ذلك قابليتها للانسياب. فالزجاج مثلاً ينساب عند درجات الحرار العالية جداً، ويشاهد مثل هذا الغموض في الانتقال بين حالات المادة عند الضغوط العالية أيضاً، حيث يكون التحول بين الحالتين الغازية، والسائلة غير واضح في كثير من المواد.



الشكل (1-1)

1-3- الكثافة والوزن النوعي:

تعرف الكثافة أنها كتلة وحدة الحجوم من المادة، وتكتب بشكل عام:

$$\text{الكثافة} = \frac{\text{كتلة المادة}}{\text{حجم المادة}}$$

ونعبر عنها رياضياً بالعلاقة:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (1\text{-}1)$$

أما وحدة قياسها في الجملة الدولية *SI*، فهي كيلو غرام لكل متر مكعب أي kg/m^3 والجدول (1-1) يمثل القيم النمطية لكثافة بعض المواد.

المادة	الكثافة kg/m^3
الغازات *	
هواء	1.29
هواء (20 °C)	1.20
هيليوم	0.179
ثاني أوكسيد الكربون	1.98
السوائل **	
ماء (0 °C)	1.00×10^3
ماء	0.998×10^3
ماء البحر	1.025×10^3
كحول إيتيلي	0.75×10^3
زئبق (20 °C)	13.6×10^3
بنزين السيارات	0.860×10^3

المادة	الكثافة kg/m^3
الجوامد (عند 20 °C)	
ألمنيوم	2.70×10^3
عظم (تقريباً)	1.8×10^3
نحاس أصفر	8.7×10^3
نحاس	8.89×10^3
زجاج (تقريباً)	2.6×10^3
ذهب	19.3×10^3
غرانيت	2.7×10^3
ثلج (0 °C)	0.92×10^3
حديد	7.86×10^3
رصاص	11.3×10^3
أوزميوم	22×10^3

* (عند 1*atm* و 0 °C ما لم ينص على غير ذلك)

** (عند 20 °C ما لم ينص على غير ذلك)

الجدول (1-1)

بما أن حجم أي مادة يتغير مع تغير حرارتها، والضغط المطبق عليها، فإن الكثافة تتعلق بهما، إذ نلاحظ أن الكثافة تقل بالتسخين نتيجة تمدد المواد، أو الأجسام. والاستثناء المشهور من هذه القاعدة هو الماء بين درجتي 0 °C و 4 °C ففي حالة الثلج تكون جزيئات (H_2O) مركبة في شبكة ذرات الأوكسجين فيها مجسمات رباعية السطوح، وهذا الترتيب في ثلاثة أبعاد يؤدي إلى تكوين قرص نحل من الفراغات السداسية بين المجسمات رباعية السطوح، ولهذا تكون كثافة الثلج صغيرة نسبياً، وعند انصهار الثلج تظل بعض المجسمات رباعية السطوح موجودة عن 0 °C، لكنها تستطيع الحركة بالنسبة إلى جيرانها لتملأ بعض الفراغات السداسية الخالية. وهذا يؤدي إلى زيادة قدرها 10% تقريباً في الكثافة عند الانصهار. وإذا ما ارتفعت درجة الحرارة من 4 °C فما فوق، فسوف تتسبب الطاقة الحرارية العالية للجزيئات في زيادة متوسط المسافة بين الجزيئات كما في حالة المواد الأخرى.

هذا ويلخص الجدول (2-1) السلوك القريب لكثافة الماء حول نقطة التجمد.

درجة الحرارة 0 °C	الحالة	الكثافة (g/Cm^3)
0	صلب	0.917
0	سائل	0.9998
3.98	سائل	1.000
10	سائل	0.9997
25	سائل	0.9971
100	سائل	0.9584

الجدول (2-1): كثافة الماء

هذه الخاصية من خواص الماء لها نتائجها الهامة في العالم من حولها، فهي تعني أن الثلج يتكون في الشتاء على سطح البحيرات والأنهار، وليس في قاعها، وهذا بدوره يسمح للثلج بالانصهار في الربيع عند تعرضه للشمس والرياح الدافئة، ويحدث في عملية

التجمد أن يهبط الماء البارد من سطح البحيرة، ليسمح بذلك للماء الدافئ بالارتفاع إلى أعلى، مما يؤدي إلى أكسجة كل مستويات الماء في البحيرة مرتين كل عام. وهكذا نجد أن الماء يقل حجمه عند تسخينه من $0\ ^oC$ حتى $4\ ^oC+$ أي تزداد كثافته وإذا تابعنا تسخينه إلى درجة أعلى من $4\ ^oC$، فإن حجمه سوف يزداد وتقل كثافته، أي يتصرف كباقي السوائل. هذه الخاصة تسمى خاصة شذوذ الماء، ولو فقد الماء هذه الخاصية لماتت كل الكائنات الحية في البحار والمحيطات، وحدثت حوادث أليمة.

إنَّ الوزن النوعي خاصية مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالكثافة، ويعرف بأنه النسبة بين كثافة المادة، وكثافة الماء عند $4\ ^oC+$، ونرمز له (SG) وتكتب:

$$\left(SG=\frac{\rho}{\rho_{H_2O}}\right) \qquad (1\text{-}2)$$

نلاحظ أن الوزن النوعي عدد لا بعد له.

مثال:

مكعب من اليورانيوم كثافته $\rho=18680\ Kg/m^3$ طول ضلعه $2\ Cm$، والمطلوب:

1- أوجد كتلته.

2- ما طول ضلع مكعب من الثلج كثافته $\rho=920\ Kg/m^3$ له نفس الكتلة.

الحل:

1- من تعريف الكثافة $\left(\rho=\frac{m}{V}\right)$ نجد أن:

$$m=\rho V=18680\times\left(2\times10^{-2}\right)^3=0.149\,kg$$

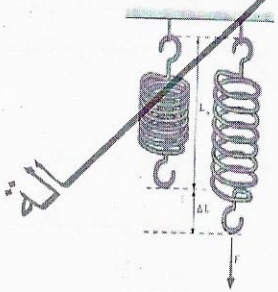
2-

$$V=\frac{m}{\rho}=\frac{0.149}{920}=162\times10^{-6}m^3$$

$$\Rightarrow l=\sqrt[3]{162\times10^{-6}}=5.452\times10^{-2}\,m=5.452Cm$$

1-4- قانون هوك، معاملات المرونة:

يتميز كثير من الأجسام كالنابض، أو القضيب المعدني. بخاصية تسمى المرونة، فعندما يستطيل الجسم، أو ينضغط تحت تأثير قوة ما، فإنه يميل إلى العودة إلى طوله الأصلي عند إزالة القوة المؤثرة. لنفرض أن النابض المعين بالشكل (2-1) طوله الأصلي (L_0)، وأنه قد استطال بمقدار (ΔL_0) تحت تأثير القوة F. قام بدراسة هذا السلوك روبرت هوك (1635-1703) فوجد أن الاستطالات تتضاعف مرتين إذا تضاعفت القوة المؤثرة مرتين، بشرط ألا تكون الاستطالة كبيرة جداً، أي أن $(\Delta L\sim F)$ عموماً. وقد وضع هوك اكتشافاته هذه في صورة قاعدة تعرف الآن بقانون هوك (عندما يمتد جسم مرن، أو يتشوه بأي صورة أخرى، فإن مقدار التشوه يتناسب خطياً مع القوة المشوهة). ولكن عند استطالة النابض بمقدار كبير بحيث يتعدى ما يعرف بحد المرونة، فإنه ينحرف عن هذا التناسب الطردي بين F و (ΔL). علاوة على ذلك، نلاحظ أن النابض لن يعود إلى طوله الأصلي عند إزالة القوة المؤثرة.

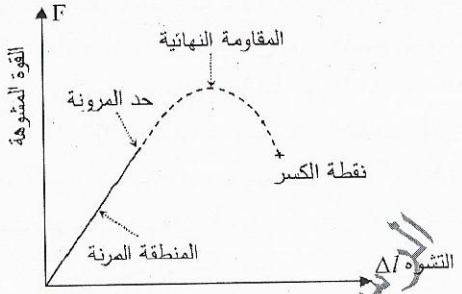


الشكل (2-1)

في الشكل (2-1) يتناسب التشوه (ΔL) تناسباً طردياً مع F في حالة هذا النابض الذي يتبع قانون هوك.

عند استبدال النابض بقضيب مصمت، سنجد أن القضيب يتبع قانون هوك، ولكن الاستطالة النسبية للقضيب أصغر كثيراً من قيمتها في حالة النابض.

يوضح الشكل (*1-3*) السلوك المشاهد عملياً في تجربة نموذجية من هذا النوع. نلاحظ أن قانون هوك ينطبق في المنطقة المرنة فقط.



الشكل (*1-3*)

لاستخدام قانون هوك في وصف الخواص المرنة للجوامد، سنستخدم مصطلحين هامين هما الإجهاد والانفعال. إذا استطال القضيب المبين بالشكل (*1-4*) بمقدار (ΔL) نتيجة تأثير القوة F العمودية على مقطعه A، فإن الإجهاد يعرف كما يلي:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2}\right] \quad \text{أي} \quad \text{الاجهاد} = \frac{\text{القوة}}{\text{السطح}} \qquad (1\text{-}3)$$

أما انفعال القضيب (التغير النسبي في الطول):

$$\text{الانفعال} = \frac{\text{الاستطالة}}{\text{الطول الأصلي}} = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (1\text{-}4)$$

بما أن الانفعال نسبة بين طولين، فإنه كمية ليس لها وحدة قياس. نسمي الانفعال في الحالة السابقة بانفعال الشد، ويمكن أن يكون انفعال ضغط عندما تطبق القوة في اتجاه موازٍ لطوله.

الآن يمكننا إعادة صياغة قانون هوك، حيث الإجهاد مقياس للقوة المشوهة، والانفعال مقياس للتشوه، بالشكل:

$$\text{الإجهاد} = \text{(ثابت)} \times \text{(الانفعال)} \qquad (1\text{-}5)$$

وهكذا يمكن تطبيق قانون هوك على حالات كثيرة تختلف عن استطالة القضيب، فهو صالح للتطبيق في حالات الاستطالة والانحناء، وفي العديد من النوابض، والأجسام الأخرى، مع العلم أن قانون هوك ينطبق فقط في المنطقة المرنة من التشوهات. يعتمد ثابت التناسب في العلاقة (*1-5*) على طبيعة المادة، ونوع التشوه الذي تعانيه، ويعرف بمعامل المرونة، أي:

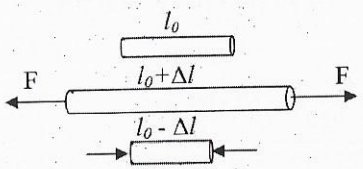
$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}} \qquad (1\text{-}6)$$

نلاحظ أن وحدة معامل المرونة ($N.m^{-2}$). ولذلك يكون معامل المرونة كبيراً عندما يسبب الإجهاد الكبير انفعالاً صغيراً، وعليه فإن معامل المرونة مقياس لصلابة المادة. وهناك عدة أنواع من معاملات المرونة، وهنا يتوقف على تفاصيل الطريقة التي تستطيل بها المادة، أو تنحني، أو تتشوه بأي طريقة من الطرق. لنناقش الآن أكثر هذه المعاملات استخداماً.

1-5- معامل يونغ:

يعرف الإجهاد المؤثر عمودياً على مساحة معينة، وفي بعد واحد. كما في الشكل (*1-4*) بالإجهاد الطولي، وهذا النوع يمكن أن يكون إجهاد شد (يسبب استطالة الجسم)، أو إجهاد تضاغط (يسبب تقصير الجسم) في بعد واحد، ويسمى معامل المرونة الذي يصف التغير النسبي في الطول في هاتين الحالتين بمعامل يونغ، ويرمز له بـ (Y).

$$Y = \frac{F / A}{\Delta L / L_0} \qquad (1\text{-}7)$$



الشكل (*1-4*)

يمثل الجدول (1-3) القيم النمطية للمعامل (Y) لبعض المواد، ويحتوي على قيم حد المرونة، ومقاومة الشد. حيث نلاحظ أنه إذا زاد الإجهاد المطبق على المادة عن حد المرونة، فإن المادة لن تعود إلى طولها الأصلي، بل ستحتفظ باستطالة دائمة إذا ما أزيل الإجهاد المؤثر عليها. كذلك فإن مقاومة الشد تعرف أنها إجهاد الشد الذي يسبب كسر المادة.

