الفصل الثالث عشر

الخصائص الميكانيكية للمادة

Mechanical Properties of Matter

بعد أن يكمل القارئ هذا الفصل، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلاله، من المتوقع أن يكون قادراً على:

1. أن يفسِّر الفروق الأساسية في الخصائص الميكانيكية للمادة في حالاتها الثلاثة.
2. أن يعرف الفرق بين مفهومي الكثافة والكثافة النسبية، ولماذا تمَّ اعتماد كثافة الماء لهذا الغرض، وعند أية ظروف.
3. أن يتمكن من فهم العلاقة بين الكتلة ومقدار تسارع الجاذبية الأرضية وأثر ذلك على الوزن.
4. أن يفسِّر مرونة الأجسام في أوضاعها المختلفة، تبعاً للكيفية التي يتعرض الجسم فيها للقوة، وتبعاً لشكل الجسم.
5. أن يربط بين مفهوم المرونة وكلٍ من مفهومي الإجهاد والانفعال.
6. أن يعرف كيفية استخدام قاعدة أرخميدس لدراسة طفو الأجسام.
7. أن يفسِّر قاعدة باسكال وأهميتها في علم الهيدروليك.
8. أن يفسِّر ظاهرة الشد السطحي من خلال التوتر السطحي والطاقة السطحية، كما يتمكن من تفسير هذه الظاهرة في الأنابيب الشعرية.
9. أن يميِّز مفهوم الانتشار في حالات المادة الثلاثة، ويفهم قانوني غراهام وفك في هذه الخاصية.
10. أن يفهم الفرق بين طريقتي العالمين بوازيل وستوك في تحديد معامل لزوجة المائع.
11. أن يعرف أهمية ما توصل إليه العالم برنولي في دراسة الحالة الحركية للموائع.

الخصائص الميكانيكية للمادة[1]

Mechanical Properties of Matter

13-1 المقدمة *Introduction*:

لعله من المناسب ونحن نضع مقدمة لهذا الفصل أن نوضح ما المقصود بالخصائص الميكانيكية للمادة. وقبل نبيِّن هذه الخصائص لا بد من التأكيد على أن المادة بصفة العموم توجد في حالات ثلاثة:

1- الحالة الجامدة *solid state matter*.

2- الحالة السائلة *liquid state matter*.

3- الحالة الغازية *gaseous state matter*.

أما المقصود بالخصائص فهو التعرف على مميزاتها الخاصة عندما توجد منفردة، ومميزاتها عندما تتعرض لتأثير عوامل خارجية عليها، أو عند تأثيرها على المواد الأخرى، ومثال ذلك: الكثافة *density*، الوزن النوعي *specific weight*، تأثير القوى عليها *force action*، الضغط وتأثيراته على المادة *pressure effects*، اللزوجة *viscosity*، انسيابيتها *continuity*، إلى ما هنالك من الخصائص الأخرى التي تمكّننا من التعرف على المادة وكيفية التعامل معها.

---

(1) نظراً لطول هذا الفصل ولكثرة الأمثلة المحلولة والمسائل والتمارين المخصصة في نهايته، فقد تجاوزنا عن وضع المسائل العامة المحلولة والأسئلة الاختيارية.

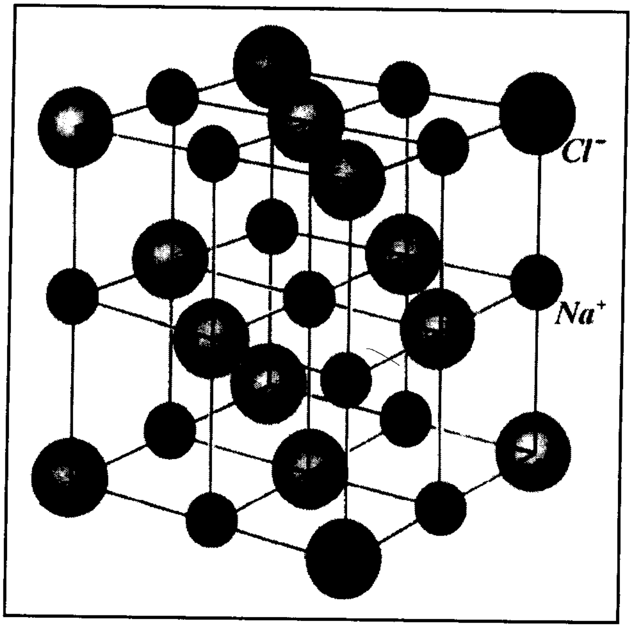
إن المادة إذا كانت في حالتها الغازية فإن جزيئاتها *molecules* تكون على وجه التقريب بعيدة عن بعضها البعض، ويمكن لهذه الجزيئات أن تتجول في الوعاء الذي يحتويها متصادمة فيما بينها *collisions* دون أن تلتصق مع بعضها البعض، إلا أن تصادم هذه الجزيئات مع جدار الوعاء *container* يؤدي إلى وقوعها تحت تأثير الضغط الذي ينعكس بشكل مباشر على طاقتها الحركية، وفي حالة الغازات الخفيفة جداً فإن طاقة الجزيئات الحركية *kinetic energy* تكون عالية جداً، وهذا ما يفسر إشغالها التام لكل حجم الوعاء الذي تتواجد فيه.

أما في السوائل، فإنّ جزيئات المادة تبقى في حركة مستمرة، إلا أن طاقتها الحركية ليست كافية للتغلب على قوى جذب الجزيئات الأخرى المجاورة لها *intermolecular attraction forces*، ومن الممكن أن يتغلب أي جزيء من السائل على هذه القوى عندما تزداد طاقته الحركية بالقدر الكافي، كما يحدث في حالة تبخر الجزيئات من سطح المادة *surface evaporization*.

إنّ الخاصية التي تجمع بين الغازات والسوائل، هي سهولة الانسياب *fluidity*، وهذا ما يدعونا إلى أن نطلق عليهما معاً مصطلح الموائع *fluids*.

أما في الحالة الثالثة وهي حالة الجوامد، فإن الجزيئات تكون مثبتةً في مكانها نتيجة للقوى الكبيرة المؤثرة فيما بينها، وهذا ما يجعل عملية انزلاق الجزيئات فوق بعضها البعض عملاً في غاية الصعوبة، وبصفة العموم فإن الخط الفاصل بين كل من السوائل والجوامد ليس حاداً، ولعل مادة الزجاج تعتبر مثالاً جيداً على بيان ذلك.

أما فيما يتعلق بالجوامد البلورية والزجاجية، فإن الجوامد البلورية تتكون من مجموعة من البلورات المفردة، والبلورة هي عبارة عن مجموعة من الذرات أو الجزيئات يحتل كل جزيء فيها موضعاً محدداً بدقة عالية في نمط محدد بالنسبة لجيرانه، ويتكرر هذا النمط مرات ومرات في كل مكان في البلورة، ولنأخذ مثالاً على ذلك بلورة كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) *sodium chloride crystal*، انظر الشكل (1-13).

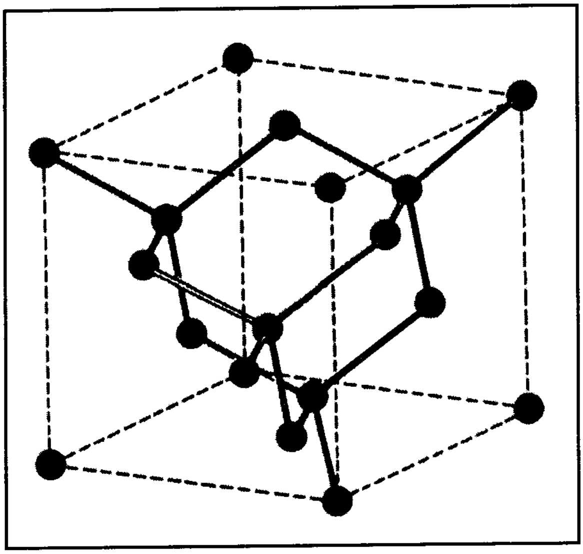


الشكل (1-13)

التركيب البلوري لكوريد الصوديوم

ويظهر عليه مواقع كل من ذرات الصوديوم وذرات الكلور

كما أن حجر الماس (بلورة الكربون) *diamond* هو من الأمثلة الأخرى الشائعة عن البنية البلورية للمادة، انظر الشكل (2-13).



الشكل (13-2)

التركيب البلوري لحجر الماس

أما في حالة السوائل عالية اللزوجة، والتي تأخذ شكلاً صلداً لهذا السبب فإن جزيئاتها لا تكون أكثر ترتيباً منها في السائل المنصهر، وتكون الجزيئات مثبتة في مكانها ولكنها ليست مرئية في نمط معين، وهو ما نطلق عليه الجوامد الزجاجية (اللدائن بصفة عامة هي زجاج غير بلوري) ومن أمثلتها الشائعة البوليثين *ploethyline*، الزجاج *glass*، والشمع *paraphine*.

13-2الكثافة *Density*:

الكثافة أو الكثافة الكتلية هي من أهم الخصائص الميكانيكية للمادة في حالاتها الثلاث، وفي التعريف فإن الكثافة هي كتلة وحدة الحجوم. يستعمل الحرف اليوناني (ρ) للتعبير عنها، والشكل الرياضي للتعبير عن الكثافة هو:

$$\text{(الكثافة)}\ density(\rho) = \frac{mass\ \text{(الكتلة)}}{Volume\ \text{(الحجم)}}$$

$$\rho = \frac{m(k.g)}{V(m^3)} \qquad (13\text{-}1)$$

وتعتمد كثافة المادة على مجموع كتل الجزيئات المكونة لها، وكذلك على المسافة الفاصلة فيما بينها، حيث تكون المسافة صغيرة جداً في الكثافات العالية للمادة، كما أنها تكون كبيرة جداً في الكثافات المنخفضة للمادة.

وكمثال على ذلك دعنا نقارن بين كثافتي النحاس والألمنيوم:

العنصر	الكثافة	العدد الكتلي
النحاس	$\rho = 8.92 g/cm^3$	63
الألمنيوم	$\rho = 2.7 g/cm^3$	27

نستطيع ملاحظة مدى تأثير الزيادة في العدد الكتلي على كثافة العنصر، والعدد الكتلي هو عبارة عن مجموع عدد البروتونات والنيوترونات في نواة العنصر. كما يمكننا الاستنتاج بأن المسافة بين ذرات النحاس هي أقل مما عليه فيما بين ذرات الألمنيوم، وهذا ما يفسر السبب في اختلاف الخصائص الفيزيائية للعناصر كالمرونة مثلاً.

وقياساً على ما تقدم ذكره من تأثير المسافات الفاصلة بين جزيئات المادة أو ذراتها على خاصية الكثافة، فإن كثافة السوائل تكون أقل من كثافة المعادن وكثافة الغازات أقل من كثافة السوائل.

ولدرجة الحرارة تأثير واضح على الخصائص الفيزيائية للمادة، وبهدف بيان تأثير درجة الحرارة على كثافة المادة، نشير هنا إلى أن الارتفاع في درجات الحرارة، عموماً وفي حالات المادة المختلفة يؤدي إلى زيادة متوسط الطاقة الحركية للجزيئات بسبب ازدياد متوسط مربع سرعتها، وهي ذات طبيعة انتقالية في الغازات، انتقالية واهتزازية في السوائل، بينما تكون اهتزازية في المواد الصلبة، وهذا ما يفسر ازدياد الحجم بازدياد درجة الحرارة مع ملاحظة بقاء الكتلة ثابتة، كما يؤدي إلى زيادة المقام في المعادلة *(1-13)* وبالتالي إلى نقصان مقدار الكثافة، إلا أن الماء يشذ عن هذه القاعدة حيث يقل حجم الماء بين درجتي الحرارة *(0-4 °C)* مما يؤدي إلى ازدياد كثافة الماء. كما أن للضغط تأثيراً مباشراً على كثافة المادة وهذا ما ينجلي بوضوح في حالة وجود غاز في مكبس *gas cylinder*، حيث يمكن التحكم بحجمه على حسب كثافته. والجدول (1-13) يوضح مقدار الكثافة لمجموعة من المواد في حالات المادة الثلاث مقاسة بوحدات $(gram/cm^3)$.

substance	الكثافة (Density) $(gram/cm^3)$	المادة
air	1.293×10^{-3}	الهواء
carbon dia oxide	1.997×10^{-3}	ثاني أكسيد الكربون
hydrogen	1.090×10^{-3}	الهيدروجين
helium	1.178×10^{-3}	الهيليوم
nitrogen	1.251×10^{-3}	النايتروجين
oxygen	1.429×10^{-3}	الأوكسجين

الجدول (1-13)

substance	الكثافة (Density) ($gram / cm^3$)	المادة
benzene	0.90	البنزين 0 C°
ethyl alcohol	0.79	الكحول الإثيلي 20 C°
Gasoline	0.69	الكازولين 0 C°
water at 4 c°	1.000	الماء 4 C°
water at 28 c°	0.998	الماء 20 C°
mercury at 20 c°	13.6	الزئبق 20 C°
bload at 37 c°	104	الدم 37 C°
aluminum	2.7	الألمنيوم
copper	8.92	النحاس
glass	2.4-2.8	الزجاج
gold	0.917	الذهب
ice	0	الجليد
iron	7.9	الحديد
leed	11.34	الرصاص
silver	10.5	الفضة
tungsten	19.3	التنكستن
uranium	18.7	اليورانيوم
platinum	21.5	البلاتين

تابع الجدول (1-13)

إن كثافة الغازات في هذا الجدول قد تم قياسها تحت ظروف قياسية من ضغط ودرجة حرارة (76سم زئبق ودرجة صفر سيلزيوس).