المادة	معامل يونغ $10^9\ N/m^2$	معامل القص $10^9\ N/m^2$	معامل المرونة الحجمية $10^9\ N/m^2$	حد المرونة $10^9\ N/m^2$	مقاومة الشد $10^3\ N/m^2$
ألمنيوم	70	23	70	0.13	0.14
نحاس أصفر	90	36	60	0.35	0.45
نحاس	110	42	140	0.15	
زجاج	55	23	37		
حديد (مدلفن)	90	70	100	0.17	0.32
رصاص (مدلفن)	16	6	8		0.02
بولي ستيرين	1.4	0.5	5		0.05
مطاط	0.004	0.001	3		0.03
صلب	200	80	160	0.24	0.48
تنجستين	350	120	20		0.41
بنزين (عطري)			1.0		
زئبق			28		
ماء			2.2		
هواء			1×10^{-4}		

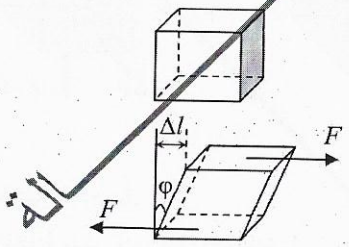
الجدول (1-3)

1-6- معامل القص (المرونة القصية):

لنفرض أننا حاولنا تشويه مكعب من مادة ما بالطريقة الموضحة في الشكل (1-5) حيث أثرت على المكعب قوة باتجاه مواز للوجه العلوي للمكعب

حيث مساحة الوجه A، مما أدى إلى تحريك الوجهين العلوي والسفلي للمكعب في اتجاهين متضادين متوازيين وهذا ما يسمى بالقص ويعرف الإجهاد القصي في هذه الحالة بأنه $\left(\frac{F}{A}\right)$ كما يعرف الانفعال القصي بالنسبة $\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)$ حيث L_0 هو سمك المادة مقاساً على استقامة خط شاقولي كما في الشكل (1-5). عند تأثير قوة القص سوف يتشوه هذا الخط الشاقولي بزاوية مقدارها φ تسمى زاوية القص. أما ΔL فيمثل مقدار إزاحة إحدى نهايتي هذا الخط بالنسبة إلى موضعها الأصلي. وهكذا من الشكل (1-5) نجد أن الانفعال القصي يصبح $\frac{\Delta L}{L_0} = \tan\varphi$ ومن التعريف العام لمعامل المرونة نجد أن معامل المرونة القصية S هو:

$$S = \frac{F/A}{\Delta L / L_0} = \frac{F/A}{\tan\varphi} \qquad (1\text{-}8)$$



الشكل (1-5)

وعندما تكون زاوية القص صغيرة (بضع درجات أو أقل)، يمكن استخدام التقريب $\tan\varphi \approx \varphi$ وكتابة:

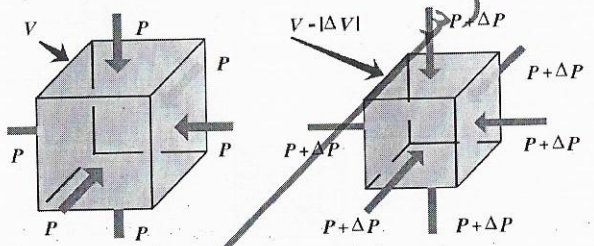
$$S = \left(\frac{F}{A}\right)\Big/\varphi$$

ويتضمن الجدول (1-3) القيم النمطية للمعامل S لبعض المواد، ويلاحظ أن $S=0$ للسوائل لأنها تنساب بسهولة تحت تأثير القوى القاصة.

1-7- معامل الحجم (المرونة الحجمية):

لنفرض أن قالباً مكعباً حجمه V_0 قد تعرض لزيادة في الضغط على جميع أوجهه بمقدار ΔP كما في الشكل (1-6)، عندئذ سيكون التغير في حجم المكعب ΔV عدداً سالباً لأن الحجم يقل، وفي هذه الحالة يعرف الانفعال أنه $\frac{\Delta V}{V}$، ويكون الإجهاد $\frac{F}{A}$ هو الزيادة في الضغط ΔP. وكما في حالة الأنواع الأخرى من معاملات المرونة يعرف معامل المرونة الحجمية أنه النسبة بين الإجهاد والانفعال:

$$\text{معامل المرونة الحجمية} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_0} \qquad (1\text{-}9)$$



الشكل (1-6)

1-8- الانضغاطية الحجمية:

انضغاطية المادة k مقياس قابلية المادة للانضغاط، أي أن الانضغاطية الحجمية هي مجرد مقلوب معامل المرونة الحجمية. وعادة تكتب معادلة تعريف الانضغاطية الحجمية على الصورة:

$$-\frac{\Delta V}{V_0} = k\,\Delta P \qquad (1\text{-}10)$$

نلاحظ أن وحدات الانضغاطية، هي وحدات مقلوب الضغط، كما أن انضغاطية السوائل عموماً أكبر بكثير من انضغاطية الجوامد.

مثال:

كرة كتلتها $40\ Kg$ معلقة في قاعة محاضرات كبيرة بسلك من الفولاذ طوله $5\ m$ والمطلوب:

1- ما هي مساحة مقطع السلك إذا كان الإجهاد المؤثر يساوي 10% من إجهاد الكسر؟

2- ما مقدار الاستطالة التي تسببها الكرة في السلك؟

الحل:

1- نعلم أن إجهاد كسر المادة هو مقاومة شدها، بالرجوع إلى الجدول (1-3) نجد أن مقاومة شد الفولاذ هي $0.48\times109N/m^2$ ، علماً أن قوة ثقل الكرة وفق قانون نيوتن الثاني:

$$F = mg = 40 \times 9.8 \approx 390\ N$$

ولما كان الإجهاد يساوي القوة مقسومة على مساحة مقطع السلك نجد:

$$\frac{F}{A} = 0.1\times0.48\times10^{9}N/m^2$$

حيث 0.1 يمثل النسبة 10 % المذكورة في نص المسألة أما F=390 N وبالتالي:

$$A = \frac{390}{0.48\times10^{8}} = 8.1\times10^{-6}m^2$$

ولو طلب منا حساب نصف قطر المقطع القائم للسلك، نستخدم العلاقة التالية:

$$A = \pi R^2 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{8.1\times10^{-6}}{3.14}} \cong 1.6mm$$

2- أما التغير النسبي في الطول هو:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\frac{F}{A}}{Y} = \frac{0.48\times10^{8}}{200\times10^{9}} = 2.4\times10^{-4}$$

إذا:

$$\Delta L = \left(204\times10^{-4}\right)(5) = 12\times10^{-4} m = 1.2mm$$

تمرين:

ما مقدار الإجهاد اللازم لكي يستطيل سلك من الألمنيوم بمقدار 0.2 % ؟

الإجابة $1.4\times10^{7} N/m^{2}$.

1-9- الضغط في الموائع:

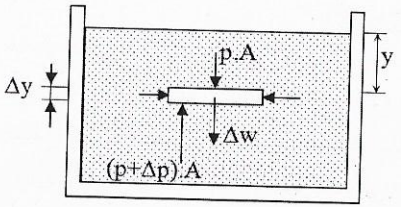
يعرف المائع بأنه مادة قابلة للسيلان، ولذا فهو يشمل بهذا المعنى السوائل والغازات، وكما قسم علم الميكانيك إلى توازن، وحركة، وتحريك، تقسم دراسة السوائل إلى قسمين: علم توازن السوائل (*Hydrostatics*) وعلم تحريك السوائل (*Hydro dynamics*) لنحسب الضغط في نقطة من سائل ساكن، والذي يعرَّف أنه نسبة القوة الناظمة ΔF التي تفعل في سطح صغير عنصري ΔA محيط بالنقطة التي تحسب الضغط فيها، إلى مساحة هذا السطح ΔA، أي:

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta A} \qquad (1\text{-}11)$$

فإذا كانت القوة واحدة على كامل مساحة السطح A فإن:

$$P = \frac{F}{A} \qquad (1\text{-}12)$$

لحساب الضغط في نقطة ما تقع على عمق y من سطح سائل ما، ينظر إلى السائل الموضوع في الوعاء المبين في الشكل (*1-7*)، ولتكن النقطة المطلوب حساب الضغط فيها تقع على عمق y من سطحه، ولنتأمل في شريحة منه تحيط بالنقطة المراد حساب الضغط فيها، ولتكن مساحتها A، وسماكتها Δy. بما أن السائل متوازن، فإن هذه الشريحة متوازنة أيضاً، وبالتالي فإن محصلة القوى التي تخضع لها تساوي الصفر.



الشكل (*1-7*)

فإذا كان الضغط عند العمق y هو P وعند العمق $y+\Delta y$ هو $P+\Delta P$ ، فإننا نستطيع أن نكتب بالنسبة للقوى الشاقولية:

$$(P+\Delta P)A = pA + \rho g A \Delta y \qquad (1\text{-}13)$$

حيث $A\Delta y$ حجم الشريحة، كما أن محصلة القوى الأفقية معدومة، لأنها متساوية، ومتعاكسة، وعلى حامل واحد.

باختصار العلاقة (*1-13*) نجد:

$$\Delta P = \rho g \Delta y \qquad (1\text{-}14)$$

فإذا كان لدينا نقطتان من السائل: الأولى هي التي على عمق y، والثانية على سطح السائل، فإنه يمكن كتابة العلاقة (*1-14*) بدلالة التفاضل dp و dy بالشكل:

$$dP=\rho g\, dy$$

وبالانتقال إلى تكاملين من P_1 إلى P_2، ومن y_1 إلى y_2 نجد:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = \int_{y_1} \rho g\, dy$$

أي أن:

$$P_2 - P_1 = \rho g\left(y_2 - y_1\right)$$

فإذا اخترنا مبدأ الإحداثيات على سطح لسائل كان $y_1=0$ وبالتالي:

$$P_2 = P_1 + \rho g y_2 \qquad (1\text{-}15)$$

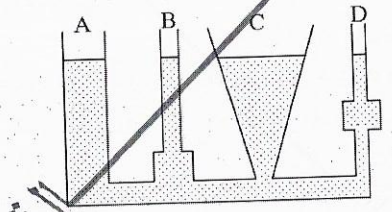
فإذا رمزنا بـ P_a للضغط على السطح أي $P_1=P_a$، وبـ h لعمق النقطة تحت سطح السائل، و بـ P للضغط عند العمق h فإن:

$$P = P_a + \rho g h \qquad (1\text{-}16)$$

من العلاقة السابقة نلاحظ ما يلي:

1- إن الضغط في نقطة من سائل مستقل عن شكل الوعاء الذي يوضع فيه، وتابع فقط لعمق النقطة تحت السطح، ولطبيعة السائل، وللضغط على سطحه. بناءً على ما تقدم إذا تصورنا جملة أوانٍ كالمبينة بالشكل (*1-8*) ملأناها بالسائل ذاته على ارتفاع واحد، ثم وصلناها ببعضها بأنبوب أفقي فإن سوية السائل تبقى واحدة في جميع الأواني على الرغم من اختلاف كمية السائل الذي يحتوي عليه كل وعاء عن الآخر.

2- إذا كان السائل مكشوفاً للوسط الخارجي، كان P_a ممثلاً للضغط الجوي. ولو وضع مكبس على سطح السائل، وكان هذا المكبس ذا ضغط ما معين لكان P_a مساوياً للضغط الجوي مضافاً إليه ضغط المكبس، وينتقل هذا الضغط الإضافي إلى جميع أجزاء السائل بدون استثناء. وهذا ما يعرف بمبدأ باسكال الذي يعتبر الأساس النظري لعمل الروافع والمكابس الهيدروليكية، وكذلك أنظمة الفرامل الهيدروليكية.