13-3 الكثافة النسبية (الوزن النوعي) :Relative Density or Specific Weight

الكثافة النسبية هي عبارة عن النسبة بين كثافة المادة في الهواء وكثافة الماء، وعادةً يتم قياس هذه النسب عند درجة الحرارة $(T = 3.8\,°C)$ وهي درجة الحرارة التي تكون عندها كثافة الماء $(1000\ kg / m^3)$، وهنا لابد من التأكيد على أن مفهوم النسبة يؤدي إلى سهولة الاستنتاج بأن هذه الكمية الفيزيائية بلا وحدة قياس، أي هي مجرد رقم عددي. إن الماء يعتبر مادة المعايرة لكلٍ من الجوامد والسوائل، لذا لا بد من التأكيد على ذلك باستمرار، وسنشير إلى الكثافة النسبية بالرمز (ρ_r).

مثال (13-1) *Example*

أوجد كلاً من الكثافة والكثافة النسبية للغازولين *gazloine* إذا علمت أن حجم كتلة من الغازولين مقدارها $(51\ g)$ يساوي $(75\ cm^3)$.

الحل *Solution*:

حسب تعريف الكثافة:

$$\rho = \frac{m(gram)}{V(cm^3)}$$

$$= \frac{51\times 10^{-3}\,kg}{75\times 10^{-6}\,m^3} = 680\,kg.m^{-3}$$

$$\text{(الكثافة النسبية)}\ relative\,density = \frac{density\ of\ gasoline\ \text{(كثافة الكازولين)}}{density\ of\ water\ \text{(كثافة الماء)}}$$

$$= \frac{680kg.m^{-3}}{1000kg.m^{-3}} = 0.68$$

Example (13-2) مثال

كمية من الزئبق كتلتها $(300\ g)$.

أوجد الحجم الذي تشغله هذه الكمية، إذا علمت أن الكثافة النسبية للزئبق تساوي (13.6).

الحل Solution:

$$\text{الكثافة النسبية} = \frac{\text{كثافة الزئبق}}{\text{كثافة الماء}}$$

$$13.6 = \frac{\rho}{1000\, kg.m^{-3}}$$

كثافة الزئبق إذن تساوي:

$$\rho = 13600\, kg.m^{-3}$$

$$\rho = \frac{m(kg)}{V(m^3)}$$

$$13600 = \frac{0.3(kg)}{V(m^3)}$$

$$\therefore V = \frac{0.3}{13600} = 2.21\times 10^{-5}\ m^{-3}$$

$$= 22.1 cm^{-3}$$

Example (13-3) مثال

إذا كانت كثافة عنصر البوتاسيوم *potassium* (ρ) تساوي $(0.86\, g.cm^{-3})$، ووزنه الجزيئي الغرامي يساوي $(39\ g)$.

أوجد حسابياً مقدار قطر أيون البوتاسيوم بفرض أن الأيون يكون على شكل كرة نصف قطرها (r).

الحل **Solution**:

إنَّ حجم المول الواحد يساوي (V_0)، ومن الممكن إيجاده حسابياً من المعادلة:

$$\rho = \frac{m}{V_0}$$

$$V_0 = \frac{m}{\rho} = \frac{39\,g}{0.86\,g.m^{-3}} = 45.4\,cm^{-3}$$

ولكننا نعلم أن المول الواحد يحتوي على عدد أفوكادرو من الجزيئات، وهكذا فإن حجم الجزيء الواحد من البوتاسيوم:

$$V = \frac{45.4\,cm^3}{6.02 \times 10^{23}} = 7.57 \times 10^{-23}\,cm^3$$

من المعلوم أنَّ حجم الكرة يساوي إلى:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

حيث إن (r) يساوي إلى نصف القطر، (V) حجم الجزيئة الواحدة، وهكذا:

$$7.57 \times 10^{-23}\,cm^3 = \frac{4}{3} \times \pi (r^3)$$

$$r = 2.1 \times 10^{-8}\,cm$$

وهكذا نجد أنَّ القطر *diameter* يساوي إلى:

$$D = 2r$$
$$= 2\times 2.1\times 10^{-8} = 4.2\times 10^{-8}\ cm$$

تمرين (13-1) ***exersice***:

أعد حل المثال (13-3) وذلك لحساب قطر أيون معدن الذهب، إذا علمت أن كثافة الذهب (ρ) تساوي $(19.3\ g.cm^{-3})$، ووزنه الجزيئي الغرامي يساوي $(197\ g)$. قارن بين قطر أيون الذهب وقطر أيون البوتاسيوم لتتبين تأثيرهما على كثافتي العنصرين.

مثال (13-4) *Example*

قطرة من الزئبق *mercury* قطرها $(1\ mm)$، إذا علمت أنَّ الوزن الجزيئي للكيلو غرام الواحد من الزئبق يساوي $(202\ k.g.\ k\,mol^{-1})$، بينما كثافته تساوي $(13600\ kg.m^{-3})$. أوجد عدد ذرات الزئبق في هذه القطرة.

الحل ***Solution***:

نحن نعلم أنَّ الكثافة تساوي:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$$

ومعلوم لدينا أن حجم القطرة يساوي إلى حجم الكرة، ويمكن حسابه على النحو الآتي:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

حيث إنَّ:

(r) هو نصف القطر ويساوي:

$$r = \frac{D}{2} = \frac{1mm}{2} = 0.5\,mm$$
$$= 5 \times 10^{-4}\ m$$
$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times (5 \times 10^{-4}\ m)$$
$$= 5.24 \times 10^{-10}\ m^3$$

أما الكتلة (m) لقطرة الزئبق فيمكن إيجادها على النحو الآتي:

$$M = \rho V = 13600\ (kg.m^{-3}) \times 5.24 \times 10^{-10}\ (m)$$
$$= 7.1 \times 10^{-6}\ kg$$

هذه هي كتلة القطرة، بينما كتلة الذرة الواحدة يمكن حسابها على النحو الآتي:

المول الواحد يحتوي على $(6.02 \times 10^{23}\ mol^{-1})$ عدد من الذرات، بينما يحتوي الكيلومول على $(6.02 \times 10^{26}\ mol^{-1})$، إذن:

$$\frac{M}{N_A} = \frac{\text{كتلة الكيلومول}}{\text{عدد الذرات في الكيلومول}}$$
$$= \frac{202\,(kg.kmol^{-1})}{6.02 \times 10^{26}\ (kmol^{-1})} = 3.36 \times 10^{25}\ kg$$

إذن يمكن الآن حساب عدد ذرات الزئبق على النحو الآتي:

$$\frac{\text{كتلة قطرة الزئبق}}{\text{كتلة الذرة الواحدة}} = \frac{7.1 \times 10^{-6}\ kg}{3.36 \times 10^{-25}\ kg} = 2.1 \times 10^{19}$$

13-4 الوزن Weight:

وزن الجسم *body weight* في أي نقطة في الفضاء هو عبارة عن محصلة قوى الجذب المسلطة عليه من باقي الأجسام الأخرى الموجودة في الكون. ومفهوم الجاذبية هو حقيقة عامة تفسّر على أساس أن جميع الأجسام الموجودة في الكون تجذب بعضها بعضاً، ويمكن إيجاد قوة الجذب هذه باستخدام قانون نيوتن للجذب العام والمعروف بصيغته الرياضية الآتية:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (13\text{-}2)$$

حيث إن:

(F): هي قوة الجذب *gravitational force*.

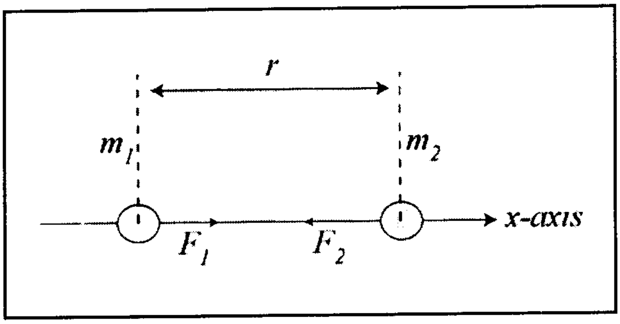
(m_1): هي كتلة الجسم الأول مقاسة بالكيلوغرام.

(m_2): هي كتلة الجسم الثاني مقاسة بالكيلوغرام.

(r): المسافة الفاصلة بين الجسمين مقاسة بالأمتار.

(G): ثابت الجذب العام ويساوي عددياً $(6.673 \times 10^{-11}\ Nm^2.kg^{-2})$.

ومن الواضح أن هذا القانون يمكّننا من تحديد قوة الجذب بين جسمين ولكنه لا يعطي تفسيراً لمعنى الجاذبية، ولا بد من التأكيد هنا بأن كلا الجسمين ذي الكتلتين (m_1, m_2) يؤثران على بعضهما البعض في ذات الوقت بقوتين تقعان على خط العمل نفسه، على سبيل المثال $(x-xis)$، متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه، بمحصلة تساوي الصفر، وهذا ما يفسر استقرار كل منهما في موضعه، انظر الشكل (13-3).



الشكل (3-13)

إن قوة التجاذب الناشئة بين الجسمين المقصودين بالدراسة حقيقة لا يمكن تجاهلها أو منعها حتى في حالة وجود أجسام أخرى، وضآلة المقدار (G) هي السبب في تجاهل قوى التجاذب بين الأجسام ذات الكتل الصغيرة، ولكنها على العكس من ذلك عندما تكون مقادير الكتل كبيرة، فعلى سبيل المثال قوة التجاذب بين الشمس والأرض، أو الأرض والقمر يمكن معرفتها من خلال معرفة كتلة كل منهما وكذلك المسافة الفاصلة بينهما.

والسؤال الآن هو: كيف يمكن التعبير عن وزن جسم ما على سطح الأرض باستخدام قانون الجذب العام لنيوتن؟

لبيان ذلك:

افرض أن قوة جذب الأرض المسلطة على هذا الجسم هي قوة وزنه ولتكن (W)، وكتلته هي (m)، أما كتلة الأرض فهي (M)، كما أن المسافة بين مركز الأرض ومركز الجسم هي ($R + h$)، حيث (R) هي نصف قطر الأرض، (h) هي ارتفاع الجسم على سطح الأرض، وهكذا نجد أن القوة (الوزن) تساوي:

$$F = W = G\frac{mM}{(R+h)^2} \tag{13-3}$$

إن المقدار (h) يمثل بعد أو ارتفاع الجسم عن سطح الأرض، وهو موجود في المقام مما يؤكد أن وزن الجسم يقل تدريجياً كلما ارتفعنا عن سطح الأرض، ومن الممكن أن يهمل تماماً إذا أصبح ارتفاعه كبيراً جداً عن سطح الأرض.

إن تسارع الجاذبية الأرضية في نقطة ما *gravitational acceleration*، هو قوة الجذب المؤثرة على وحدة الكتلة:

$$\text{تسارع الجاذبية الأرضية} = \frac{\text{قوة الجذب}}{\text{وحدة الكتلة}}$$

$$g = \frac{W(Newton)}{m(kg)} \tag{13-4}$$

حيث إن:

(g): هي تسارع الجاذبية الأرضية، وتقاس بوحدات $(kg\ ms^{-2})$

(W): قوة وزن الجسم، وتقاس بالنيوتن.

(m): كتلة الجسم، وتقاس بالكيلوغرام.

وفي حالة إهمال كتلة الجسم مقارنة بكتلة الكرة الأرضية يمكننا إعادة التعبير عن تسارع الجاذبية الأرضية بالمعادلة:

$$g = G\frac{M}{(R+h)^2} \tag{13-5}$$

ومن الواضح في المعادلة *(5-13)* أن شدة الجاذبية *(g)* تتناقص تدريجياً كلما زادت قيمة *(h)* المعبرة عن الارتفاع عن سطح الأرض، والجدول (2-13) يوضح ذلك الأمر عند مجموعة من الارتفاعات المقاسة ارتفاعاً عن سطح الأرض.