الشكل (*1-8*)

مما سبق نخلص إلى النتائج الآتية:

1- في السائل الساكن تكون القوى التي يؤثر بها السائل عمودية دائماً على الأسطح الملامسة له.

2- في السائل الساكن يجب أن تكون محصلة القوى المؤثرة على أي عنصر حجمي صفراً.

3- الضغط الناتج عن وزن السائل عند أي نقطة تقع على عمق قدره h تحت سطح سائل كثافته ρ يساوي $\rho g h$.

4- إذا سببت قوة خارجية ما زيادة في الضغط عند أي نقطة في مائع ما محبوس غير قابل للانضغاط، فإن الضغط يزداد عند كل نقاط السائل بنفس المقدار، وتعرف هذه الحقيقة بمبدأ باسكال.

5- يتساوى الضغط في سائل ساكن عند جميع النقاط التي تقع على نفس العمق.

1-10- وحدات قياس الضغط:

يقاس الضغط في الجملة (*S.I*) بالباسكال P_a ، ويعرف الباسكال بأنه قوة مقدارها نيوتن واحد تضغط عمودياً على سطح مساحته متر مربع واحد، أي:

$$1\,P_a = \frac{1\,N}{1\,m^2}$$

ووحدة الضغط في الجملة السغثية (*C, G, S*) هي dyn/cm^2 (الدينة/سم^2) وعلاقتها بالباسكال:

$$1\,P_a = 1\,\frac{N}{m^2} = \frac{kg\ m}{m^2\sec^2} = \frac{kg}{m\cdot\sec^2} = \frac{10^3\cdot g}{10^2\cdot cm\cdot\sec^2}$$

$$= 10\cdot\frac{g}{cm\cdot\sec^2} = 10\,\frac{dyn}{cm^2}$$

وهناك وحدات أخرى تستعمل لقياس الضغط، ولا تقع في أي جملة، نذكر منها:

1- البـار: (أو الهكتوبيز)، وعلاقته بالباسكال $10\,bar = 10^5\,P_a$، والبار يساوي تقريباً (الضغط الجوي النظامي) بخطأ بسيط أقل من 2%.

2- الكيلو غرام ثقلي/سنتمتر مربع:

$$\frac{1kg\cdot F}{cm^2} = \frac{9.81N}{10^{-4}m^2} = 9.81\cdot 10^4\,P_a \approx 10^5\,P_a$$

3- الأتموسفير: (الضغط الجوي النظامي): $1atm = 1.01325\ 10^5\,P_a$

4- الميليمتر زئبق: $1mm\ Hg = 133.22P_a$.

5- السنتمتر زئبق: $1cm\ Hg = 1332.2P_a$.

يقارن أحيانا ضغط الغاز، أو السائل الذي يسببه عمود من الزئبق ارتفاعه h، ومساحة مقطعه S على نفس السطح S، ولذلك يعرف الضغط الجوي أنه ضغط عمود من الزئبق ارتفاعه $76\ Cm$ على قاعدته، التي مساحتها تساوي وحدة المساحة، ومن هنا نحسب الضغط الذي يسببه عمود من الزئبق كتلته النوعية: $\rho = 13.6\ gr/Cm^3$ وارتفاعه $h = 76\ Cm$ على نفس مساحة السطح $S = 1\ Cm^2$.

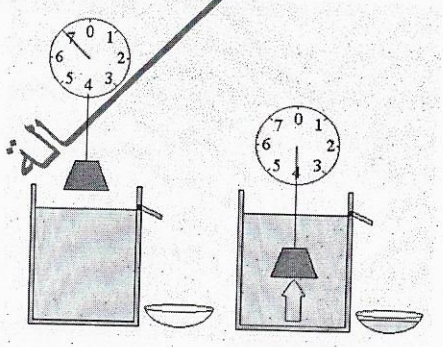
$$P = \frac{F}{S} = \frac{m\,g}{S} = \frac{\rho V\,g}{S} = \frac{\rho S\,h\,g}{S} = \rho\,g\,h$$

$$= \frac{13.6\,gr}{Cm^3} \times \frac{981\,cm}{\sec^2} \times 76Cm$$

$$= 1.013961 \times 10^6 \frac{gr}{Cm\,\sec^2} = 1.013961 \times 10^6 \frac{dyn}{Cm^2}$$

$$= 1.013961 \times 10^5\,Pa \approx 1atm \approx 1bar$$

1-11- مبدأ أرخميدس (الطفو):



الشكل (1-9)

من التجربة الموضحة بالشكل (1-9)، تتضح الحقيقة المشهورة أن الأجسام تبدو أقل وزناً عندما تكون مغمورة في سائل. وهذا واضح من الحياة العملية حيث إن القوة

اللازمة لرفع جسم مغمور في الماء أقل بكثير من وزنه، لذلك نلاحظ أن القوة الحاملة T تكون أقل عندما يكون الجسم مغموراً في الماء، والسبب أن الماء يؤثر على الجسم بقوة F إلى الأعلى، تسمى هذه القوة بقوة الطفو.

القانون الذي يصف قوة الطفو يعرف بمبدأ أرخميدس، ولمعرفة قوة الطفو نأخذ جسماً مصنوعاً من نفس مادة السائل، وفي هذه الحالة لا يمكننا تمييز الجسم عن السائل وهكذا سوف يبقى الجسم ساكناً دون الحاجة إلى قوة تحمله، وهذا يعني أنه يتوازن تحت تأثير قوة ثقله والقوة الدافعة له نحو الأعلى، وبالتالي $F=m.g$ حيث $m.g$ وزن الجسم المصنوع من السائل، أي أن قوة الطفو لسائل، تساوي وزن ذلك الحجم من السائل الذي يزيحه الجسم. إذن مبدأ أرخميدس يقول (إذا غمر جسم جزئياً، أو كلياً في مائع، فإنه يدفع رأسياً إلى أعلى بقوة تساوي وزن المائع الذي يزيحه الجسم).

فإذا فرضنا m_k كتلة الجسم المبين بالشكل و ρ كثافته ولنوجد وزنه الظاهري (قراءة الميزان الأيمن w_2) عندما يكون مغموراً في سائل كثافته ρ_L.

إن قراءة الميزان تقيس صافي القوة المؤثرة على الجسم إلى أسفل. وهذا يمثل الفرق بين قوة الجاذبية إلى الأسفل وقوة الطفو F_B إلى الأعلى:

$$w_2 = m_k \cdot g - F_B \qquad (1\text{-}17)$$

إذا كان الجسم مغموراً كلياً في السائل فإن F_B تساوي وزن السائل المزاح بوساطة حجم الجسم كله، ولكن حجم الجسم هو: $V_k = m_k / \rho_k$ وهذا يساوي حجم السائل المزاح أيضاً.

إذن وزن هذا الحجم من السائل (قوة ثقله):

$$w_1 = m_L \cdot g = \rho_L \cdot V_k \cdot g = F_B$$

وبالتالي الوزن الظاهري (قراءة الميزان الأيمن):

$$w_2 = V_k \rho_k \cdot g - \rho_L \cdot V_k \cdot g = (\rho_k - \rho_L) \cdot V_k \cdot g$$

نلاحظ:

- إذا كانت $\rho_k > \rho_L$، فإن القوة النهائية تكون إلى أسفل، وعند تحرير الجسم من الميزان فسوف يغوص في السائل.

- إذا كانت $\rho_k<\rho_L$، فإن القوة النهائية تكون إلى أعلى، وعند تحرير الجسم يرتفع داخل السائل.
- إذا كانت $\rho_k=\rho_L$، فإن الجسم المغمور لن يغوص، ولن يرتفع إلى الأعلى بل يبقى مغموراً.

مسألة:

كتلة تاج إحدى الملكات $1.3\ Kg$ ولكن عند وزنه وهو مغمور كلياً في الماء، وجد أن كتلته الظاهرية هي $1.14\ Kg$ هل التاج مصنوع من الذهب المصمت؟ علماً أن كثافة الذهب $19.3\times10^3\ Kg/m^3$

الحل:

إذا كان التاج مصنوعاً من الذهب الخالص، فإن كثافته تساوي كثافة الذهب، أما إذا كان مصنوعاً من خليط من المواد، أو مواد أخرى متجانسة، أو كان مجوفاً فإن كثافته تكون مختلفة عن كثافة الذهب، ولكن كيف يمكن حساب الكثافة دون قياس حجم التاج؟

نطبق مبدأ أرخميدس حيث وجدنا أن:

$$w_2=(\rho_k-\rho_L)\cdot V_k\cdot g \qquad (1)$$

حيث w_2: الوزن الظاهري (وزن التاج وهو مغمور في الماء).

ρ_k: كثافة التاج.

ρ_L: كثافة الماء.

g: تسارع الجاذبية الأرضية.

نضرب ونقسم الطرف الأيمن من العلاقة (1) بـ ρ_k فنجد:

$$w_2=\rho_k\cdot V_k\cdot g\left(1-\frac{\rho_L}{\rho_k}\right)$$

ولكن $w_1=\rho_k.V_k.g$ الوزن الحقيقي للتاج، إذن:

$$w_2=w_1\left(1-\frac{\rho_L}{\rho_k}\right)$$

$$\rho_k=v_k\frac{\rho_L w_1}{w_1-w_2};\ w_1=m\cdot g=1.3\cdot9.8=12.7N$$

إذن بالتعويض نجد:

$$\rho_k=\frac{1\times10^3\times12.7}{12.7-(1.14\times9.8)}=8.31\times10^3Kg/m^3$$

ولكن كثافة الذهب أكبر بكثير من هذه القيمة حيث تبلغ:

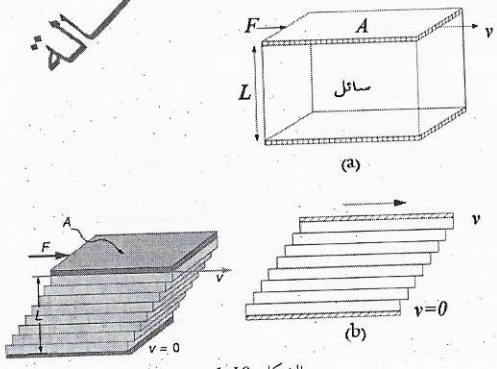
$19.3\times10^3Kg/m^3$

إذن بالتأكيد التاج ليس مصنوعاً من الذهب الخالص المصمت.

1-12- اللزوجة، وانسياب السوائل:

عسل النحل والملاس (العسل الأسود) مثالان لما يسمى بالسوائل اللزجة جداً، فهي تنساب ببطء شديد عند صبها من إناء، أما الماء والكحول، سوائل أقل لزوجة بدرجة كبيرة جداً، فهي تنساب بحرية تامة. تعرف خاصية مقاومة السوائل للانسياب (والموائع عموماً) باللزوجة.

ولكي نحصل على معنى كمي للزوجة سنستعين بتجربة القص الموضحة في الشكل (1-10). نحن نرى في هذا الشكل لوحين متوازيين مساحة كل منهما A، تفصلهما مسافة قدرها L، ولنفرض أن المنطقة بين اللوحين مملوءة بسائل سنرمز للزوجته بالرمز η



الشكل (1-10)

عندما تؤثر القوة المماسية F على اللوح العلوي، سوف يتحرك هذا اللوح بسرعة معينة، ولتكن v بالنسبة إلى اللوح السفلي، وبالطبع فإن القوة اللازمة لتحريك اللوح العلوي بهذه السرعة ستكون كبيرة، كلما كان السائل أكثر لزوجة، ويمكن وصف سرعة هذه الحركة القصية بما يسمى معدل القص للوحين، والسائل الموجود بينهما، ونعرف معدل القص كما يلي:

$$\text{معدل القص} = \frac{\text{مقدار سرعة اللوح العلوي بالنسبة إلى السفلي}}{\text{المسافة بين اللوحين}} = \frac{V}{L}$$

وهكذا فإن الإجهاد القصي $\frac{F}{A}$ المؤثر على اللوح العلوي يسبب معدل قص قدره $\frac{V}{L}$ في السائل.

تعرف لزوجة السائل η بأنها النسبة بين الإجهاد القصي، ومعدل القص:

$$\text{اللزوجة} = \eta = \frac{\text{الاجهاد القصي}}{\text{معدل القص}}$$

وكما نرى فإن السائل الأكثر لزوجة يحتاج إلى إجهاد قص أكبر لكي ينساب بمعدل قص معين.

وبالاعتماد على التجربة الموضحة في الشكل (*1-10*) يمكننا أن نرى الإجهاد القصي يساوي $\frac{F}{A}$، وأن معدل القص يساوي $\frac{v}{L}$. وباستخدام هذه الكميات المقاسة يمكن حساب لزوجة السائل:

$$\eta = \frac{\text{الاجهاد القصي}}{\text{معدل القص}} = \frac{F/A}{v/L}$$

يمكننا أن نرى من معادلة تعريف وحدة اللزوجة في *SI* هي الباسكال × ثانية (*Pa.s*). وقد أطلق اسم خاص لهذه الوحدة هو البوازيل (*Pl*) ومن الوحدات الأخرى الشائعة الاستعمال لقياس اللزوجة نذكر البويز (*P*)، حيث $1P=0.10Pl$، وسنتيبواز (*cP*).

هذه الوحدة الأخيرة يمكن تذكرها بسهولة لأنها تساوي ميلي بوازيل $1cP=1mPl$ هذا ويتضمن الجدول (*1-4*) القيم النمطية للزوجة بعض السوائل.

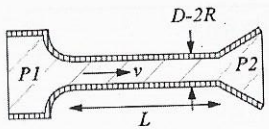
المادة	اللزوجة (*1mP*)
هواء	0.019
أسيتون	0.095
ميثانول (كحول ميثيلي)	0.510
بنزين عطري	0.584
ماء	0.801
إيثانول (كحول إيثيلي)	1.00
بلازما الدم	1.6-
الزيت *8EA* رقم 10	200
جليسرين	629
جلوكوز	6.6×10^{13}

الجدول (*1-4*)

يمكننا التعرف على معنى اللزوجة بصورة أكثر عمقاً بفحص الشكل (*1-10-b*). لاحظ أن طبقتي السائل الملامستين للوحين تظلان ملتصقتين بهما. علاوة على ذلك، يمكننا اعتبار أن السائل الموجود بين اللوحين مكون من عدد كبير من الطبقات الرقيقة، أكثر كثيراً مما هو مبين في الشكل. وعندما يتحرك اللوح العلوي تنزلق هذه الطبقات كل منها على الأخرى. ويكون الانزلاق أكثر صعوبة إذا كانت لزوجة السائل كبيرة، وفي هذه الحالة تكون كمية الشغل اللازمة لحدوث القص في السائل كبيرة.

يمثل انسياب الماء وغيره من السوائل الشبيهة به في الأنابيب، أو المواسير أهمية عملية خاصة، وهذا ما سوف نراه فيما بعد. ولمناقشة الانسياب في مثل هذه الأنابيب سوف نعرف معدل الانسياب أنه حجم السائل Q المنساب في الأنبوبة في كل ثانية،

فمثلاً عندما ينساب حجم قدره $50\ Cm^3$ من الماء خارجاً من أنبوبة كالمبينة بالشكل (*1-11*) فإن $Q=50\ Cm^3/S$.



الشكل (*1-11*)

إذا كان P_1 , P_2 يمثلان ضغط السائل عند طرفي الأنبوبة الموضحة بالشكل (*1-10*) فإن P_1-P_2 يسمى الضغط التفاضلي، وكما هو متوقع فإن معدل الانسياب خلال الأنبوبة يتناسب مع الضغط التفاضلي في حالة السوائل البسيطة. ومن المتوقع أن يزداد معدل الانسياب، كلما زاد نصف قطر الأنبوبة R، وقل طولها L. بدراسة تأثير مختلف هذه العوامل على معدل الانسياب استطاع جان لويس ماري بوازيل 1799-1879 استنتاج معادلة لانسياب السوائل في مثل هذه المواقف. وعندما لا يكون معدل الانسياب كبيراً جداً يمكن كتابة هذه المعادلة بالشكل:

$$Q=\left(\frac{\pi R^4}{8\eta L}\right)\left(P_1-P_2\right) \qquad (1\text{-}18)$$

وتعرف هذه المعادلة عادة باسم قانون بوازيل. لاحظ أن Q تتناسب مع R^4.

مثال توضيحي:

يتعرض المسنون كثيراً لمصاعب متعلقة بالدورة الدموية نتيجة تراكم الرواسب في الشرايين. بأي معامل يقل معدل انسياب الدم في شريان إذا نقص نصف قطره إلى النصف؟

الحل:

يخبرنا قانون بوازيل أن حجم الدم Q المنساب خلال شريان في الثانية الواحدة يرتبط بنصف قطره طبقاً للعلاقة:

$$Q\sim R^4$$

$$Q_0=\left(constant\right)\left(R_0^4\right)$$

في الشريان الأصلي، بينما:

$$Q=\left(constant\right)\left(R_0/2\right)^4$$

في حالة الشريان الضيق. من هاتين المعادلتين نجد أن $\frac{Q}{Q_0}=\frac{1}{16}$ أي أن معدل الانسياب يقل بمقدار قدره 16، وواضح من حقيقة أن Q يعتمد بشدة على R لماذا تنشأ مشاكل الدورة الدموية بسبب الرواسب في الشرايين.

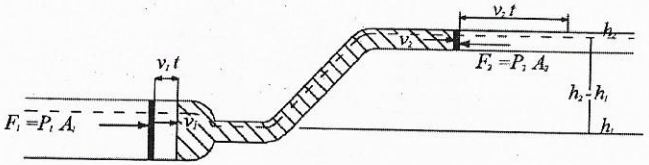
تمرين: أوجد معدل انسياب الماء في أنبوبة شعرية طولها $20\ Cm$ وقطرها $0.150\ Cm$ إذا كان الضغط التفاضلي على طول الأنبوبة $4.0\times10^3\ Pa$، اعتبر أن لزوجة الماء $0.80\ mPl$.

الإجابة: $3.1\ Cm^3/S$

1-13- معادلة برونولي:

بما أن لكل سائل لزوجة معينة، وإذا كانت اللزوجة كبيرة فإنه يلزم بذل عمل كبير لدفع السائل في أنبوبة ما. نلاحظ أنه عند حركة السائل داخل الأنبوبة، ترتفع درجة حرارته، لأن قوى الاحتكاك بين طبقات السائل أثناء الانسياب تتسبب في فقد في الطاقة تظهر على شكل حرارة. ولكن بعض السوائل تمتاز بأن لزوجتها صغيرة جداً بحيث تكون فواقد الطاقة الاحتكاكية مهملة. وفقاً لما تقدم ستوجد علاقة هامة للضغط في سائل متحرك تسمى معادلة برنولي نسبة إلى دانيل برنولي، التي نشرها عام 1738.

لندرس حالة انسياب سائل في أنبوبة كالمبينة بالشكل (*1-12*)، حيث يملأ الأنبوبة سائل غير قابل للانضغاط بين مكبسين لا احتكاكيين. لنفترض أن المكبس 1 يرفع السائل إلى اليمين بسرعة ثابتة قدرها v_1 ، أما المكبس 2 سيتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v_2.



الشكل (1-12)

في هذه الحالة تتوازن القوة F_1 المؤثرة على المكبس 1 مع القوة P_1A_1 الناتجة عن ضغط السائل حيث A_1 مساحة المكبس 1 (إذا لم تتعادل القوتان المؤثرتان على المكبس فإن محصلة القوتان ستؤدي إلى تسارعه. وقد ذكرنا سابقاً أنه يتحرك بسرعة ثابتة).

وبالمثل فإن $F_2=P_2A_2$ عند المكبس 2. إن المسافة التي يتحركها 1 في زمن قدره t هي v_1t وبالتالي فإن حجم السائل الذي يدفعه هو $A_1(v_1t)$ حيث أن السائل غير قابل للانضغاط. وهكذا فإن المكبس 2 سيفسح مكاناً لنفس الحجم من السائل، أي:

$$v_1 t A_1 = v_2 t A_2 \qquad (1\text{-}19)$$

أي:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

من تعريف الضغط نلاحظ أن $F_1=P_1A_1$ ، وطالما أن أية قوة مرتبطة بالانتقال الذي تسببه، إذن:

دخل العمل الذي بذله المكبس 1 $=P_1A_1v_1t$ ، أما عمل المكبس 2 فهو F_2v_2t وهو جزء من دخل عمل المكبس 1.

نلاحظ أن السائل المضغوط إلى اليمين بوساطة المكبس 1 ينتقل إلى الأنبوبة العلوية فيكتسب طاقة كامنة (وضع) وبما أن سرعته كانت v_1 وأصبحت v_2، إذاً طاقتها الحركية سوف تتغير. وبالطبع سوف تتحول بعض الطاقة إلى طاقة حرارية نتيجة قوى الاحتكاك التي تسببها لزوجة السائل. ولكن سنعتبر أن هذه الطاقة مهملة.

الآن لنشكل المعادلة الأساسية، وفقاً لما تقدم نكتب:

دخل العمل = خرج العمل + $\Delta E_k + \Delta E_p$

أي:

$$P_1A_1v_1t = P_2A_2v_2t + Mg\left(h_2 - h_1\right) + \frac{1}{2}Mv_2^2 - \frac{1}{2}Mv_1^2$$

حيث M كتلة الحجم V المعني من السائل وقدره A_1v_1t ومن تعريف الكثافة:

$$M=\rho A_1v_1t = \rho A_2v_2t$$

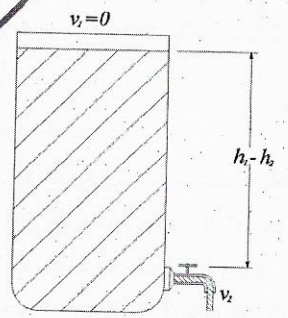
بالتعويض عن كتلة السائل في المعادلة السابقة وإعادة ترتيب حدودها نحصل على المعادلة الآتية:

$$P_1 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \qquad (1\text{-}20)$$

وهذه هي معادلة برنولي. نلاحظ أن وجود المكبسين غير ضروري لأن النقطتين 1 و2 يمكن أن تكونا أي نقطتين من السائل. طبعاً هذه المعادلة صالحة للتطبيق فقط إذا أمكن إهمال قوى الاحتكاك.

1-14- نظرية توريشيللي:

يمثل الشكل (1-13) تطبيقاً لمبدأ برنولي. هنا الشكل يمثل خزاناً كبيراً مملوءاً بسائل إلى ارتفاع h_1 من القاع وكما هو ملاحظ توجد حنفية في أسفله على ارتفاع h_2 من القاع أيضاً. فإذا كان السطح العلوي للسائل مكشوفاً. أوجد مقدار السرعة التي ينساب بها السائل من الحنفية.



الشكل (1-13)

الحل:

نطبق مبدأ برنولي على السطح (نقطة 1) وعلى السائل الموجود في الحنفية (نقطة 2)، وبما أن طرف الحنفية صغير جداً، فإن سرعة انسياب السائل منه v_2 أكبر بكثير من سرعة انسياب السائل v_1 عند السطح، وبالتالي تعتبر $v_1 \approx 0$.

لذلك تكتب معادلة برنولي كالتالي:

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

لكن:

$$P_1 \approx P_2 \approx P_a$$

إذن:

$$\rho g h_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

ومنه:

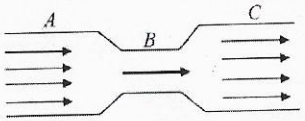
$$v_2 = \sqrt{2g\left(h_1 - h_2\right)} \qquad (1\text{-}21)$$

وهذه هي نظرية توريشيللي.

نلاحظ أن سرعة التدفق تساوي سرعة جسم يسقط سقوطاً حراً من ارتفاع $(h_1\text{-}h_2)$، وإذا وجه طرف الحنفية إلى أعلى، فإن طاقة الحركة سوف تسبب ارتفاع السائل المتدفق إلى نفس مستوى السائل في الخزان قبل السقوط. ولكن عملياً تؤدي قوى قوة طاقة اللزوجة إلى تغير النتيجة بعض الشيء.