الارتفاع *h (m)*	تسارع الجاذبية *g (kg.m/ s2)*
0	*9.806*
1000	*9.803*
4000	*9.794*
8000	*9.782*
16000	*9.757*
32000	*9.708*
100000	*9.598*

الجدول (2-13)

يبين تغير تسارع الجاذبية الأرضية مع الارتفاع عن سطح الأرض

هكذا ومع اضطراد التقدم العلمي أمكن عملياً من خلال رحلات الفضاء التأكد من المناطق التي ينعدم فيها تسارع الجاذبية الأرضية *(g)*، وبالتالي ينعدم فيها الوزن، وليس الكتلة ولا بد من التأكيد هنا مجدداً على أهمية التفريق بين الوزن والكتلة، والمعادلة *(4-13)* توضح ذلك.

مثال (5-13) *Example*

كرتان كتلة كل منهما $(m_1 = m_2 = 100\ kg)$، تمَّ تعليقهما بحيث إن المسافة الفاصلة بين مركزي كتلتيهما يساوي *(1 m)*.

أوجد مقدار قوة جذب كل من الكرتين للأخرى، ثابت الجذب العام يساوي إلى $(G = 6.673 \times 10^{-11}\ N.m^2\ kg^{-2})$.

الحل **Solution**:

$$F = -\vec{F}_1 = \vec{F}_2 = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$\therefore F = 6.673 \times 10^{-11}\ (N\, m^2\ kg^{-2})\frac{100(kg)100(kg)}{(1m)^2}$$

$$= 6.673 \times 10^{-7}\ N$$

وهذا ما يؤكد مجدداً أن قوى الجذب بين الأجسام تكون في مثل هذه الحالات صغيرة جداً، لكن هذا لا ينفي وجودها.

ملاحظة: هذه الظاهرة الطبيعية هي منشأ اكتشاف وجود الجاذبية الأرضية التي دونها نيوتن سنة 1687م عندما لفت انتباهه سقوط ثمرة التفاح تلقائياً دون أن تمتد إليها يد في حديقة منزله.

مثال (13-6) *Example*

استخدم قانون الجذب العام للعالم نيوتن وذلك لتحديد كتلة الأرض، ثم أوجد معدل كثافة الأرض إذا علمت أن:

تسارع الجاذبية: $g = 9.8\ (m/s^2)$.

نصف قطر الأرض: $R = 6.37 \times 10^6\ (m)$

ثابت الجذب العام: $G = 6.673 \times 10^{-11}\ (N\, m^2\ kg^{-2})$

الحل ***Solution*:**

إن وزن جسم ما على سطح الأرض يساوي:

$$W = mg$$

$$W = G\frac{mM}{R^2}$$

حيث إن:

(m): كتلة الجسم مقاسة بالكيلوغرام.

(g): تسارع الجاذبية الأرضية.

(M): كتلة الأرض مقاسة بالكيلوغرام.

(R): نصف قطر الأرض مقاساً بالأمتار، وبملاحظة أنَّ $W = W$ نجد أنَّ:

$$mg = G\frac{mM}{R^2}$$

$$\therefore M = \frac{gR^2}{G}$$

$$M = \frac{9.8(m/s^2)(6.37\times 10^6\ m)^2}{(6.673\times 10^{-11}\ Nm^2.kg^{-2})}$$

$$= 5.97\times 10^{24}\ kg$$

أما كثافة الأرض فيمكن حسابها من المعادلة المعروفة الآتية، باعتبار أن الأرض كروية الشكل:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

حيث إن:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$$= \left(\frac{4}{3}\right)\pi (6.37 \times 10^6\ m)^3$$

$$= 1.083 \times 10^{-21}\ m^3$$

$$\therefore \rho = \frac{5.97 \times 10^{24}\ (kg)}{1.083 \times 10^{21}\ m^3}$$

$$= 5.514 \times 10^3\ (kg.m^{-3})$$

ومن المعلوم أن كثافة قشرة الأرض تساوي $(kg.m^{-3})\ 2.7 \times 10^3$ وهذا يؤكد أن باطن الأرض يحتوي على مواد كثافتها أعلى من معدل الكثافة $5.514 \times 10^3\ (kg.m^{-3})$.

ومن المناسب هنا وبعد أن بينّا علاقة الوزن بالكتلة، وكذلك بعد أن عرفنا الوزن النوعي، أن ندرج بعض المعادلات الأخرى المساوية للمعادلة المعروفة عن الكثافة النسبية.

$$\rho_r = \frac{density\ of\ matter}{density\ of\ water} = \frac{\text{كثافة المادة}}{\text{كثافة الماء}}$$

$$= \frac{mass\ of\ matter}{equivelant\ mass\ of\ matter} = \frac{\text{كثافة المادة}}{\text{كتلة حجم من الماء مساوٍ لحجم المادة}}$$

$$= \frac{weight\ of\ matter}{equivelant\ mass\ of\ water} = \frac{\text{وزن المادة}}{\text{وزن حجم من الماء مساوٍ لحجم المادة}}$$

ويمكن استنتاج المعادلة التالية فيما إذا اعتبرنا أن الكثافة النسبية للماء تساوي $(\rho_r = 1)$، فإن كثافة أي من المواد تساوي:

كثافة المادة = الكثافة النسبية للمادة × 1000

$$density\ of\ matter = relative\ density\ of\ matter \times 1000$$

5-13 المرونة *Elasticity*:

عندما تؤثر قوة مفردة *single force* أو مجموعة من القوى على جسم ثابت فإن ذلك يؤدي على وجه العموم إلى تغيير في أبعاد الجسم أو في شكله، ما دام هذا التأثير مستمراً، فإذا زال التأثير عاد الجسم واسترجع شكله الابتدائي قبل تأثير القوى عليه، ويقال في هذه الحالة: إن الجسم تام المرونة، أما إذا لم يتمكن من الرجوع إلى شكله الابتدائي فيقال عنه عديم المرونة، وبناء على ذلك يمكننا أن نعرف المرونة بشكل أكثر إيجازاً على النحو الآتي:

«هي الخاصية التي يستطيع الجسم بواسطتها استعادة شكله أو حجمه الأصلي بعدما اعتراه من تشويه بفعل القوة الخارجية، وذلك بعد زوال السبب الذي أدى إلى تشويه الجسم».

ويُعبَّر عن ذلك رياضياً بالمعادلة:

$$F = con.\ \Delta L \qquad (13\text{-}6)$$

حيث إن:

(F): هي القوة أو محصلة القوى المؤثرة، ويطلق عليها اسم قوة الإرجاع.

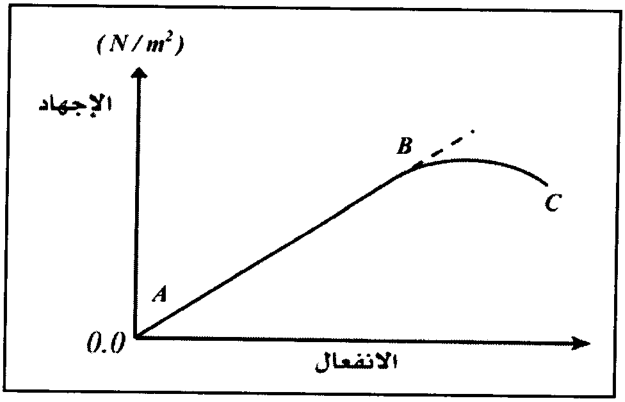
$L_2 - L_1 = \Delta L$: الفرق الحاصل في الطول.

وهذا ما نعبِّر عنه بقانون هوك *Hook's law*.

1-5-13 قانون هوك *Hook's Law*:

إنَّ المادة التي تعرضت لتأثير قوة التشويه ولم تفقد مرونتها بعد، تبقى النسبة بين الإجهاد *stress*، والانفعال *strain* الذي تتعرض له، تساوي مقداراً ثابتاً

وتسمى هذه النسبة معامل المرونة *modulus of elasticity* لمادة الجسم، ونستطيع القول بإمكانية تطبيق قانون هوك، انظر الشكل (4-13).



الشكل (4-13)

يبقى قانون هوك صحيحاً بين النقطتين (A) و(B)، أما إذا تجاوزنا ذلك فإن الجسم يصل إلى مرحلة فقدان المرونة ولا يمكن تطبيق قانون هوك عليه عملياً. والآن سوف نوضح ما هو المقصود بكل من الإجهاد والانفعال كل على انفراد.

13-5-2 الإجهاد *Stress*:

يعرَّف الإجهاد بأنه القوة *(F) force* المؤثرة على وحدة المساحة *(A) unit area*، ويعبَّر عنه رياضياً على الشكل التالي:

$$\text{الإجهاد} = \frac{\text{القوة}}{\text{وحدة المساحة}}$$

$$stress = \frac{force(Newton)}{unit\,area(m^2)} = \frac{F(N)}{A(m^2)} \qquad (13\text{-}7)$$

وواضح من هذه الصيغة الرياضية بأن وحدة قياس الإجهاد هي ($N.m^{-2}$) وهي تساوي واحد باسكال *Pascal* وكما هو معروف فإن الباسكال هو الوحدة الدولية التي يقاس بها الضغط. ويمكن أن يكون الإجهاد طولياً، وهي الحالة التي ينتج عنها زيادة في الطول *longitudinal stress*، كما يمكن أن يكون الإجهاد حجمياً *volume stress* وهي الحالة التي ينتج عنها زيادة في الحجم، كما يمكن أن يكون إجهاداً قصياً *body stress* وهي الحالة التي ينتج عنها تغيراً في شكل الجسم دون حجمه.

13-5-3 الانفعال *Strain*:

يعرَّف الانفعال *strain* بأنه التشوه الحقيقي في الجسم الناتج عن تأثير قوة خارجية تحدث تشوهاً في شكله الهندسي، ويمكن أن يكون انفعالاً طولياً *longitudinal strain*، وفي هذه الحالة يَنتج تشوهاً في الطول ويعبَّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\text{الانفعال الطولي} = \frac{\text{التغير في الطول}}{\text{الطول الابتدائي}}$$

$$long.strain = \frac{change\,in\,length}{original\,length} = \frac{\Delta L\,(m)}{L_1\,(m)} \qquad (13\text{-}8)$$

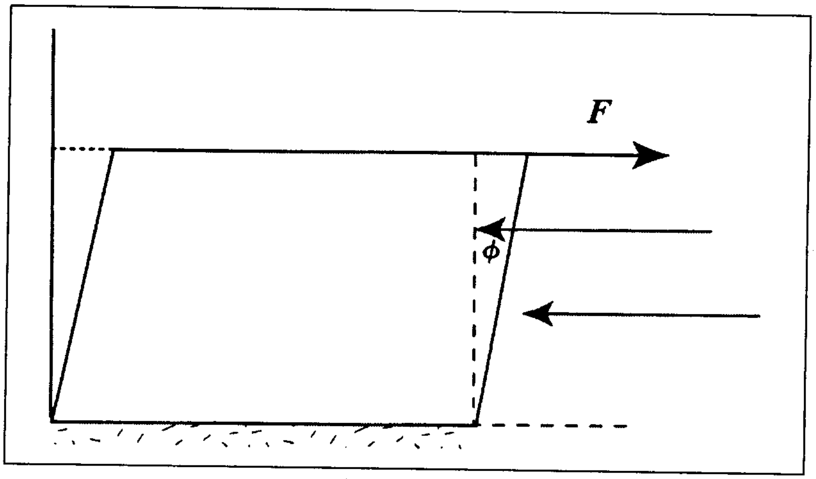
ومن الواضح من العلاقة الرياضية *(13-8)* أنه ليس له وحدة قياس *unitless*، كما يمكن أن يكون الانفعال حجمياً *volume strain*، وفي هذه الحالة يَنتج تشوهاً في الحجم ويعبَّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\text{الانفعال الحجمي} = \frac{\text{التغير في الحجم}}{\text{الحجم الابتدائي}}$$

$$Volume.strain = \frac{change\,in\,Volume}{original\,Volume} = \frac{\Delta V\,(m)}{V_1\,(m)} \qquad (13\text{-}9)$$

ومن الواضح من العلاقة الرياضية *(13-9)* أنه ليس له وحدة قياس *unitless*، كما يمكن أن يكون الانفعال قصياً *body strain*، وفي هذه الحالة يكون التشوه في الشكل دون الحجم، ويقاس عادة هذا النوع من الانفعال بالزاوية (ϕ)، انظر الشكل (5-13)، وبما أن الزاوية (ϕ) في هذه الحالة تكون صغيرة جداً فإن:

$$\tan\phi = \phi \qquad (13\text{-}10)$$



الشكل (5-13)

يبين التشوه الحاصل في شكل الجسم

وتبعاً لنوع كل من الإجهاد والانفعال (طولياً، حجمياً، قصياً) ينتج لدينا معامل مرونة مع الحالة المعنية، ففي الحالة الطولية لدينا معامل يونج (Y) *modulus of elasticity or Young modulus*، والذي يعبّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\text{معامل يونج} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال الطولي}}$$

$$\mathbf{Y} = \frac{(F/A)}{(\Delta L/L)} \qquad (13\text{-}11)$$

وفي الحالة الحجمية يرمز له بالرمز (B) ويعبر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\text{معامل المرونة الحجمي} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال الحجمي}}$$

$$\mathbf{B} = \frac{(F/A)}{(\Delta V/V)} \qquad (13\text{-}12)$$

أما في الحالة القصية فيعبر عنه بالرمز (N) ورياضياً بالعلاقة:

$$\text{معامل المرونة القصي} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{زاوية الانفعال}}$$

$$\mathbf{N} = \frac{(F/A)}{\phi} \qquad (13\text{-}13)$$

مثال (13–7) *Example*

قضيب معدني مرن طوله $(4\ m)$ ومساحة مقطعه $(1.5\ cm^2)$ مثبت من طرفه العلوي يستطيل مسافة مقدارها $(7 \times 10^{-2}\ cm)$ بفعل تأثير ثقل كتلته $(330\ kg)$ يتدلى من طرف القضيب الحر.