1-15- الضغط في أنبوبة أفقية:

نفرض أن الماء ينساب في نظام أنابيب كالمبين بالشكل(*1-14*) في هذه الحالة لا بد أن يكون مقدار سرعة الماء في الأنبوبة الضيقة عند B أكبر منه عند النقطتين C و A لأن نفس الكمية من الماء يجب أن تعبر النقطة A و B و C في كل ثانية. فعلى سبيل المثال إذا كانت سرعة الانسياب عند C و A تساوي $0.200\ m/s$ وتساوي $2\ m/s$ عند B. قارن الضغط عند B بالضغط عند A.



الشكل (*1-14*)

الحل:

لنطبق معادلة برنولي مع ملاحظة أن متوسط طاقة الوضع تساوي مقداراً ثابتاً عند النقاط الثلاث جميعاً فنجد:

$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 \qquad (1\text{-}22)$$

نعوض بالقيم، حيث كثافة الماء: $\rho = 1000\ Kg/m^3$

فنجد:

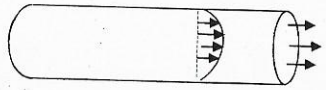
$$P_A - P_B = 1980\ Pa$$

وعليه فإن ضغط السائل داخل الاختناق أقل كثيراً منه داخل الماسورتين الكبيرتين الموجودتين على جانبيه. وربما كان هذا عكس ما قد يمكن أن يتوقعه المرء في البداية.

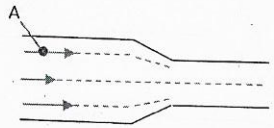
نستنتج أن الضغط يكون منخفضاً حيث تكون السرعة عالية. وهذا ما يفسر ارتفاع جناح الطائرة عند الإقلاع، حيث تكون سرعة الهواء فوق الجناح أكبر منها تحته.

1-16- الانسياب الطبقي مقابل الانسياب المضطرب:

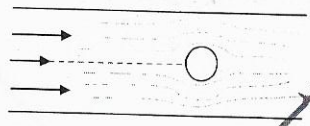
سنبيّن كيف ينساب السائل في الأنابيب، عندما يتحرك سائل في أنبوبة ما، تحاول قوى الاحتكاك التي تؤثر بها جدران الأنبوبة على السائل أن تكبح انسياب السائل مثلها في ذلك مثل قوى اللزوجة داخل السائل. ونتيجة لذلك سوف ينساب السائل الملاصق للجدران بسرعة أقل من سرعة حركة السائل القريب من منتصف الأنبوبة. ويوضح الشكل (*1-15-a*) هذه الظاهرة، حيث تمثل أطوال الأسهم مقدار السرعة في المواضع المختلفة في الأنبوبة (السرعة المحسوبة v) في المثالين السابقين هي السرعة المتوسطة عبر مقطع الماسورة).



(A) سرعة السائل



(B) خطوط الانسياب (انسياب طبقي)



(c) انسياب مضطرب

الشكل (1-15)

يمثل الشكل (1-15-b) سمة أخرى لانسياب سائل في أنبوبة، لنفرض أن ذرة دقيقة من التراب موجودة عند A، وتنساب مع السائل إذا كان معدل الانسياب منخفضاً، وسنتتبع الذرة الترابية، الخط الموضح أثناء حركتها داخل الماسورة. كذلك فإن الذرات الترابية الأخرى والسائل سوف تتبع خطوط ملساء مشابهة، ويطلق على هذه الخطوط اسم خطوط الانسياب، ويسمى هذا النوع من انسياب السوائل بالانسياب الطبقي. إذن في الانسياب الطبقي يتبع كل عنصر من السائل خط انسياب تكراري معين.

أما إذا كان مقدار سرعة الانسياب كبيراً، فسوف يحدث تغير حاد في نسق الانسياب فبدلاً من أن تكون خطوط الانسياب ناعمة ملساء، فإنها ستصبح خطوطاً ملتوية مضطربة كما هو مبين في الشكل (1-15-c)، ويعرف هذا النوع من الانسياب باسم الانسياب المضطرب.

وفي هذه الحالة تكون فواقد الطاقة الاحتكاكية (أو اللزوجة) أكبر منها في حالة الانسياب الطبقي، وهذا بدوره يسبب زيادة المقاومة الاحتكاكية على الأسطح المتلامسة

مع السائل المنساب. نلاحظ أن قانون بوازيل لا ينطبق في حالة الانسياب المضطرب. وهنا نلاحظ أنه ليس من الضروري أن يكون المائع محصوراً في أنبوبة لكي يحدث هذان النوعان من الانسياب، إذ يشاهد هذا السلوك عند انسياب المائع على أي سطح مثل جناح الطائرة، أو الأسطح الخارجية لهيكل السيارات. ونظراً لزيادة الاحتكاك المرتبط ببداية الاضطراب يحاول مصممو السيارات والطائرات تصميم أسطح الطائرات والسيارات بحيث تقل التأثيرات الاضطرابية إلى الحد الأدنى. ولهذا يكون ابتكار طريقة للتنبؤ ببداية الاضطراب على قدر كبير من الأهمية من الناحية العملية.

عندما يكون انسياب السائل حول الجسم طبقياً، تتناسب القوة المثبطة، أو قوة المقاومة F_D تناسباً خطياً مع مقدار سرعة الانسياب v. ومع ذلك فإن حساب قوة المقاومة رياضياً عملية صعبة عموماً، ولذلك فإنها تقاس عادة بالطرق العملية. فمثلاً نستخدم أنفاق من الرياح لقياس قوة المقاومة الناتجة عن انسياب الهواء على أسطح السيارات والطائرات.

فقد استطاع الفيزيائي الانكليزي ج. ستوكس استنتاج علاقة بين F_D و v في حالة كرة نصف قطرها r تتحرك بسرعة صغيرة في مائع لزوجته η، وتعرف هذه العلاقة بقانون ستوكس:

$$F_D = 6\pi\eta r v \qquad (1\text{-}23)$$

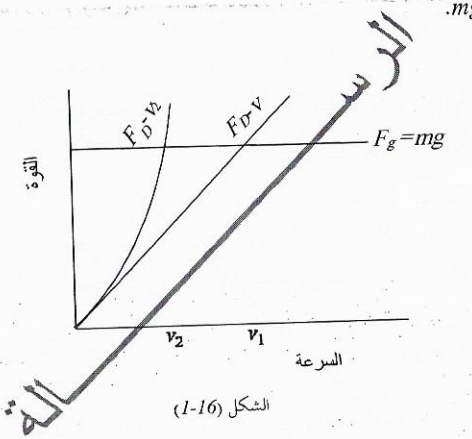
أما في السرعات العالية بدرجة كافية لحدوث الانسياب المضطرب، فإن قوة المقاومة لا تتناسب ببساطة مع مقدار السرعة، بل إنها تمثل بمتسلسلة معقدة بدلالة السرعة مرفوعة إلى أس أعلى، ولكن هذا المقرر غير مخصص لدراسة هذه الحالات فهي توافق اختصاصات أخرى.

1-17- السرعة النهائية:

في المرحلة الدراسية السابقة تعاملنا مع الأجسام الساقطة باعتبارها أجساماً تتحرك بتسارع ثابت g، ولكن هناك أمثلة كثيرة تكون فيها الأجسام الساقطة متحركة بسرعة ثابتة، وليس بتسارع ثابت خلال الجزء الأكبر من فترة سقوطها، وفي هذه الحالات

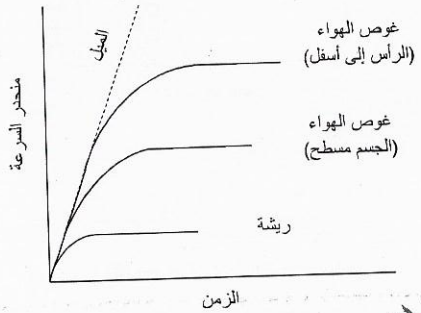
تسمى تلك السرعة الثابتة بالسرعة النهائية. وبالطبع يعني ثبوت السرعة أن صافي القوة المؤثرة على الجسم صفر، وفي هذه الحالة تكون مقاومة الهواء المؤثرة على الجسم إلى أعلى نتيجة لحركته في الهواء مساوية لقوة الجاذبية المؤثرة على الجسم إلى أسفل.

ويمكن تخيل هذا الموقف بالاستعانة بالشكل (*16-1*) الذي يمثل القوة مقابل السرعة. نلاحظ أن قوة مقاومة الهواء F_D تتناسب غالباً مع v، أو مع v^2 في بعض الحالات وهاتان الحالتان موضحتان بالشكل. وحيث أن قوة الجاذبية mg لا تعتمد على v، فإنها تظهر في الشكل على هيئة خط أفقي، وبزيادة سرعة الجسم تقترب F_D من القيمة mg.



الشكل (*16-1*)

وعندما تقل السرعة إلى v_T يتحقق شرط تلاشي القوة، ويصبح $F_D=mg$، ويمكن تمثيل هذه الحالة برسم السرعة مقابل الزمن كما في الشكل (*17-1*) حيث يبين حالة السرعات النهائية الصغيرة، والمتوسطة، والكبيرة. هذا وتعتمد السرعة النهائية على كثير من خواص الجسم الساقط ككثافته ومساحته الأمامية وشكله.



الشكل (*17-1*)

مثال:

تهبط الدقائق المعلقة في سائل بسرعة نهائية، تعرف بمعدل الترسيب. أوجد معدل الترسيب لدقائق كروية الشكل نصف قطرها $r=2\times10^{-3}$ عند سقوطها في ماء درجة حرارته 20 ℃ علماً أن كثافة مادة الدقائق 1050 Kg/m^3 ولزوجة الماء 1 mPl.

الحل:

إن معدل الترسيب هو سرعة نهائية لذلك يجب أن تكون محصلة القوى المؤثرة على الدقائق صفراً، علماً أن القوى المؤثرة هي قوة الجاذبية إلى أسفل، وقوة الطفو (دافعة أرخميدس) إلى أعلى، وقوة اللزوجة. وتكتب رياضياً هذه القوى بالشكل:

$F_g=mg$ (نيوتن)

$F_D=6\,\pi\,\eta\,r\,v_t$ (ستوكس) $\quad F_B=\rho_f Vg$ (أرخميدس)

ولكن عندما تكون المحصلة صفراً أي عندما يكون السائل متوازناً فإن مجموع القوى الخارجية يجب أن يكون مساوياً للصفر، أي:

$$m\,g=\rho_f Vg+6\,\pi\,\eta\,r\,v_t$$

حيث:

$$V=\frac{4}{3}\pi r^3, \quad m=\rho_f\left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3$$

بالتعويض والإصلاح نجد:

$$\rho_P\left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3.g-\rho_f\left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3.g-6\pi\eta r v_t=0$$

$$\rho_P\left(\frac{4}{3}\right)r^2.g-\rho_f\left(\frac{4}{3}\right)r^2.g-6\eta v_t=0$$

$$\left(\rho_p-\rho_f\right)\frac{4}{3}r^2g-6\eta v_t=0$$

$$v_t=\left(\rho_p-\rho_f\right)\frac{4}{3}r^2g\times\frac{1}{6\eta}=\left(\rho_p-\rho_f\right)\times\frac{2}{9\eta}r^2g$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى v_t نحصل على:

$$v_t=\frac{2r^2}{9\eta}g\left(\rho_p-\rho_f\right)=4.36\times10^{-3}cm/s$$

وهي سرعة منخفضة. بالرغم من ذلك فإن كأساً يحتوي على هذا المحلول سوف يروق تماماً بالترسيب خلال بضع ساعات.

كما نلاحظ أن معدل الترسيب يعتمد على الفرق بين كثافتي الدقائق والسائل وعلى مساحة مقطع الدقائق كما أن v_t تتناسب مع g.

مسائل الفصل الأول

1- كرة مصنوعة من مادة معينة نصف قطرها $3\ Cm$ وكتلتها $98\ g$ ، ما هي كثافة مادة الكرة؟

2- ما كثافة مكعب من الثلج طول ضلعه $4\ Cm$.