أوجد حسابياً مقدار كل من الانفعال والإجهاد ، ثم احسب معامل يونج لهذا المعدن.

الحل **:*Solution***

$$Y = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

الإجهاد:

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

$$= \frac{(330\,kg)(9.8\,m.s^{-2})}{(1.5\times 10^{-4}\,m^2)} = 2.16\times 10^{7}\ Pa$$

الانفعال:

$$strain = \frac{\Delta L}{L}$$

$$= \frac{(7\times 10^{-4}\,m)}{(4\,m)}$$

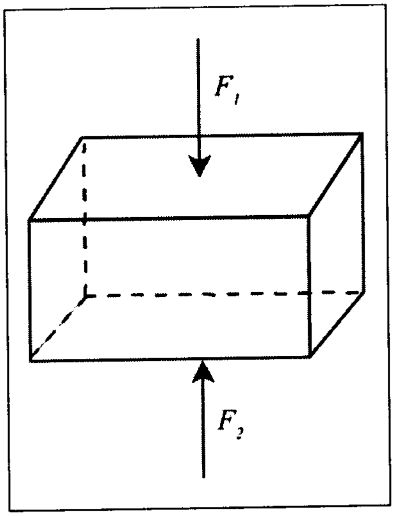
$$= 1.75\times 10^{-4}$$

$$Y = \frac{2.16\times 10^{7}\ Pa}{1.75\times 10^{-4}} = 1.23\times 10^{11}\ Pa$$

مثال (13-8) *Example*

قوتـان متوازيتـان ومتضـادتان مقـدار كـل منهمـا $(5\times 10^{3}\,N)$ تـؤثران بشـكل متناسب على وجهي مكعب من الصلب طول ضلعه $(30\,cm)$، انظـر الشـكل (13-6).

أوجـد مقـدار زاويـة القـص (ϕ) النسـبية، إذا كـان مقـدار معامـل يـونج القصي (**N**) يساوي $(8.3\ 10^{10}\ Pa)$.



الشكل (13-6)، المثال (13-8)

الحل *Solution*:

زاويـة القـص النسـبية هنـا هـي الـتي تحـدثها القـوة الأولى بالنسـبة للقـوة الثانية ، ويمكن إيجادها من العلاقة الرياضية:

$$\mathbf{N} = \frac{F(N)/A(m^2)}{\phi}$$

$$\therefore \phi = \frac{(5\times 10^3\ N)/(90\times 10^{-4}\ m^2)}{(8.3\times 10^{10}\ Pa)}$$

$$= 6.69\times 10^{-6 0}$$

وهي صغيرة جداً ، لاحظ أن المساحة $(A = 90 \times 10^{-4}\ m^2)$ ، وهي عبارة عن مساحة وجه المكعب والتي تساوي مساحة المربع المذكورة.

مثال (13-9) *Example*

إذا علمت أنَّ معامل يونج للنحاس $(\mathbf{Y} = 1.1 \times 10^{11}\ Pa)$.

أوجد حسابياً مقدار استطالة سلك من النحاس مثبت من طرفه العلوي، طوله $(4\ m)$، ونصف قطره $(2\ mm)$ التي تنتج عن تأثر كتلة مقدارها $(5\ kg)$ معلقة في طرفه الحر.

الحل **Solution**:

$$\mathbf{Y} = 1.1\times 10^{11}\ Pa = \frac{(5\,kg)(9.8\,m.s^{-2})/\pi(2\times 10^{-3}\ m)^2}{\Delta L/(4\,m)}$$

$$\Delta L = \frac{1225\times 10^{4}\times 4}{1.1\times 10^{11}} = 4.45\times 10^{-3}\ m$$

Example (13-10) مثال

أثرت قوة مقدارها $(4\times 10^{4}\ N)$ على سلك مثبت من طرفه العلوي، مصنوع من مادة معدنية، قطره $(4\ mm)$ وطوله الابتدائي $(4\ m)$ فأحدثت فيه استطالة مقدارها $(5\times 10^{-3}\ m)$.

أوجد حسابياً كلاً من: الإجهاد، والانفعال، ومعامل يونج.

الحل **Solution**:

$$\text{الإجهاد} = stress = \frac{F}{A} = \frac{4\times 10^{4}\ N}{(2\times 10^{-3})^2\pi}$$

$$\text{الانفعال} = strain = \frac{\Delta L}{L}$$

$$= \frac{5\times 10^{3}\ m}{4\,m} = 1.25\times 10^{-3}$$

$$\mathbf{Y} = \frac{stress}{strain} = \frac{3.2\times 10^{9}\ Pa}{1.25\times 10^{-3}}$$
$$= 2.5\times 10^{12}\ Pa$$

Example (13-11) مثال

سلك مصنوع من النحاس نصف قطره $(2.5 \times 10^{-3}\ m)$، استطال بمقدار $(30\ \%)$ من طوله الأصلي بفعل قوة خارجية. أوجد حسابياً مقدار القوة التي أحدثت هذه الاستطالة، معامل يونج للنحاس يساوي $(9 \times 10^{10}\ P_{\alpha})$.

الحل Solution:

$$\Delta L = 0.3\,L, A = \pi\, r^2 = 1.96\times 10^{-5}\ m^2$$
$$\mathbf{Y} = (9\times 10^{10}\ Pa) = \frac{F(N)/A(m^2)}{\Delta L/L}$$
$$= \frac{F(N)}{A(m^2)}\frac{L}{\Delta L}$$
$$= \frac{F(N)}{1.96\times 10^{-5}\ m^2}\frac{L}{0.3\,L}$$
$$\therefore\ F(N) = 9\times 10^{10}\,(Pa)1.96\times 10^{-5}\,(m^2)0.3$$
$$= 5.3\times 10^{5}\ N$$

Example (13-12) مثال

أثَّـر ضـغط مقـداره $(1.4 \times 10^{6}\ Pa)$ علـى حجـم مـن الزئبـق مقـداره $(1600 \times 10^{-6}\ m^3)$.

أوجد حسابياً مقدار النقص في حجم الزئبق إذا كان معامل يونج له يساوي $(2.8 \times 10^{10}\ Pa)$.

الحل **Solution**:

$$\mathbf{B} = \frac{F(N)/A(cm^2)}{\Delta V(m^3)/V(m^3)}$$

$$\mathbf{B} = \frac{F}{A}\,\frac{V}{\Delta V}$$

$$\Delta V = \frac{FV}{\mathbf{B}A} = \frac{VP}{\mathbf{B}}$$

ذلك أن:

$$presser \text{ الضغط } = \frac{F}{A} = P$$

$$\therefore \Delta V = \frac{(1600 \times 10^{-6}\ m^3)(1.4 \times 10^{6}\ Pa)}{(2.8 \times 10^{10}\ Pa)}$$

$$= 8 \times 10^{-6}\ m^3 = 8\,cm^3$$

بعد أن استعرضنا أهم الخصائص التي تتصف بها الحالة الصلبة للمادة سوف نبدأ الآن بدراسة الخصائص للحالة التي تجمع بين كل من السوائل والغازات وهي ما نطلق عليه الموائع *fluids*، وسف نبدأ بدراسة الخصائص الميكانيكية للموائع الساكنة، ثم نفرد فقرات خاصة بالخصائص الميكانيكية للموائع المتحركة.

13-6 الخصائص الميكانيكية للموائع الساكنة

:Mechanical properties of static fluids

سيما وأن هناك فروقاً مميزة في السلوك بين السوائل والغازات، على الرغم من تصنيفهما معاً ضمن قائمة الموائع، إلا أننا سنفرد لكل منهما معالجة منفصلة لبعض الخصائص الميكانيكية كلما اقتضى الأمر.

13-6-1 ضغط المائع :Fluid Pressure

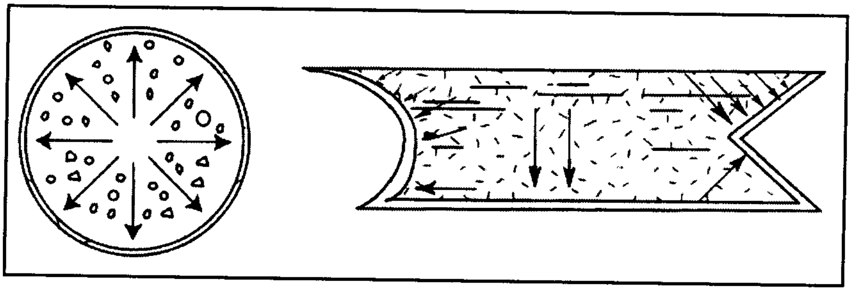
إنَّ ضغط المائع سواء كان سائلاً أم غازياً، هو عبارة عن القوة العمودية *perpendicular force* التي يؤثر بها المائع على وحدة المساحة *unit area*، ويعبَّر عنه رياضياً على النحو الآتي:

$$pressure = \frac{perpendicular\ force}{unit\ area}$$

$$P = \frac{F}{A} \qquad \frac{\text{القوة العمودية}}{\text{وحدة المساحة}} = \text{الضغط}$$

ومن الجدير بالذكر في هذا المقام أن ضغط المائع لا يمكن تحديده ما لم نحدد اتجاه السطح الذي يؤثر عليه المائع، وعلى هذا الأساس يعد الضغط كمية عددية، وليس كمية متجهة، انظر الشكل (7-13).

إن أياً من السوائل يتكون من مجموعة هائلة من الجزيئات تتجاذب فيما بينها بصيغة متبادلة، كما أن جزيئات السائل يمكنها أن تنزلق فوق بعضها البعض، ولهذا يأخذ السائل شكل الوعاء الذي يحتويه. كما أن السائل بالكلية ينجذب نحو مركز الأرض وفقاً لمفهوم قانون نيوتن العام للتجاذب.



الشكل (7-13)

يبين أن ضغط المائع ينتج عنه قوة عمودية على السطح الملامس، ولهذا فإن الضغط كمية عددية وليس كمية متجهة

ومن هنا نستطيع القول بأن طبقات السائل العليا تسلط قوة على الطبقات التي تليها باتجاه الأسفل وصولاً إلى قعر الإناء، كما أن سهولة انزلاق جزيئاته فوق بعضها البعض يؤدي إلى تسليط قوة على جدران الوعاء، وقوة أخرى نحو الأعلى.

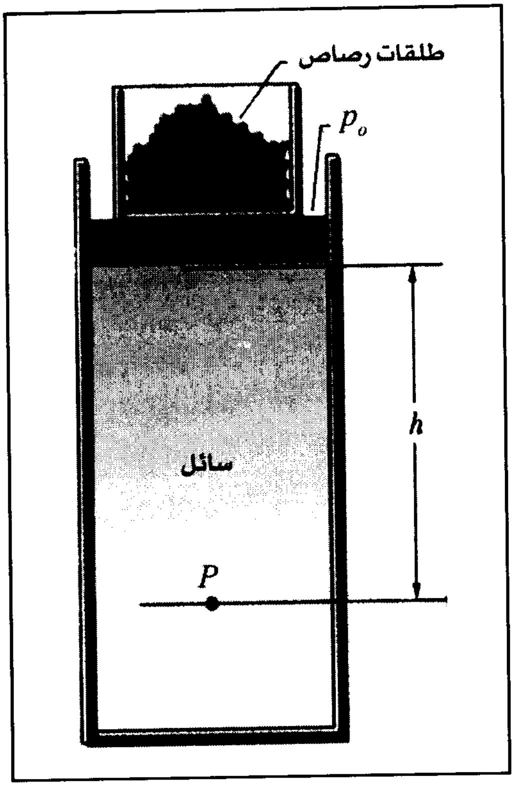
ولغرض حساب مقدار الضغط في أي نقطة داخل السائل، بدايةً، انظر الشكل (8-13).

إنَّ القوة المؤثرة على المساحة (A): هي عبارة عن وزن عمود السائل ذي الارتفاع (h)، وعلى اعتبار أن السائل غير قابل للانضغاط فإن كثافته (ρ) تبقى ثابتة وهكذا نجد:

$$\vec{F} = (h\,A)\,D = \rho\, g\, h\, A \qquad (13\text{-}14)$$

حيث إن: (D) هي الكثافة الوزنية للمائع وتساوي (ρg).

وبقسمة طرفي المعادلة $(13\text{-}14)$ على المساحة (A) نجد أن:



الشكل (13-8)

يبين الضغط الواقع على أي نقطة داخل السائل وذلك بافتراض أن السائل غير قابل للانضغاط

$$P_h = \frac{\vec{F}}{A} = \rho g h$$

$$P_h = \rho g h \tag{13-15}$$

ومن المناسب إضافة الضغط الجوي إلى المعادل وذلك لحساب مقدار الضغط الذي يتعرض له الإناء المفتوح، وعليه يكون الضغط الكلي على النحو الآتي:

$$P = P_o + P_h$$

حيث إن: (P_o) هو الضغط الجوي، ويمكن إعادة صياغة المعادلة على النحو الآتي:

$$P = P_o + \rho g h \qquad (13\text{-}16)$$

والضغط يقاس بوحدة الباسكال، واختصاراً (Pa) وهو عبارة عن وحدة قياس القوة الدولية مقسومة على وحدة المساحة الدولية.

مثال (13-13) *Example*

عمود من الماء ارتفاعه $(300\ cm)$.

أوجد حسابياً مقدار الضغط الذي يحدثه هذا العمود على قعر الإناء، كثافة الماء تساوي $(1000\ ko/m^3)$.

الحل *Solution*:

$$P_h = \rho g h$$

$$h = 300\ cm = 3\ m$$

$$g = 9.8\ m/s^2$$

$$P_h = (1000\ kg.m^{-3})\ (9.8\ m.s^{-2}\ (3\ m)$$

$$= 29400\ Pa$$

$$P = P_h + P_0 = 29400\ (Pa) + 1.013 \times 10^5\ Pa$$

$$= 130.7 \times 10^3\ Pa$$

13-6-2 ضغط الغاز *Gas Pressure*:

كنا قد تبينا بأن ضغط السائل ينشأ عن تأثير وزنه على سطح محدد، إلا أن المسألة هنا مختلفة تماماً، فضغط الغاز سببه التصادم المتكرر *frequent* *collisions* لجزيئات الغاز مع سطح الوعاء الذي يحتويه، إذ تنعكس كل جزيئة بعد التصادم وقد عانت من تغير في عزمها الذي يمكن التعبير عنه من خلال قانون نيوتن الثاني في الحركة على النحو الآتي:

$$\frac{d}{dt}(P) = \vec{F} \qquad (13\text{-}17)$$

حيث يمثل المقدار $[d(P)/dt]$ معدل التغير الزمني للعزم، ومن الواضح أن هذا التغير في العزم تنشأ عنه قوة مقدارها (F). وإذا ما تمكنا من التعرف على القوة الكلية الناشئة عن مجموع الجزيئات المكونة للغاز فإننا نكون قد توصلنا إلى تحديد لمفهوم الضغط الذي يسببه الغاز. إن الدراسة التحليلية لهذه المسألة أوضحت أن مقدار الضغط تتعين بالصيغة الرياضية الآتية:

$$P = \frac{1}{3} m n \bar{v}^2 \qquad (13\text{-}18)$$

حيث إن:

(P): ضغط الغاز.

(n): عدد جزيئات الغاز لوحدة الحجم = $\frac{N}{V}$ ، حيث (N) العدد الكلي لجزيئات الغاز في الحجم (V)، و(m): كتلة الجزيء الواحد، و $(\bar{v}^2)$: مربع السرعة المتوسطة لجزيئات الغاز.

وإذا ما أمعنا النظر في الطرف الأيمن للمعادلة $(13\text{-}18)$ نجد أن المقدار $(1/2 m n \bar{v}^2)$ هو عبارة عن متوسط الطاقة الحركية لجزيئات الغاز وهو يعتمد على درجة الحرارة (T) وفقاً للصيغة الرياضية الآتية:

$$\frac{1}{2}mn\bar{v}^2 = \frac{2}{3}KT \qquad (13\text{-}19)$$

حيث (K) هو ثابت بولتزمان *Boltzman's constant*، ويساوي إلى $(1.381 \times 10^{-23}\ J/K)$.

ومن المعادلتين *(13-18)* و*(13-19)* نجد أن:

$$P = \frac{1}{3}mn\bar{v}^2 = \left(\frac{3}{2}n\right)\left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2\right)$$

$$P = \left(\frac{2}{3}n\right)\left(\frac{3}{2}KT\right)$$

$$P = nKT$$

وإذا ما عوضنا عن $(n = N/V)$ نجد أن:

$$P = \frac{N}{V}KT$$

$$PV = NKT \qquad (13\text{-}20)$$

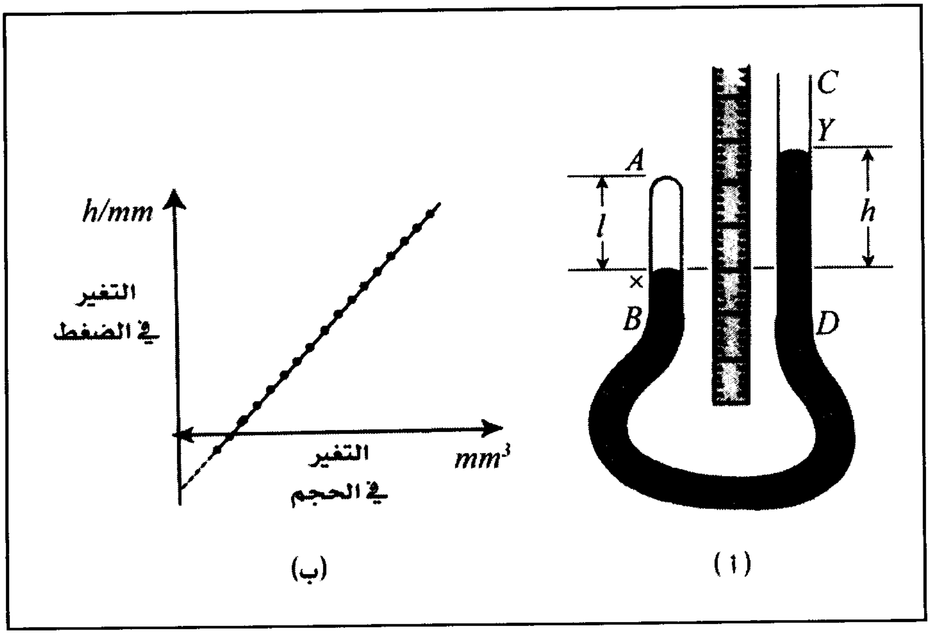
والمعادلة *(13-20)* هي ما يسمى بالقانون العام للغازات، وهي على درجة عالية من الأهمية في دراسة سلوك الغازات، وإذا ما اعتبرنا درجة حرارة الغاز (T) ثابتة فإن المعادلة *(13-20)* تأخذ الصيغة الرياضية:

$$PV = constatn \qquad (13\text{-}21)$$

$$constatn = NKT$$

والمعادلة *(13-20)* هي الشهيرة باسم مكتشفها روبرت بويل سنة 1662م، وهي تحمل اسمه وتُعرف بقانون بويل *Boyle's law*. ولعل الإجابة عن سبب كبر حجم البالون كلما ارتفع عالياً تُفسَّر على هذا الأساس، ذلك

أن الضغط يتناسب تناسباً عكسياً مع الحجم، ولتوضيح ذلك تبين الشكل (9-13أ ، ب).



الشكل (9-13 أ، ب)

يبين كيف يتناسب ضغط الغاز تناسباً عكسياً مع حجمه

الغاز هنا هو عبارة عن الهواء المحصور في المنطقة *(AX)*

وإذا ما اقترب الغاز من درجة الإسالة فإن سلوكه ينحرف ولا ينطبق عليه قانون بويل، أما الغاز الذي يمكن أن ينطبق عليه قانون بويل تحت جميع الظروف من ضغط ودرجة حرارة فيسمى الغاز المثالي *ideal gas*. وهذا نادر الوجود لصعوبة الشروط المطلوبة.

والآن لو ضربنا ثم قسمنا الطرف الأيمن للمعادلة *(13-20)* بعدد أفوكادرو *Avogadro's number* والذي يساوي:

$$N_A = 6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1}$$

نجد أن:

$$PV = \frac{N}{N_A} N_A K T$$

حيث إن:

(N / N_A): تمثل عدد المولات (n).

$(N_A K T)$: يمثل الثابت العام للغازات *gas constatnt* حيث إن:

$$R = N_A K = 8.314\ J / K\ mol$$

وهكذا يمكننا أن نعبر مرة أخرى عن القانون العام للغازات بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$P V = n R T \tag{13-22}$$

وهذه المعادلة كما أسلفنا هي معادلة الغاز المثالي، وهو الغاز الذي يكون حجم جزيئاته مهملاً، كما يشترط أن تكون القوى المتبادلة بين جزيئاته غير موجودة، إلا في حالة التصادم. وهذا ما حدا بكثير من العلماء إلى اعتماد حالة الغاز الحقيقي، والعمل على إيجاد القانون الخاص به، ومن أشهر هؤلاء فاندير والز *Vander Waals*.

13-6-3 معادلة فان دير والز *Vander Waal's Eqution*:

إن الفروق الجوهرية بين الغاز الحقيقي والغاز المثالي تتمثل في أن جزيئاته تمتلك حجماً فعلياً، كما أن جزيئاته تمتلك قوى تجاذب فيما بينها *attraction forces*، وهذا يفضي إلى أن الغاز يمكن تسييله عند ضغط ودرجة

حرارة مناسبة مما يؤكد على أن الحجم الفعلي للغاز هو عبارة عن مجموع أحجام جزيئاته، وأن القوى بين هذه الجزيئات ليست مجالاً للإهمال على أي حال من الأحوال، أما معادلة فاندير والز فهي:

$$\left(P+\frac{a}{V^2}\right)(V-b)=nRT \qquad (13\text{-}23)$$

حيث إن:

(a/V^2): مقدار التصحيح في ضغط الغاز الناتج عن التأثير المتبادل بين جزيئات الغاز.

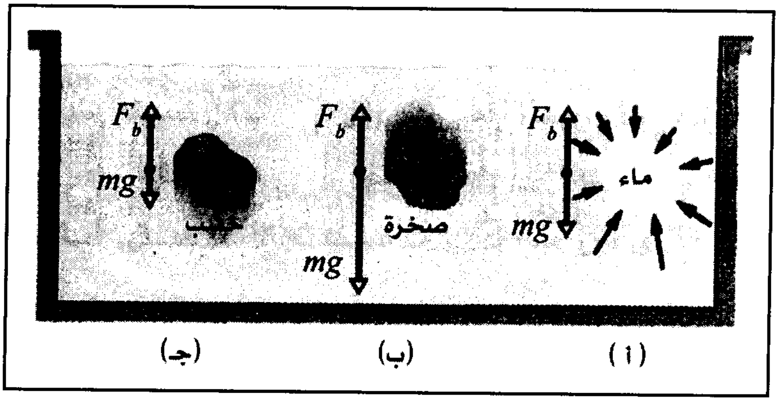
(a): مقدار ثابت يعتمد على طبيعة الغاز.

(b): مقدار التصحيح في حجم الحيز الذي يشغله الغاز، وهو ناتج عن الحجم الفعلي لجزيئات الغاز نفسه. وقد وجد عملياً أن مقدار (b) يساوي أربع أضعاف الحجم الكلي للجزيئات في المول الواحد، أي أربع أضعاف عدد أفوكادرو.

وما تسفر عنه معادلة فاندير والز أن الضغط الذي يسلطه الغاز الحقيقي هو أقل من الضغط الذي يسلطه الغاز المثالي، وذلك بسبب قوى الجذب المسلطة على الجزيئات القريبة من جدار الوعاء باتجاه الداخل.

13-6-4 قاعدة أرخميدس *Archimedes's Principle*:

انظر الشكل (13-10).



الشكل (13-10)

يبين القوى التي تفسر قاعدة أرخميدس

نجد في هذا الشكل أن الجسم المغمور بالماء يقف على مسافة معينة من قاع الوعاء الذي يحتوي كلاً من الماء والجسم، وهذا ما يشير إلى أن الجسم المغمور فقد شيئاً من وزنه، وهذا ما يجعلنا نبحث عن السبب الذي يؤدي إلى وجود قوة متجهة من الأسفل نحو الأعلى، يسلطها السائل (وكذلك الغاز) على الأجسام الطافية أو المغمورة فيه، تسمى هذه القوة *buoyant force* وهي تساوي وزن الماء الذي أزاحه الجسم، وهذا ما نعبِّر عنه رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$F_b = \rho_f V g \qquad (13\text{-}24)$$

حيث إن:

(F_b): هي قوة الطفو وتقاس بالنيوتن.