3- لتعيين كثافة سائل مجهول تملأ قارورة حجمها $100\ Cm^3$، وكتلتها $56.5\ g$ بهذا السائل، ثم توزن مع السائل. فإذا كانت كتلة السائل الذي يملأ القارورة $231.3\ g$، ما كثافة هذا السائل؟

4- علّق حمل كتلته $7.2\ g$ في سلك طوله $3.2\ Cm$، ونصف قطر مقطعه $0.36\ mm$ فاستطال السلك بمقدار $1.58\ mm$، ما هو معامل يونغ لمادة السلك؟

5- وضع مكعب من الجيلاتين طول ضلعه $4\ Cm$ تحت تأثير قوى قاصة قدرها $0.5\ N$ على سطحه العلوي، فأزيح هذا السطح بمقدار $2.7\ mm$. ما قيمة معامل القص للجيلاتين؟

6- إذا كان طول عمود الزئبق في بارومتر $47.6\ Cm$، ما قيمة الضغط الجوي؟

7- أنبوبة زجاجية على شكل حرف U. صب الماء في الأنبوبة حتى وصل إلى ارتفاع قدره $12\ Cm$ في الفرعين بعدئذ أضيف الكيروسين ($\rho=872\ Kg/m^3$) ببطء في أحد الفرعين إلى أن ارتفع الماء في الفرع الآخر بمقدار $5\ Cm$. ما طول عمود الكيروسين؟

8- مكعب من المعدن طول ضلعه $2\ Cm$ ، ما مقدار قوة الطفو المؤثرة عليه عندما يكون مغموراً كلياً في زيت كثافته ($\rho=864\ Kg/m^3$) ؟

9- بأيّ معامل يتغير معدل انسياب سائل في أنبوبة شعرية إذا تضاعف طولها خمس مرات وتضاعف نصف قطرها ثلاث مرات؟ افترض أن فرق الضغط عبر طرفي الأنبوبة لا يتغير.

الفصل الثاني

درجة الحرارة، ونظرية الحركة للغازات

2-1- مقدمة:

تعرفنا في الفصل الأول على طريقة قياس ضغط المائع، كما ناقشنا بعض خواص الموائع المنسابة، وسوف نوجه اهتمامنا الآن إلى مفهوم درجة الحرارة، واعتماد ضغط الغاز على درجة الحرارة. علاوة على ذلك، فإننا سوف نقوم باشتقاق تفسير فيزيائي أساسي لدرجة الحرارة بدلالة طاقة حركة ذرات الغازات، أو جزيئاته. ويسمى النموذج الجزيئي المستخدم للحصول على هذه العلاقة بنظرية الحركة للغازات.

لنبدأ أولاً بمناقشة درجة الحرارة بالأسلوب المألوف المرتبط بخبرتنا مع الترمومترات.

2-2- مفهوم درجة الحرارة:

درجة الحرارة من الأبعاد الأساسية في الفيزياء، ولكن إذا قلنا أن درجة حرارة جسم هي مقياس لسخونة، أو برودة هذا الجسم، فإن التعبير عنها بهذا الشكل يعد ناقصاً لأنه يعتمد على حواس الإنسان. لذلك سنتطرق إلى تعريف درجة الحرارة في وقت لاحق، ولكن من المعروف أن ضغط الهواء في الإطارات الساخنة للسيارات بعد قيادتها فترة زمنية يكون أكبر من قيمته في الإطارات الباردة، إذن درجة الحرارة تعتمد على الضغط السائد، وتسمى الأجهزة المستخدمة لقياس درجة الحرارة بالترمومترات، وهي تعتمد في عملها على تغير خاصة فيزيائية عند تغيّر درجة حرارتها، كالتمدد الحراري للسوائل، أو تغير فرق الكمون عند وصل معدنين مختلفين، مع تغير درجة الحرارة (مزدوجة كهرحرارية)، أو تغير المقاومة الكهربائية عند تغير درجة حرارة الناقل (ترمومتر المقاومة)، وهذا ما سنراه في الفصل الدراسي القادم من مقرر فيزياء(2).

2-3- مقاييس درجة الحرارة:

أ-مقياس سلزيوس: يتكون من أنبوبة زجاجية رفيعة جداً مغلقة، يتصل أحد طرفيها ببصيلة تعمل كخزان لسائل ترمومتري كالزئبق، أو الكحول. وبما أن السوائل تتمدد بزيادة درجة الحرارة، فإن مستوى السائل في الأنبوبة الرفيعة سيرتفع بارتفاع درجة الحرارة. علماً أن زجاج الأنبوبة يتمدد أيضاً عندما ترتفع درجة حرارته، ولكن تمدده أقل بكثير من تمدد السائل الذي في الخزان.

ويعتمد تدريج المقياس على نقطتين هامتين هما نقطة تجمد الماء (خليط من الثلج والماء) وتعتبر صفراً ونقطة غليان الماء وتعتبر مائة، وكلتا الحالتين تتم تحت الضغط الجوي النظامي.

ثم يقسم المجال بين هاتين التدريجتين إلى مائة قسم متساوٍ، يسمى كل قسم درجة مئوية واحدة.

ب- مقياس فهرنهايت: اقترح الفيزيائي الألماني جابريل **فهرنهايت** نوعاً آخر من المقاييس، إذ اعتبر $0\ ^oF$ توافق درجة تجمد الماء المالح، وأن $100\ ^oF$ تمثل درجة حرارة الجسم البشري.

إن نقطتي تجمد وغليان الماء النقي على هذا المقياس هما $32\ ^oF$ و $212\ ^oF$ وعلى الترتيب، أي أن كل $180\ ^oF$ تقابل $100\ ^oC$، وبالتالي العلاقة التي تربط بين هذين القياسين هي:

$$T_F = \frac{5}{9}t_c + 32 \qquad (2\text{-}1)$$

حيث:

$$1^oF = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}$$

جـ- مقياس كلفن، أو المقياس المطلق: يستخدم هذا المقياس في المجال العلمي، وله أهميته الخاصة، ويرمز لوحدته بـ كلفن (k)، وهو مقياس مئوي، أي كل درجة كلفن يقابلها درجة سيلزيوس، علماً أن نقطتي تجمد وغليان الماء على هذا المقياس هما

273.15 k أو 373.15 k على الترتيب، وبالتالي العلاقة التي تربط بين سيلزيوس والكلفن هي $T=t_C+273.15$.

ملاحظة: إن الحرارة تنتقل من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأكثر برودة، وهذه حقيقة معلومة لنا جيداً، ولكنّ الجسمين المتلامسين يصبحان في حالة توازن حراري بعد فترة من الزمن، إذن الأجسام، أو الأنظمة المتساوية في درجة الحرارة تكون في حالة توازن حراري مع بعضها البعض. وهذا ما يعرف بالقانون الصفري للديناميكا الحرارية الذي يمكن كتابته على الصورة الآتية: النظامان، أو الجسمان الموجودان كل على حدة في حالة اتزان حراري مع جسم ثالث يكونان في حالة اتزان حراري أحدهما مع الآخر.

2-4- المول، وعدد أفوجادرو:

يسمى عدد ذرات الكربون في كتلة قدرها 12 g من الكربون بعدد أفوجادرو N_A، وقد أثبتت التجربة أن هذا العدد هو 6.02214×10^{23} ذرة لكل 12 g من الكربون، ويستخدم هذا العدد في تعريف مقياس لكمية أي مادة، وهو الكمية المعروفة باسم المول (mol)، إذن المول من المادة هو كمية المادة التي تحتوي على عدد قدره N_A من الجسيمات. فمثلاً المول الواحد من كرات البيسبول يتكون من 6.022×10^{23} كرة بيسبول. وبالمثل يحتوي المول الواحد من الماء على عدد قدر N_A من جزيئات الماء، أي أن المول مقياس لعدد الجزيئات، أو الذرات، وليس مقياساً للكتلة، أي أن عدد أفوجادرو N_A يساوي:

$$N_A = 6.02214\times10^{23}\ particles\ per\ mol$$
$$N_A = 6.02214\times10^{26}\ particles\ /k\ mol$$

بناءً على ما تقدم نجد أن الكتلة الجزيئية (أو الذرية) M من مادة ما هي كتلة الكيلومول الواحد من المادة بالكيلوغرامات.

أي أن كتلة 1 $k\ mol$ من C^{12} هي $M=12\ Kg/k\ mol$ أما للهيدروجين $M=1\ Kg/k\ mol$، وللماء $M=18\ Kg/k\ mol$، ولغاز النيتروجين $M=28\ Kg/k\ mol$.

2-5- قانون الغاز المثالي:

نقول عن غاز إنه مثالي إذا كانت قوى الترابط بين جزيئاته معدومة، وهذا ينطبق بشكل عام على غاز الأوكسجين، والهيدروجين، والهيليوم، والآزوت، وغيرها، وذلك في درجات الحرارة العادية.

يعبر عن الغاز المثالي بالعلاقة $f(T, V, P)=0$ حيث T: درجة الحرارة المطلقة، P ضغط الغاز، V: الحجم الذي يشغله.

فإذا تغير أحد متحولات هذه الجملة الغازية أي P أو T أو V تتغير حالة الجملة ويسمى هذا التغير تحولاً. إن التحول الذي يبقى فيه الحجم ثابتاً عندما تتغير درجة الحرارة والضغط يدعى بالتحول المتساوي الحجم، وهكذا بالنسبة لبقية التحولات.

هناك بعض القوانين التي تحكم هذه الحالات، ونميز منها:

1- قانون غي لوساك: تبين أنه عند إجراء تجارب على غاز مثالي عند ثبات الضغط، وتغير كل من درجة الحرارة والحجم، فإن الحجم يرتبط بدرجة الحرارة بالعلاقة:

$$V = V_0\left(1+\alpha_p t\right)$$

حيث V_0 حجم الغاز في الدرجة (0 ^oC)، وα_P عامل التمدد الحجمي للغازات المثالية تحت ضغط ثابت، وقيمته هي $\alpha_p = \frac{1}{273}\left(^oC\right)^{-1}$، وبالتالي عند التعويض في العلاقة السابقة نجد:

$$V = V_0\left(\frac{273+1}{273}\right)$$

وفيما كانت $T = (1\ ^oC+273)$ فإننا نستنتج أن:

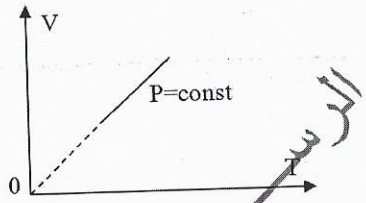
$$V = V_0\frac{T}{T_0} \quad or \quad \frac{V}{V_0}=\frac{T}{T_0}=const \qquad (2\text{-}2)$$

يدعى هذا القانون بقانون غي لوساك ويمكن صياغته كما يلي:

إذا تغيرت حالة الجملة الغازية من وضع أولي معين بالمتحولات $(T_1\ ,\ V_1\ ,\ P)$ على وضع نهائي معين بالمتحولات $(T_2\ ,\ V_2,\ P)$ أي مع بقاء الضغط ثابتاً، فإن النسبة بين الحجمين تساوي النسبة بين درجتي الحرارة، وتساوي مقداراً ثابتاً أي:

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}$$

ويمكن تمثيل ذلك بيانياً كما في الشكل (2-1):



الشكل (2-1)

2- قانون شارل لوساك: بينت التجارب التي أجريت على غاز مثالي عند ثبات حجم الغاز، وتغير كل من درجة حرارته وضغطه إن الضغط مرتبط بدرجة الحرارة بالعلاقة الآتية:

$$P = P_0\,(1+\alpha_V\,t)$$

حيث: P_0: هو ضغط الغاز في الدرجة $(0\ ^oC)$

α_V: عامل تغير ضغط الغاز تحت حجم ثابت.