(ρ_f): كثافة السائل وتقاس بالكيلوغرام لكل متر مكعب.

(V): حجم السائل المزاح ويقاس بالمتر مكعب.

(g): تسارع الجاذبية الأرضية ويقاس بالمتر لكل ثانية مربعة.

ومن الممكن إثبات ذلك على النحو الآتي:

تأمل من جديد الشكل (13-10)، ولاحظ أن قوة الدفع نحو الأسفل والتي تؤثر على الوجه العلوي للجسم المغمور على عمق (h) هي عبارة عن:

$$F_{\downarrow} = P_1 A = \rho_f \, g \, h \, A \qquad (13\text{-}25)$$

كما أن قوة الدفع نحو الأعلى عل الوجه السفلي المغمور على عمق $(h+L)$ هي عبارة عن:

$$F_{\uparrow} = P_2 A = \rho_f \, g (h+L) A \qquad (13\text{-}26)$$

لاحظ أيضاً أن محصلة هاتين القوتين هي:

$$F_b = F_{\uparrow} - F_{\downarrow} = \rho_f \, gV \qquad (13\text{-}27)$$

وهي تمثل قوة الطفو، وهذه المعادلة هي التعبير الرياضي عن قاعدة أرخميدس، وتبقى صحيحة سواء بالنسبة للسوائل أو الغازات. وهنا لا بد من التأكيد على مسألتين غاية في الأهمية ونحن نناقش قاعدة أرخميدس وهما:

1- يخضع الجسم المغمور في المائع إلى قوتين، قوة وزنه (W)، ويكون اتجاهها عمودياً نحو الأسفل.

2- يخضع الجسم المغمور إلى تأثير قوة الطفو (F_b) وتكون عمودية واتجاهها نحو الأعلى، ويعتمد وضع الجسم في المائع على محصلة هاتين القوتين، فإن كانت المحصلة:

أ- $W > F_b$ يغطس الجسم في المائع.

ب- $W < F_b$ يطفو الجسم على سطح المائع.

جـ- $F = W$ يتعلق الجسم في المائع في حالة توازن.

أما عن وزن المائع الذي يزيحه الجسم المغمور، فيمكننا إيجاده من المعادلة البسيطة الآتية:

وزن المائع المزاح = وزن الجسم في الهواء – وزن الجسم في المائع

أما إذا كان الجسم مغموراً بشكل جزئي فإن:

وزن المائع المزاح = وزن الجسم الطافي في الهواء

مثال (13-14) *Example*

إذا كان وزن التاج المصنوع من مادة معدنية كتلتها $(3\ kg)$ وهو مغمور في الماء يساوي $(W' = 26\ N)$.

أوجد حسابياً كثافة المادة التي صنع منها التاج.

الحل *Solution*:

الوزن الحقيقي للتاج:

$$W = mg = (3\ kg)\,(9.8\ m/s^2) = 29.4\ N$$

قوة الطفو:

$$F_b = 29.4 - 26 = 3.4\ N$$
$$F_b = W - W' = \rho_f\, g V$$

حيث إن (V) هي حجم الجسم وتساوي حجم الماء المزاح. ولكن وزن الجسم يساوي إلى:

$$W = \rho g V$$

حيث إن (ρ) هي كثافة المادة التي صنع منها التاج:

$$\therefore \frac{W}{F_b} = \frac{\rho g V}{\rho_f g V} = \frac{\rho}{\rho_f}$$

$$F_b = W\left(\frac{\rho_f}{\rho}\right)$$

$$W\left(\frac{\rho_f}{\rho}\right) = W - W'$$

$$\rho = \rho_f\left(\frac{W}{W - W'}\right)$$

$$= \frac{(10^{-3}\ kg.m^{-3})(29.4\ N)}{3.4\ N}$$

$$\rho = 8.6 \times 10^{3}\ kg.m^{-3}$$

وهي مقاربة جداً لكثافة النحاس.

مثال (13-15) *Example*

جسم صلب يبلغ مقدار حجمه $(300\ m^3)$ مغمور في سائل كثافته تساوي $(1600\ kg.m^{-3})$.

أوجد حسابياً مقدار قوة الطفو المؤثرة على هذا الجسم.

الحل **Solution**:

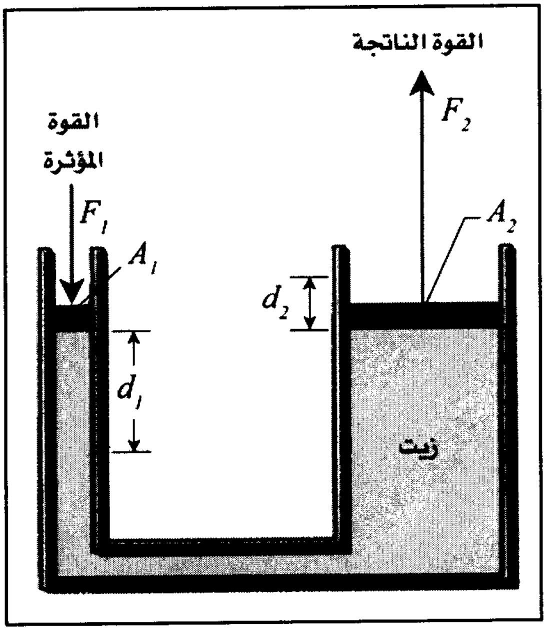
قوة الطفو:

$$F_b = W - W' = \rho_f \, gV$$
$$= (1600\,kg.m^{-3})(9.8\,m.s^2)(300\,m^3)$$
$$= 4.7 \times 10^6 \, N$$

13-6-5 قاعدة باسكال *Pascal's Principle*:

إذا سلطنا ضغطاً خارجياً على أي جزء من مائع في مكان محصور وساكن، فإن هذا الضغط سيؤثر على جميع أجزاء المائع بشكل متساوٍ. هذا هو مضمون قاعدة العالم الفرنسي باسكال *Pascal's principle* والذي وضعه نتيجة لتجاربه العلمية في هذا المجال، وهو مبدأ قديم، ذلك أن باسكال عاش في الفترة ما بين (1623-1662م). وهنا لا بد من الإشارة إلى أن مفهوم هذه القاعدة يعني أنَّ ضغطاً آخر سيؤثر على دراستنا للحالة التي تنطبق عليها هذه القاعدة خلاف الضغط الجوي الذي يقع تحت تأثيره كل ما هو موجود ضمن الغلاف الجوي، ولا بد من التأكيد على أهمية هذه القاعدة في تصميم الكثير من الأجهزة التي تعتمد في عملها على ضغط الزيت أو ضغط الماء كالرافعات الزيتية والمطارق والعجلات والفرامل. وتجدر الإشارة هنا إلى أن المائع المستخدم لهذا الغرض لا بد أن يستوفي مجموعة من الشروط الذاتية والصحية المحددة، كاللزوجة والتبخر وعدم كونه آكلاً *corrosional* للوعاء الذي يحتويه وليس ساماً أو سريع الاشتعال.

ولبيان الاستخدام العملي لهذه القاعدة تأمل الشكل (13-11).



الشكل (11-13) يبين مبدأ قاعدة باسكال
من خلال القوة المؤثرة (F_1) على المساحة (A_1)،
وانتقال تأثير ذلك على المساحة (A_2)

تجد في هذا الشكل مكبسين *two pistons* مساحة الأول (A_1) والقوة المؤثرة عليه (F_1)، أما مساحة الثاني فهي (A_2) والقوة الناتجة المؤثرة عليه نحو الأعلى (F_2).

إن قاعدة باسكال تقتضي الآتي:

$$P_1 = P_2 = P = \frac{F_1}{A_1} \qquad (13\text{-}27)$$

أي أن الضغط متساوٍ في جميع المواقع ويمكن استخدام هذا المبدأ عملياً للحصول على القوة (F_2)، والتي تساوي:

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

$$F_2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)F_1 \qquad (13\text{-}28)$$

أي أنه بالإمكان استخدام قوة صغيرة (F_1) للحصول على قوة كبيرة (F_2) تتناسب طردياً مع مساحة المكبس الكبير والقوة الصغيرة، وعكسياً مع مساحة المكبس الصغير. وهكذا يمكننا زيادة القوة الرافعة من خلال التحكم بالنسبة (A_2/A_1)، وتحتاج الرافعات التي تؤدي عملاً كبيراً إلى كميات كبيرة من المائع المستخدم لهذا الغرض.

إن مبدأ باسكال يستخدم على نطاق واسع في ما يسمى بعلم الهيدروليك، والرافعات الهايدروليكية *hydraulic lever*، والذي يعتمد أساساً على تكبير القوة الأولية (F_1) إلى القوة الثانية (F_2).

مثال (13-16) *Example*

في الشكل (11-13) يبلغ مقدار القوة المؤثرة على المكبس الصغير (F_1) $(200\ N)$، تؤثر على مساحة مقدارها (A_1) $(0.25\ m^2)$، أوجد حسابياً المساحة المطلوبة في المكبس الكبير كي نحصل على قوة (F_2) تساوي $(1000\ N)$.

الحل *Solution*:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_1 A_2 = F_2 A_1$$

$$A_2 = \frac{F_2 A_1}{F_1}$$

$$= \frac{(1000\,N)(0.25\,m^2)}{200\,N}$$

$$= \frac{250}{200} = 1.25\,m^2$$

13-7 الشد السطحي *Surface Tension*:

تشترك جميع الموائع بخاصية قابلية مساحتها السطحية للانكماش، وهذا الانكماش يؤدي إلى تفسير الزيادة في سطح المائع بسبب صعود جزيئات إضافية من داخل المائع إلى السطح بسبب امتلاكها للطاقة اللازمة لذلك، إن ميل كمية الزئبق المنسكبة على الطاولة أو الأرض مثلاً إلى الانكماش واضح جداً من خلال تكوين كرات صغيرة تتدحرج بسهولة على سطح الطاولة أو سطح الأرض، كما أن انكماش قطرات الماء حول بقايا المواد الدهنية في الأطباق غير النظيفة، ومشاهدات أخرى كثيرة كلها تفسَّر على أساس هذه الظاهرة، ظاهرة الشد السطحي *surface tension*.

ويمكن تفسير ما يحدث على ضوء النظرية الجزيئية للسوائل *fluids molecular theory* والتي تقتضي الانتباه إلى حقيقتين أساسيتين وفق هذه النظرية، وهما:

1- وجود قوى التماسك الجزيئية بين جزيئات المائع الواحد *cohesive forces*.

2- وجود قوى التلاصق عند السطح بين جزيئات المائع والجدار الداخلي للوعاء الذي يحتويه *adhesive forces*.

ومن الجدير بالذكر أن ظاهرة الشد السطحي تحدث عند السطح العلوي للسائل وكذلك السطوح الملامسة للوعاء الذي يحتويه، وتستثنى من ذلك الجزيئات الموجودة داخل السائل، وذلك لأنها تكون خاضعة لتأثير قوى الجزيئات الأخرى المحيطة بها من جميع الجهات مما يؤدي إلى أن تكون محصلة تأثيرها على الجزيئات الداخلية مساوية للصفر.

أما بالنسبة للجزيئات الأخرى الموجودة عند السطح فإنها تخضع لتأثير قوى الجزيئات الواقعة تحتها وتعمل باتجاه الأسفل، حيث تؤدي محصلة هذه القوى إلى تحريك الجزيئات أو شدها نحو الأسفل إلى داخل السائل وهذا ما يفسر القابلية الدائمة لسطح السائل إلى الانكماش.

ولتسهيل وتقريب هذا المفهوم دعنا نعتبر أن سطح السائل مكون من عدد كبير جداً من الخطوط المستقيمة أو الأشكال الأخرى من الخطوط التي يحددها شكل السائل، وعلى أساس هذا الاعتبار يمكننا أن نقدم تعريفاً لمعنى التوتر السطحي.

تعريف التوتر السطحي *definition of surface tension (Ts)*:

هو القوة (F) التي تؤثر على وحدة الأطوال (l) من خط مرسوم على سطح السائل، حيث يكون اتجاه القوة عمودياً على ذلك الخط ومماساً للسطح، وعلى هذا الأساس يمكننا أن نعبِّر عن ذلك بالعلاقة الرياضية:

$$T_S = \frac{F\,(Newton)}{l\,(meter)} \qquad (13\text{-}29)$$

ويمكننا أن نتعرف على وحدة قياس التوتر السطحي (T_s) بالتعويض في المعادلة السابقة *(13-29)* كل كمية بوحدات قياسها:

$$\frac{kg\, m.s^{-2}}{m} = kg.s^{-2}$$

أي أن الوحدة هي $[M]\,[T^{-2}]$ وفقاً لنظرية الأبعاد.

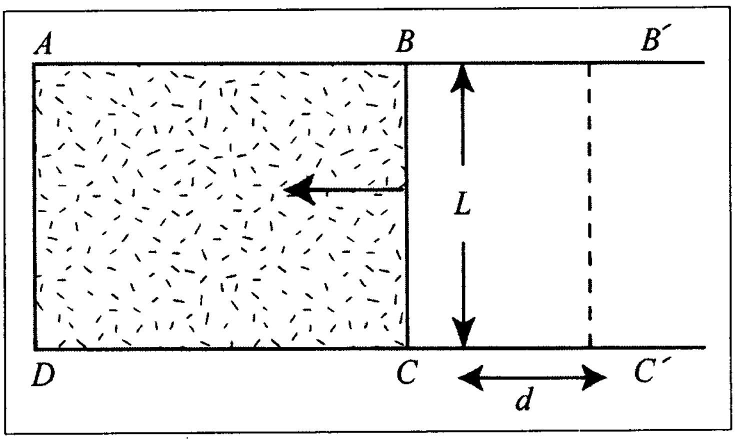
ومن الممكن عملياً تعيين مقدار التوتر السطحي حسب طبيعة الحالة الفيزيائية.

والسؤال الآن هو ما هي علاقة التوتر السطحي (T_s) بالطاقة السطحية الناشئة على سطح سائل؟

هذا ما سوف نجيب عنه في الفقرة التالية.

13-7-1 الطاقة السطحية *Surface Energy* (E_s):

لتبسيط استيعاب هذه المسألة، انظر الشكل (13-12).



الشكل (13-12)

يوضح هذا الشكل غشاء من مائع داخل المحيط $(ABCD)$، حيث إن الضلع (BC) قابل للحركة داخل الضلعين المتوازيين (AB) و(DC).

افرض أن (T_S) هو مقدار التوتر السطحي للسائل فإن هذا يفضي إلى أن القوة المؤثرة على الضلع (BC) هي:

$$F = 2\, T_S\, l \tag{13-30}$$

حيث إن (l) هو طول السلك (BC)، وسبب وجود العدد (2) في الطرف الأيمن من المعادلة هو وجود سطحين للسائل وهذا ما أدى إلى مضاعفة مقدار القوة.

افرض الآن أن السلك (l) تحرك إزاحة مقدارها (d) حيث أصبح عند الموقع الجديد $(B'C')$، في هذه الحالة يكون الشغل المبذول عبارة عن:

$$W = F\, d = 2\, T_S\, l\, d$$

وبملاحظة أن المقدار $(2\, l\, d)$ هو عبارة عن الزيادة التي حصلت في مساحة الغشاء نجد أن:

$$W = T_S\, A$$

$$A = 2\, l\, d$$

ومن هنا نستطيع أن نعرف الطاقة السطحية (E_S) على النحو الآتي: «هي عبارة عن الشغل المبذول لزيادة سطح السائل بمقدار وحدة المساحة»، ويعبر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$E_S = \frac{W\,(Joul)}{A\,(m^2)} \tag{13-31}$$

أما وحدة قياس الطاقة السطحية فتساوي إلى:

$$E_S = \frac{kg\, m^2\, s^{-2}}{m^2} = kg\, s^{-2}$$

أي أن تمثيل وحدة قياس (E_S) في نظرية الأبعاد هي $[M]\,[T^{-2}]$.

وهذا ما يؤكد أن كمية الطاقة السطحية (E_S) تساوي كمية الشد السطحي (T_S) وذلك عند ثبوت درجة الحرارة.

مثال (13-17) *Example*

سلك أفقي دائري الشكل قطره $(8\ cm)$ غُمِرَ في عينة من زيت خام، فإذا كانت القوة المضافة نتيجة التوتر السطحي واللازمة لشد السلك الدائري خارج السائل تساوي $(92 \times 10^{-4}\ N)$.

أوجد حسابياً مقدار التوتر السطحي لهذا السائل.

الحل *Solution*:

$$T_S = \frac{F}{l}$$

حيث (l) يساوي إلى محيط الدائرة وهو:

$$l = \pi D = \pi(8 \times 10^{-2}\ m)$$

$$= 251 \times 10^{-3}\ m$$

$$T_S = \frac{(92 \times 10^{-4}\ N)}{2(251 \times 10^{-3}\ m)} = 183 \times 10^{-4}\ Nm^{-1}$$

حاول أن تتعرف على سبب ضرب المقام بالعدد (2) عند التعويض لإيجاد مقدار (T_S).

مثال (13-18) *Example*

قطعة من أنبوبة زجاجية قطرها الخارجي $(4\ cm)$، وقطرها الداخلي $(3.5\ cm)$ تستقر بشكل عمودي بحيث أنَّ أحد طرفيها منغمس في الماء.

أوجد مقدار قوة الشد نحو الداخل المؤثرة على الأنبوبة والناشئة عن التوتر السطحي، إذا علمت أن التوتر السطحي للماء يساوي $(74 \times 10^{-3}\ Nm^{-1})$.

الحل **Solution**:

$$T_S = \frac{F}{l}$$

$$F = T_S\, l$$

الطول الكلي للتلامس:

$$l = (4 \times 10^{-2} + 3.5 \times 10^{-2})\pi$$

$$= 235.6 \times 10^{-3}\ m$$

$$T_S = 74 \times 10^{-3}\ N.m^{-1}$$

$$F = 74 \times 10^{-3}\ (N.m^{-1})(235.6 \times 10^{-3}\ m)$$

$$= 174.4 \times 10^{-4}\ N$$

مثال **Example (13-19)**

فقاعة من الصابون قطرها $(2\ cm)$، يبلغ مقدار التوتر السطحي لمحلول الصابون $(25\ dyne.cm^{-1})$.

أوجد مقدار الشغل المبذول ضد قوى التوتر السطحي لتكوين هذه الفقاعة.

الحل **Solution**:

$$W = T_s A$$

$$A = 2 \times 4\pi r^2$$

$$= 2 \times 4\,\pi\,(1 \times 10^{-2}\ m)^2$$
$$= 2.52 \times 10^{-3}\ m^2$$
$$T_s = 25 \times 10^{-3}\ N.m^{-1}$$
$$W = 25 \times 10^{-3}\ (N.m^{-1})\ 2.52 \times 10^{-3}\ (m^2)$$
$$= 6.3 \times 10^{-5}\ Joule$$

ملاحظة: $1\ N = 10^5\ dyne$

وهكذا فإن $(25\ dyne.cm^{-1})$ يساوي $(25 \times 10^{-3}\ N.m^{-1})$.

13-7-2 الضغط الناشئ عن التوتر السطحي *Surface Tension Pressure*:

إن وجود التوتر السطحي يسبب زيادة في مقدار الضغط داخل قطره من سائل أو فقاعة من غاز، عن مقدار الضغط خارج هذه الأجسام، ويعبَّر عن ذلك الضغط *surface tension pressure* بالقانونين الآتيين وفقاً لكل حالة:

1- إذا كانت القطرة على شكل كرة *spherical drop* فإن زيادة الضغط داخلها يساوي:

$$P_T = \frac{2\,T_S}{r} \qquad (13\text{-}32)$$

حيث إن:

(P_T): الزيادة الحاصلة في الضغط داخل القطرة الكروية.

(T_s): التوتر السطحي للقطرة الكروية.

(r): نصف قطر القطرة الكروية.

2- إذا كانت الفقاعة على شكل كرة ممتلئة بالغاز *spherical shell* فإن زيادة الضغط داخلها يساوي:

$$P_T = \frac{4T_S}{r} \qquad (13\text{-}33)$$

حيث إن:

(P_T): الزيادة الحاصلة في الضغط داخل الفقاعة الكروية.

(T_s): التوتر السطحي للفقاعة الكروية.

(r): نصف قطر الفقاعة الكروية.

مثال (13-20) *Example*

فقاعة من الصابون مقدار نصف قطرها الدائري يساوي $(3\ cm)$، ومقدار توترها السطحي يساوي $(0.105\ Nm^{-1})$.

أوجد حسابياً مقدار الزيادة في الضغط داخل الفقاعة.

الحل ***Solution***:

$$P_T = \frac{4T_S}{r}$$

$$T_S = 0.105\,(N.m^{-1})$$

$$r = 3\times 10^{-2}\ m$$

$$P_T = \frac{4(0.105\ N.m^{-1})}{(3\times 10^{-2}\ m)}$$

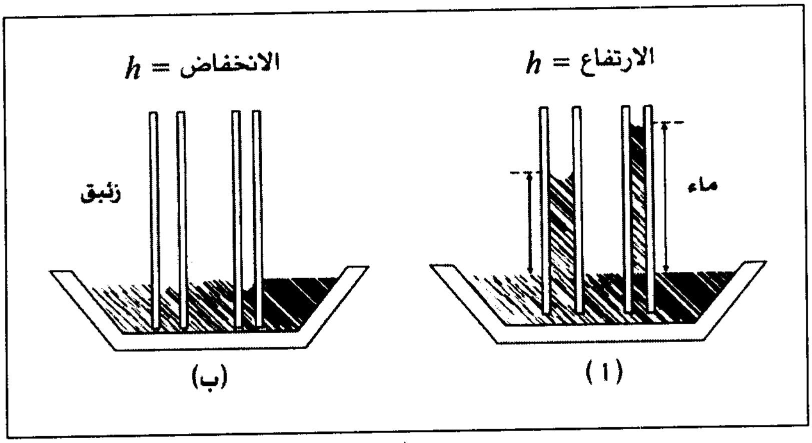
$$= 14\,(N.m^{-2}) = 14\ Pa$$

ملاحظة: $1(N.m^{-2}) = 1(pascal)$

13-7-3 التوتر السطحي للأنابيب الشعرية

Capilarity Tubes Surface Tension:

تأمل الشكل (13-13)، تلاحظ وعاء من الماء وآخر من الزئبق يحتوي كل منهما على أنبوبتين شعريتين أنصاف أقطارهما صغيرة جداً، بحيث نعتبرهما أنبوتين شعريتين.



الشكل (13-13)

الجزء الأول من الشكل (13-13) وهو الجزء (أ) يوضح أن الماء سوف يرتفع بعد قليل خلال الأنابيب الشعرية، ومن الجدير بالذكر أنَّ مقدار هذا الارتفاع يتناسب عكسياً مع نصف قطر الأنبوبة الشعرية، وهذا واضح تماماً من خلال الشكل المذكور.

أما الجزء الثاني من الشكل (13-13) وهو الجزء (ب) فيوضح أن الزئبق قد انخفض داخل الأنابيب الشعرية، ومن الواضح أيضاً أن مقدار هذا الانخفاض يتناسب عكسياً مع أنصاف أقطار الأنابيب الشعرية.

إذن كيف يمكن أن نفسر هاتين المشاهدتين؟[1]

إن النظرية الجزيئية التي سبق ذكرها في الفقرة (7-13) من هذا الفصل هي التي يمكن اعتماد مفهومها لتفسير كلا الظاهرتين، نعني هنا ارتفاع الماء وانخفاض الزئبق داخل الأنابيب الشعرية. ففي حالة الماء تغلبت قوى تلاصق الماء مع الزجاج على قوى التماسك بين جزيئات الماء ذاته، بينما حصل العكس تماماً في حالة الزئبق وهذا ما يشير بوضوح إلى ارتفاع مقدار قوى التماسك بين جزيئات الزئبق.

والآن هل سيستمر ارتفاع الماء داخل الأنبوبة الشعرية أم لا؟

إجابة هذا السؤال تكمن في النقطة التي تصل فيها القوتان الناتجة عن الشد السطحي. و قوة وزن عمود الماء داخل الأنبوبة الشعرية، إلى حالة الاتزان. وبفرض أن الماء قد ارتفع في الأنبوبة الشعرية مقداراً يمكن قياسه (h)، عندها نشاهد أن سطح الماء يكون مقعراً داخل الأنبوبة الشعرية وهذا ما يجعلنا نمثل الشد السطحي (T_S) على شكل خط مماس لهذا التقعر، انظر الشكل (13-14).