وقيمة α_V العددية كما في الحالة السابقة، أي:

$$\alpha_V=\frac{1}{273}C^{-1}$$

وعند التعويض في العلاقة السابقة نجد:

$$P=P_0\left(\frac{273+1}{273}\right)$$

وبالتالي يكون:

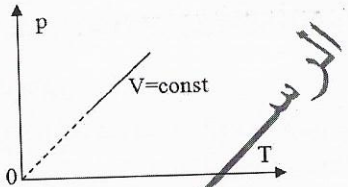
$$P=P_0\left(\frac{T}{T_0}\right),\ T=(273+t)k\ ,\ T_0=273k$$

تدعى هذه العلاقة بقانون شارل لوساك، ويمكن تعميمها كما يلي:

فإذا فرضنا وجود وضع بدائي $(T_1,\ V_1,\ P_1)$ للجملة الغازية ووضع نهائي $(T_2,\ V_1,\ P_2)$ فإن:

$$\frac{P_2}{P_1}=\frac{T_2}{T_1} \qquad (2\text{-}3)$$

أي النسبة بين الضغطين كالنسبة بين درجتي الحرارة في كلتا الحالتين، ويمكن تمثيل ذلك بيانياً كما في الشكل (2-2):



الشكل (2-2)

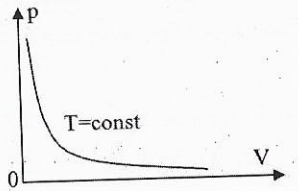
3- قانون بويل وماريوط: إن التجارب التي قام بها هذان العالمان تدل على أنه في حالة تحول متساوي الدرجة في جملة غازية يبقى جداء حجم الغاز في ضغطه ثابتاً أي أن:

$$P\,V = Const$$

فإذا انتقلت جملة غازية من وضع بدائي معين بالمتحولات $(T_1,\ V_1,\ P_1)$ إلى وضع جديد معين بالمتحولات $(T_1,\ V_2,\ P_2)$، فإن قانون بويل، وماريوط يكتب بالعلاقة:

$$P_1\,V_1 = P_2\,V_2 \qquad (2\text{-}4)$$

وبيانياً تمثل هذه العلاقة قطع زائد متساوي الساقين كما في الشكل (2-3):



الشكل (2-3)

ويمكن جمع كل ما سبق بقانون واحد، وهو القانون العام للغازات المثالية.

4- القانون العام للغازات: نفرض أنه لدينا غاز مثالي كتلته m في وضع بدائي (T_1, V_1, P_1)، ثم انتقل إلى وضع نهائي معين بوساطة المتحولات (T_2, V_2, P_2)، وتمّ هذا الانتقال بوساطة تحولين: الأول متساوي الدرجة تنتقل خلاله الجملة الغازية من الوضع البدائي إلى الوضع الجديد (T_1, V_2, P)، فبتطبيق قانون بويل ومارويط على هذه الجملة نجد:

$$P_1 V_1 = P V_2$$

الثاني: متساوي الحجم تنتقل الجمل بوساطته من الوضع (T_1, V_2, P) إلى الوضع النهائي (T_2, V_2, P_2) عندئذ: بتطبيق قانون غي لوساك نجد:

$$\frac{P}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow P = P_2 \frac{T_1}{T_2}$$

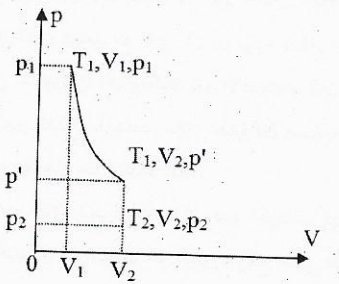
بالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على:

$$P V_1 = \frac{P_2 T V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{P V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

تدل هذه العلاقة على أن الجداء $\frac{PV}{T}$ يبقى ثابتاً مع تغير حالة الغاز وتكتب بالشكل:

$$\frac{PV}{T} = B \qquad (2\text{-}5)$$

تدعى هذه العلاقة بقانون كلابيرون، ويمكن تمثيل ما سبق بيانياً كما في الشكل (2-4):



الشكل (2-4)

إن الثابتة في العلاقة (2-5) تختلف من غاز لآخر بصورة عامة. ولكن يمكن الحصول على ثابتة صالحة من أجل جميع الغازات، حيث أن الكيلو مول من الغازات المختلفة تشغل حجوماً متساوية في نفس درجة الحرارة والضغط، وهذا الحجم في الشروط النظامية يساوي $22.4\ m^3/k\ mol$.

بناءً عليه من أجل كيلو مول واحد، تصبح العلاقة (2-5) بالشكل:

$$\frac{P \cdot V_m}{T} = R$$

حيث: V_m- حجم الكيلو مول، R:- ثابتة تدعى ثابتة الغازات العامة.

وبالتالي من أجل كيلو مول واحد لدينا:

$$P V_m = R T \qquad (2\text{-}6)$$

وبما أن حجم الغازات يتناسب طرداً مع كتلته بثبات (T, P) نجد أن:

$$\frac{V_m}{V} = \frac{\mu}{m}$$

حيث: μ كتلة الكيلو مول، وبالتالي:

$$V_m = V \cdot \frac{\mu}{m}$$

بالتعويض في العلاقة (2-6) نحصل على:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \qquad (2\text{-}7)$$

ولكن المقدار m/μ هو عدد الكيلو مولات من الغاز، ويرمز له بـ n حيث $n=m/\mu$.

إذاً n عدد الجزيئات الغرامية التي ندرسها، ونحصل عليه بتقسيم كتلة الغاز على الوزن الجزيئي للغاز أي أن القانون العام للغازات يصبح على الشكل:

$$P V = n R T \qquad (2\text{-}8)$$

وهو يحتوي على قانون غي لوساك، إذ إنه عند تحول متساوي الضغط، تنتقل فيه الجملة من الوضع البدائي (P, V, T) إلى الوضع النهائي (P, V', T)، ونحصل بتطبيق العلاقة (2-8) على الوضع الأول:

$$P V = n R T$$

وبتطبيق نفس العلاقة على الوضع الثاني نحصل على:

$$\frac{V}{V'}=\frac{T}{T'}$$

وهو قانون غي لوساك.

كذلك الأمر العلاقة (2-8) تحتوي على قانون شارل لوساك. ففي حالة تحول متساوي الحجم تنتقل الجملة من وضع بدائي (P, V, T) إلى وضع نهائي (P', V, T') نحصل بنفس الطريقة على:

$$\frac{P}{P'}=\frac{T}{T'}$$

وهو قانون شارل لوساك.

أما إذا انتقلت الجملة بتحول متساوي الدرجة، فإننا نلاحظ أن الطرف الأيمن من العلاقة (2-7) يبقى ثابتاً لأن كل من T, R, ν ثابتاً أي أن:

$$P\,V = Const$$

وهو قانون بويل وماريوط.

2-6- الأساس الجزيئي لقانون الغاز المثالي:

لقد وصفنا سابقاً سلوك الغازات بدلالة المتحولات T, V, P، والتي تدعى بالمتحولات الميكروسكوبية، أو متحولات الجملة الغازية، وهي تصف الحالة الميكروسكوبية للمادة. يتطلب الوصف الميكروسكوبي لحالة الغاز، معرفة إحداثيات وسرعة كل جزيء فيه، وهذه عملية مستحيلة. سنبين بالتحديد أن درجة الحرارة المطلقة للغاز هي قياس الطاقة الحركية المتوسطة لجزيئات الغاز. وسنقوم بذلك معتمدين نموذجاً بسيطاً لحساب الضغط الذي يطبقه الغاز على جدران خزان يوضع فيه.

فمن وجهة النظر هذه، والتي تدعى بنظرية حركية الغازات، ينتج ضغط الغاز من التصادم بين جزيئات الغاز، وجدران الحاوية. ونستطيع حساب هذا الضغط بحساب معدل تغير اندفاع (كمية الحركة) جزيئات الغاز الناتج من تصادماتها مع جدران الحاوية. ينص قانون نيوتن الثاني على أن معدل تغير الاندفاع يساوي القوة التي يطبقها الجدار

على جزيئات الغاز $F=\frac{dp}{dt}$، كما ينص قانون نيوتن الثالث على أن هذه القوة تساوي، وتعاكس القوة التي تطبقها الجزيئات على الجدار. ويعرف الضغط بأنه القوة المؤثرة على وحدة السطح.

سنبدأ بوضع الفرضيات التالية:

1- يتألف الغاز من عدد كبير جداً من الجزيئات N التي تتصادم مع بعضها، ومع جدران الحاوية اصطدامات مرنة.

2-تتباعد الجزيئات عن بعضها بعضاً مسافات كبيرة بالمقارنة مع أقطارها، ولا تؤثر إحداها على الأخرى إلا عند التصادم.

3-لا يوجد ضمن الحاوية موضع مفضل للجزيء، أو اتجاه مفضل لسرعة الجزيء في حالة عدم تعرض الجزيء إلى قوة خارجية، (وتهمل قوة الثقالة بسبب السرعة الكبيرة للجزيء).

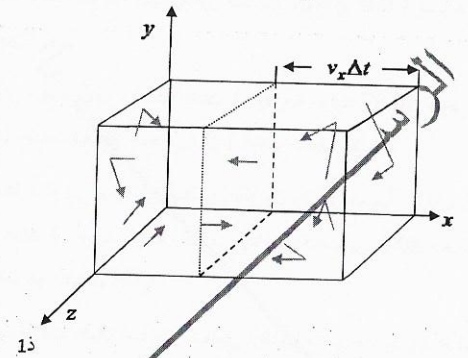
4- نقبل أن اصطدام الجزيئات هو من نوع الاصطدام التام المرونة.

تكافئ الفرضية الثانية، وهي تباعد الجزيئات عن بعضها، افتراض كثافة غاز منخفضة جداً، وهذا يماثل حالة الغاز المثالي، وبسبب انحفاظ الاندفاع، فإن تصادمات الجزيئات مع بعضها لا تؤثر على الاندفاع الكلي وفق أي اتجاه، لذلك نستطيع إهمال هذه التصادمات، سنفترض أن لدينا حاوية غاز لها شكل متوازي مستطيلات حجمها V، وتحوي N جزيء كتلة كل منها m يتحرك بسرعة v، ونود حساب القوة التي تطبقها هذه الجزيئات على الجدار الأيمن الذي يتعامد مع المحور X، إن مركبة اندفاع الجزيء وفق المحور X قبل اصطدامها بالجدار تساوي $m\,v_x$، وتكون بعد الاصطدام المرن بالجدار مساوية $-m\,v_x$ ، فيكون مقدار تغير اندفاع الجزيئات خلال الفترة Δt مساوية جداء $2\,m\,v_x$ بعدد الجزيئات التي تصطدم بالجدار خلال هذه الفترة.

يبين الشكل (2-5) جزيئات الغاز ضمن الحاوية. إن عدد الجزيئات التي تضرب الجدار الأيمن ذا السطح A هي الجزيئات التي تتحرك نحو اليمين، وتقع ضمن المسافة $v_x\Delta t$ من

الجدار، وهو عدد الجزيئات في وحدة الحجم $\frac{N}{V}$ مضروباً بالحجم $v_x \Delta t\, A$ وكذلك مضروباً بالعامل $\frac{1}{2}$ لأن نصف عدد الجزيئات يتجه نحو اليمين، والنصف الآخر نحو اليسار. إن تغير الاندفاع الكلي ΔP لجزيئات الغاز خلال فترة Δt يساوي جداء هذا العدد بتغير اندفاع الجزيء الواحد أي:

$$\Delta P = \frac{1}{2}\frac{N}{V}\left(v_x \Delta t \cdot A\right)\left(2mv_x\right) = \frac{N}{V} m v_x^2 A\, \Delta t$$



الشكل (2-5)

والقوة التي تؤثر بها الجزيئات على الجدار تساوي تغير الاندفاع مقسوماً على الفترة Δt، والضغط هو القوة مقسومة على السطح أي:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A}\frac{\Delta P}{\Delta t}$$

ومنه:

$$P = \frac{N}{V} m v_x^2 \qquad (2\text{-}9)$$

أو:

$$PV = N m v_x^2 \qquad (2\text{-}10)$$

وللأخذ في الحسبان عدم تساوي سرعة الجسيمات، نستبدل القيمة المتوسطة $\left(v_x^2\right)_{av}$ بالسرعة v_x^2 في العلاقة (2-10)، والتي يمكن كتابتها بدلالة الطاقة الحركية وفق المحور X فنجد:

$$PV = 2N\left(\frac{1}{2}mv_x^2\right)_{av} \qquad (2\text{-}11)$$

فإذا علمنا أن $R = K N_A$ حيث K ثابت بولتزمان، وN_A عدد أفوجادرو نجد:

$$PV = NKT = 2N\left(\frac{1}{2}mv_x^2\right)_{av}$$

أو:

$$\left(\frac{1}{2}mv_x^2\right)_{av} = \frac{1}{2}KT \qquad (2\text{-}12)$$

أي أن الطاقة الحركية المتوسطة المرتبطة بالحركة وفق المحور X تساوي $\frac{1}{2}KT$، ولا يوجد شيء خاص يميز الحركة وفق المحور X، إذ إن:

$$\left(v_x^2\right)_{av} = \left(v_y^2\right)_{av} = \left(v_z^2\right)_{av}$$

وكذلك:

$$\left(v^2\right)_{av} = \left(v_x^2\right)_{av} + \left(v_y^2\right)_{av} + \left(v_z^2\right)_{av}$$

أي أن:

$$\frac{1}{3}\left(v^2\right)_{av} = \left(v^2\right)_a$$

وإذا رمزنا للطاقة الحركية المتوسطة للجزيء بالرمز E_k، تصبح العلاقة (2-12) من الشكل:

$$E_k = \frac{1}{2}\left(mv^2\right)_{av} = \frac{3}{2}KT \qquad (2\text{-}13)$$

أي أن الطاقة الحركية المتوسطة للجزيء تساوي $\frac{3}{2}KT$، فدرجة الحرارة المطلقة هي قياس الطاقة الحركية الانسحابية المتوسطة للجزيء، ولقد أضيفت عبارة الانسحابية بسبب

امتلاك الجزيء طاقتين حركيتين دورانية واهتزازية. إن الطاقة الحركية الانسحابية فقط هي التي تدخل في حساب الضغط الذي يطبقه الغاز على جدران الحاوية، وتكون الطاقة الحركية الانسحابية الكلية المقابلة لعدد قدره n من المولات أي عدد يساوي N من الجزيئات مساوية:

$$E_k = N\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{av} = \frac{3}{2}NKT = \frac{3}{2}nRT \qquad (2\text{-}14)$$

وهكذا فإن الطاقة الحركية الانسحابية للجزيء تساوي $\frac{3}{2}KT$، وهي تساوي $\frac{3}{2}RT$ للمول الواحد، نستطيع استعمال النتيجة (2-13) في تقدير مرتبة سرعة جزيئات الغاز، فنحصل على القيمة المتوسطة لمربع سرعة الجزيء.

$$\left(v^2\right)_{av} = \frac{3KT}{m} = \frac{3N_AKT}{mN_A} = \frac{3RT}{M}$$

حيث: $M=N_A\,m$ وهي الكتلة المولية.

الجذر التربيعي لمتوسط مربعات السرعة يدعى جذر متوسط المربعات *rms*.

$$v_{rms} = \sqrt{\left(v^2\right)_{av}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad (2\text{-}15)$$

مثال:

إذا كانت الكتلة المولية لغاز O_2 الاوكسجين مساوية لـ $32\,g/mol$، وللهيدروجين مساوية لـ $2\,g/mol$، أحسب v_{rms} لكل من جزيء الأوكسجين وجزيء الهيدروجين في الدرجة $300\,k$.

لكي تتجانس الوحدات يجب أن نعبر عن الكتلة المولية بالوحدة kg/mol وبناءً عليه نجد في حالة جزيء الأوكسجين:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3\times 8.32\times 300}{32\times 10^{-3}}} = 483m/S$$

وفي حالة الهيدروجين:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3\times 8.32\times 300}{2\times 10^{-3}}} = 193m/S$$

مسائل الفصل الثاني

1- ما هي درجة الحرارة المطلقة المكافئة للدرجة $80\ ^oF$ ؟

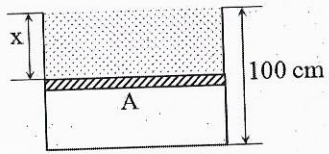
2- ما هو الحجم الذي يشغله مول واحد من غاز مثالي في الشرطين النظاميين $t=0\ ^oC$ و$P=10\ atm$؟

3- إذا كانت الكتلة المولية للهيدروجين مساوية $1.008\ g/mol$ فما هي كتلة ذرة الهيدروجين؟

4- لدينا غاز حجمه $2L$، وضغطه $1\ atm$، ودرجة حرارته $30\ ^oC$ سُخن إلى الدرجة $60\ ^oC$، وضُغط ليصبح حجمه $1.5\ L$.أوجد ضغطه الجديد.

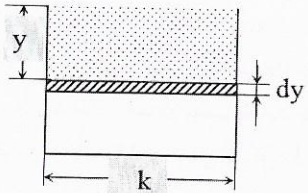
5- تشغل مائة غرام من غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 حجماً مقداره $55\ L$ تحت الضغط $1\ atm$، أوجد درجة الحرارة. وإذا زاد الحجم إلى $80\ L$ مع ثبات درجة الحرارة. فما هو الضغط الجديد؟

6- تغلق النهاية العليا لخزان اسطواني شاقولي ارتفاعه متر واحد بصورة محكمة بمكبس عديم الاحتكاك ووزنه مهمل، ويساوي الضغط المطلق للهواء المحصور في الاسطوانة ضغطاً جوياً واحداً كما هو مبين في الشكل (2-6)، يصب الزئبق ببطء على المكبس فيشرع بالانخفاض. كم يهبط المكبس قبل أن يسيل الزئبق من أعلى الاسطوانة؟



الشكل (2-6)

7- أوجد القوة التي يؤثر فيها الماء على جدار مربع لحوض طول ضلعه k كما هو مبين في الشكل (2-7)، احسب ارتفاع نقطة تطبيق القوة F عن قعر الحوض.

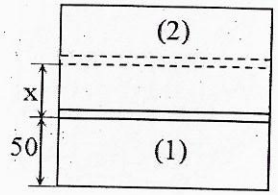


الشكل (2-7)

8- اسطوانة مغلقة من الطرفين ارتفاعها متر واحد، تحتوي على مكبس عازل للحرارة يفصل الهواء الموجود بداخلها إلى قسمين متساويين في الكتلة. درجة حرارة الغاز في كل من القسمين $t=27\ ^oC$، وضغطه يساوي الضغط الجوي النظامي p_a؛ يسخن الغاز الموجود في إحدى قسمي الاسطوانة حتى الدرجة $t=77\ ^oC$، فيرتفع المكبس ويتوقف عند وضع توازن جديد كما في الشكل (2-8) والمطلوب:

1"- ما هي المسافة التي سيتحركها المكبس نتيجة ذلك؟

2"- احسب الضغط في كل من قسمي الاسطوانة بعد توقف المكبس علماً أنه يتحرك بدون احتكاك.



الشكل (2-8)

الرســـــــــالة ٠٩٣٨٧٩٦٢٥٢

9- إذا كانت الكتلة المولية لغاز الأوكسجين O_2 مساوية لـ $32\ g/mol$، وللهيدروجين H_2 مساوية لـ $2\ g/mol$، احسب القيمة المتوسطة لمربع سرعة الأوكسجين، وجزيء الهيدروجين في الدرجة $300\ k$.

الرسالة

الفصل الأول

الخواص الميكانيكية للمادة

1-1- مقدمة:

تتكون كل المواد من ذرات تربط فيما بينها قوى، وهذه القوى ذات طبيعة كهربائية أساساً، لأن الذرات نفسها مكونة من جسيمات مشحونة (الكترونات وبروتونات). والطريقة التي ترتب بها الذرات نفسها في المادة، هي التي تحدد السلوك الحجمي للمادة.

هذه الخواص الحجمية للمادة، تعرف عادة بالخواص الميكانيكية، وهي التي تمثل غالباً القدر الأكبر من الأهمية لمعظم الأغراض العلمية، بدلاً من الوصف الذري التفصيلي للمادة. وسوف نتناول بالدراسة في هذا الفصل بعض الخواص الميكانيكية كالكثافة والمرونة وضغط وانسياب الموائع.

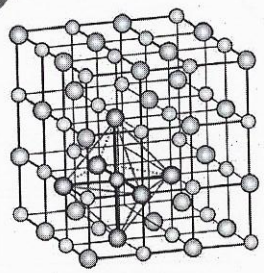
1-2- حالات المادة:

يتكون العالم من حولنا من ثلاثة أنواع متميزة من المواد: الجوامد والسوائل والغازات، وتسمى هذه الأنواع حالات المادة الثلاث. ويكمن الفرق الأساسي بين هذه الحالات في طريقة تأثير القوى بين الذرات، أو الجزيئات المكونة للمادة. ففي الغازات تكون القوى بين الذرات غير موجودة عملياً إلا أثناء التصادمات التي تحدث بين جزيئات الغاز. وهذا ما يسمح للذرات (أو جزيئات) الغاز المنفردة أن تتحرك مستقلة عن بعضها البعض. هذه الحرية في الحركة تسمح لأي غاز أن يملأ أي حجم متاح له.

أما في السوائل والجوامد، فإن هذه القوى تكون كبيرة جداً إلى درجة أن القوى الخارجية، لا يمكنها أن تغير الحجم الذي تشغله عينة من المادة الصلبة، أو السائلة تغيراً محسوساً، ولهذا يقال أن الجوامد والسوائل غير قابلة للانضغاط، علماً أنه في الجوامد ترتب القوى الذرية ذرات المادة في نظام جاسئ ثلاثي الأبعاد، أو بنية شبكية، ولهذا السبب لا تكون الجوامد غير قابلة للانضغاط وحسب، بل تكون جاسئة أيضاً بحيث تقاوم محاولات تغير شكلها. ونظراً لأن هذه البنية ثلاثية الأبعاد غير موجودة في السوائل، فإن قابلية

تشوه السوائل كبيرة بحيث تأخذ شكل الوعاء الذي توضع فيه ويمكنها الانسياب تحت تأثير القوى المؤثرة عليها.

تتوقف الحالة التي توجد فيها مادة معينة على درجة حرارتها، والضغط الخارجي المؤثر عليها. فالماء مثلاً تتغير حالته من الصلبة إلى السائلة إلى الغازية (البخارية) عند امتصاصه للحرارة. بالرغم من أن هذا التقسيم الذي يبدو بسيطاً، فإن هناك حالات كثيرة يصعب فيها التمييز بين حالات المادة. فمثلاً: معظم الجوامد لها شبكة مركبة ثلاثية الأبعاد، وتعرف هذه الجوامد بالجوامد البلورية. يمثل الشكل (1-1) التماثل المكعبي لأحد الجوامد البلورية، وهو ملح الطعام. وهناك أيضاً نوع آخر من الجوامد تكون ذراته مرتبة بطرقٍ عشوائية لا تتميز بهذا الترتيب المنتظم بعيد المدى. هذه الجوامد تسمى الجوامد الأمورفية، أو غير البلورية، وهي غالباً تنساب ببطء شديد جداً جداً، ويتغير شكلها بمرور السنين، وليس لها نقطة انصهار محددة. فعند تسخين هذه المواد تزداد تشابهاً مع السوائل بشكل تدريجي وليس فجائياً وتزداد مع ذلك قابليتها للانسياب. فالزجاج مثلاً ينساب عند درجات الحرار العالية جداً، ويشاهد مثل هذا الغموض في الانتقال بين حالات المادة عند الضغوط العالية أيضاً، حيث يكون التحول بين الحالتين الغازية، والسائلة غير واضح في كثير من المواد.



الشكل (1-1)

مكتبة

مكتبة A TO Z

فرع 1
تجمع الكليات(كلية العلوم)

فرع 2
الكورنيش الشرقي جانب MTN

طباعة محاضرات ـ قرطاسية

Mob:0931 497 960