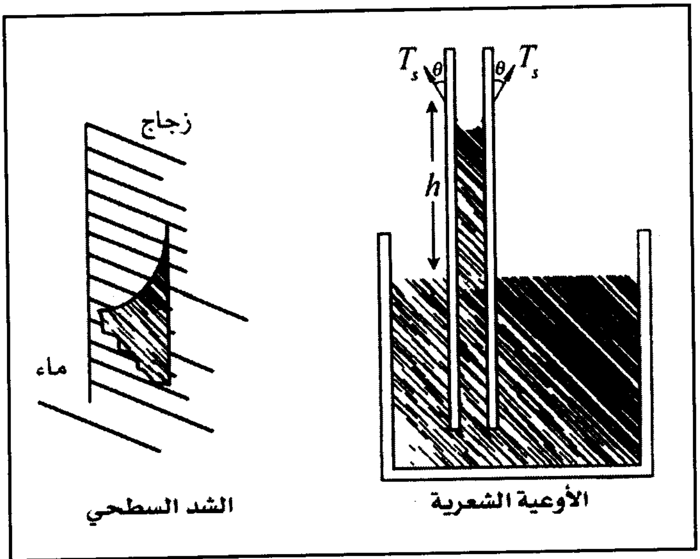
تأمل الشكل (13-14)

(T_S): تمثل الشد السطحي.

(θ): الزاوية التي يصنعها الشد السطحي مع جدار الأنبوبة الشعرية الخارجي.

(h): مقدار ارتفاع الماء داخل الأنبوبة الشعرية.

(1) ننصح بإجراء هذه التجارب البسيطة خلال المحاضرة.



الشكل (13-14)

إن المركبة العمودية للقوة المؤثرة على وحدة طول الغشاء المائي الملامس لجدران الأنبوبة هي عبارة عن:

$$\vec{F} = T_S \cos(\theta)(2\pi r) \qquad (13\text{-}34)$$

حيث إن: $(2\pi r)$ محيط سطح الماء الملامس للأنبوبة.

إن قوة وزن الماء داخل الأنبوبة الشعرية تساوي:

$$\vec{W} = mg \qquad (13\text{-}35)$$

حيث إن:

(m): كتلة الماء المرتفع.

(g): هي تعجيل الجاذبية الأرضية.

من المعلوم من تعريفنا للكثافة أن:

$$m = \rho V$$

حيث (ρ) هي كثافة الماء و(V) هي حجم الماء الذي يمكن إيجاده من خلال إيجاد حجم الأسطوانة الدائرية ذات نصف القطر (r) والارتفاع (h).

وهكذا:

$$V = \pi r^2 h$$

$$m = \rho \pi r^2 h \qquad (13\text{-}36)$$

من المعادلتين (13-35) و(13-36) نجد أن:

$$\vec{W} = \rho \pi r^2 h g \qquad (13\text{-}37)$$

وفي حالة توازن القوتين نجد أن:

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

من المعادلتين (13-34) و(13-37) نجد أن:

$$\rho \pi r^2 h g = T_s \cos(\theta)\, 2\pi r$$

$$T_s = \frac{1}{2\cos(\theta)} r h \rho g \qquad (13\text{-}38)$$

وعندما يكون الماء نقياً فإن $(\theta = 0)$ أي أن:

$$\cos(\theta) = 1$$

وتؤول المعادلة (13-38) إلى الشكل:

$$T_S = \left(\frac{1}{2}\right) \rho g h r \qquad (13\text{-}39)$$

وذلك على افتراض أن سطح الماء يكون مستوياً، وحقيقة الأمر أن سطح الماء لا يكون كذلك، بل يكون مقعراً، والشكل العام للمعادلة (13-39) وهو:

$$T_S = \left(\frac{1}{2}\right) \rho g r \left(h + \frac{1}{3} r\right) \qquad (13\text{-}40)$$

ومن الجدير بالذكر هنا أن الزاوية (θ) في حالة الزئبق أو السوائل التي لا تبلل الزجاج تكون أكبر من $(90°)$، وهذا ما يفسر تحدب السائل داخل الأنبوبة الشعرية، انظر الشكل (13-13).

إن هذه الخاصية تنطوي على قدر كبير من حكمة وعلم الله سبحانه وتعالى، فبفضل هذه الخاصية تتغذى باقي أجزاء النبات عن طريق الجذور وهي صورة تعكس دقة صنعة المولى جلَّ وعلا، كما أن ارتفاع المياه الجوفية خلال مسامات التربة يُفسَّر على هذا الأساس، وهذا ما يمكن اعتماده إلى حدود معينة من ارتفاع الأشجار، إلا أن الأشجار الشاهقة يُفسَّر ارتفاع الماء خلالها على أساس الضغط السالب الناتج من قوى التماسك بين جزيئات الماء.

وأخيراً لا بد من الإشارة إلى أن الشد السطحي (T_s) لأي مائع يتغير وفقاً لتغير درجة الحرارة، ولبيان ذلك انظر الجدول (3-13).

السائل *fluid*	درجة الحرارة $T_s\,(0\,C°)$	درجة الحرارة $T_s\,(20\,C°)$	درجة الحرارة $T_s\,(50\,C°)$
الماء	75.6	72.7	67.9
الكحول	24	22.3	19.8
البنزين	31.5	28.9	25
الأسيتون	26.3	23.6	19.9
الزئبق	508	480	445

الجدول (3-13)

وحدة قياس الشد السطحي هي $(dyne.cm^{-1})$

مثال (21-13) *Example*

أنبوب شعري مصنوع من الزجاجي يبلغ مقدار نصف قطره الداخلي $(2 \times 10^{-3}\ m)$ مثبت بشكل عمودي في وعاء زئبقي.

أوجد حسابياً مقدار انخفاض الزئبق خلال هذه الأنبوبة الشعرية إذا كان مقدار الشد السطحي يساوي $(49 \times 10^{-2}\ N.m^{-1})$، ومقدار الكثافة النسبية للزئبق (13.6)، بينما تبلغ زاوية التلامس (135°).

الحل **Solution**:

$$T_S = \frac{1}{2\cos(\theta)} \rho g r h$$

$$\theta = 135^{\circ} \Rightarrow \cos(\theta) = -0.707$$

$$\rho_r = 13.6 = \frac{\rho}{1000}$$

$$\rho = (13.6)(1000) = 13600\, kg.m^{-3}$$

$$r = 2 \times 10^{-3}\, m$$

$$\therefore h = \frac{T_S\left(2\cos(\theta)\right)}{\rho g r}$$

$$= \frac{49 \times 10^{-2}(N.m^{-1})(-0.707) \times 2}{13600(kg.m^{-3})(9.8\, m.s^{-2})2 \times 10^{-3}\, m}$$

$$h = -2.6 \times 10^{-3}\, m$$

$$h = -2.6\, mm$$

مثال (13-22) Example

أنبوبة شعرية مقدار نصف قطرها الداخلي $(25 \times 10^{-5}\ m)$ غمرت في وعاء من الماء يبلغ مقدار توتره السطحي $(72 \times 10^{-3}\ N.m^{-1})$.

أوجد حسابياً مقدار ارتفاع الماء في الأنبوبة الشعرية.

الحل **Solution**:

من المثال (13-21) السابق رأينا أن الارتفاع أو الانخفاض (h) يمكن التعبير عنه بالمعادلة:

$$h = \frac{2T_S \cos(\theta)}{\rho g r}$$

$$T_S = 72\times 10^{-3}\ (N.m^{-1})$$

$$\theta = 0 \Rightarrow \cos(\theta) = 1$$

$$r = 25\times 10^{-5}\ (m)$$

$$\rho = 1000\,(kg.m^{-3})$$

$$g = 9.8\times m.s^{-2}$$

$$h = \frac{2\times(72\times 10^{-3}\ N.m^{-1})(1)}{(1000\,kg.m^{-3})(9.8\,m.s^{-2})(25\times 10^{-3}\ m)}$$

$$= 0.0587\ m$$

$$h = 5.87\ cm$$

والآن، إذا استمرينا في إنزال الأنبوبة الشعرية داخل الماء حتى لا يبقى منها سوى $(0.01\ m)$، ما الذي تتوقع حدوثه؟

من خلال المعلومات التي توفرت لدينا نجد أن الجزء الظاهر من الأنبوبة الشعرية فوق سطح الماء يجب أن يكون أكثر من $(5.87\ cm)$، وقد يتبادر إلى الذهن أن الارتفاع $(1\ cm)$ سوف يؤدي إلى خروج الماء من الأنبوبة الشعرية وعودته إلى الوعاء الأصلي، وأن هناك احتمالية لتكرار واستمرار هذه العملية، ولكن ذلك مناقض لإحدى أهم النظريات في الفيزياء، وهي نظرية حفظ الطاقة، إذ أن هذه العملية تستوجب بذل شغل خارجي عليها وهذا ما هو

غير متوفر في هذه الحالة. إلا أن تفسير وقوف الماء عند حدود الأنبوبة الشعرية يُفسَّر على أساس ارتفاع مقدار زاوية التلامس، ففي هذه الحالة على سبيل المثال وباستخدام العلاقة الرياضية *(13-38)* نجد أن مقدار الزاوية المصاحب لارتفاع قدره $(1\ cm)$ يساوي $(\theta = 82.2°)$، وعندها تكون المركبة العمودية للشد السطحي صغيرة وكافية لمعادلة وزن عمود الماء داخل الأنبوبة الشعرية.

$$cos(\theta) = \frac{h \rho g r}{2T_S} = 0.17$$

$$\theta = cos^{-1}(0.17) = 82.2°$$

مثال (13-23) *Example*

تعتبر الشجرة مجموعة من الأنابيب الشعرية يبلغ متوسط نصف قطر الواحد منها $(2.5 \times 10^{-5}\ m)$.

أوجد حسابياً أقصى ارتفاع يمكن أن تصله عصارة المادة الغذائية للنبات عند درجة الحرارة $(50\ °C)$، حيث تقترب في طبيعتها من طبيعة الماء عند درجة الحرارة هذه، علماً بأن مقدار الشد السطحي الموافق لهذه الحالة هو $(67.9 \times 10^{-3}\ N.m^{-1})$.

الحل *Solution*:

$$h = \frac{2T_S\, cos(\theta)}{\rho g r}$$

$$T_S = 67.9 \times 10^{-3}\ N.m^{-1}$$

$$\theta = 0 \Rightarrow cos(0) = 1$$

$$\rho = 10^3\ kg.m^{-3}$$

$$g = 9.8\,m.s^{-2}$$
$$r = 2.5\times 10^{-5}\,m$$
$$h = \frac{2\times(67.9\times 10^{-3}\,N.m^{-1})(1)}{(10\,kg.m^{-3})(9.8\,m.s^{-2})(2.5\times 10^{-3}\,m)}$$
$$= 0.554\,m$$
$$= 55.4\,cm$$

وهذا ما يؤكد عدم المقدرة العلمية على اعتماد التفسير العملي للخاصية الشعرية كأساس لصعود المواد الغذائية من الجذر إلى باقي أجزاء النبات، ومرة أخرى نؤكد على الضغط السالب لجزيئات الماء ومدى فاعليته في تغذية النباتات ذات الارتفاع العالي، إذ أنه هو الذي يتسبب في صعود الغذاء إلى ارتفاعات عالية في الأشجار إذ أن كثيراً من الأشجار يزيد ارتفاعها عن هذا المقدار البسيط.

8-13الانتشار *Diffusion*:

إن ظاهرة الانتشار تحظى بأهمية بالغة في حالات المادة الثلاثة، إلا أن أهميتها تتجلي بشكل أكبر في الحالة الغازية لأنها ظاهرة ذاتية سريعة الآلية، فانتشار غاز الأمونيا *ammonia gas* في درجة حرارة الغرفة بسرعة تقارب $(500\,m/s^{-1})$، أو انتشار قاتل الحشرات *insect killer spray* داخل الغرفة أو انتشار رائحة العطر *perfume* على الرغم من سكون الهواء، كل ذلك نتائج ملموسة دالة على وجود هذه الظاهرة وسرعة حدوثها، أما في السوائل فهي أقل سرعة وأبطأ آلية كانتشار قطرة من الحبر في وعاء مليء بالماء النقي الساكن حيث يمكن ملاحظة الانتشار التدريجي للحبر داخل وعاء الماء. أما في المواد الصلبة فإن العملية تستغرق وقتاً طويلاً وذلك لأن معدل

الانتشار يكون بطيئاً للغاية، فقد يستغرق ذلك عدداً من السنوات، ويعتبر التشوه الحاصل لإحدى عجائب الدنيا السبع، قصر تاج محل في الهند والمصنوع من مادة الرخام *marbel* شاهداً ملموساً على الانتشار لغازات مختلفة كأول أكسيد الكربون *carbon mono oxide* وغيرها في المواد الصلبة.

وقد حظيت هذه الظاهرة باهتمام كثير من العلماء، منهم العالم غراهام *Graham* 1851م، الذي قدم فيما بعد قانونه المعروف لانتشار الغازات، والذي ينص:

«إن معدل انتشار غاز ما يتناسب تناسباً عكسياً مع الجذر التربيعي لكثافته».

إذا ما أخذنا غازين أحدهما كثافته (ρ_1) والآخر (ρ_2) فإن العلاقة الرياضية التي تربط بين انتشاريهما وفقاً لقانون غراهام هي:

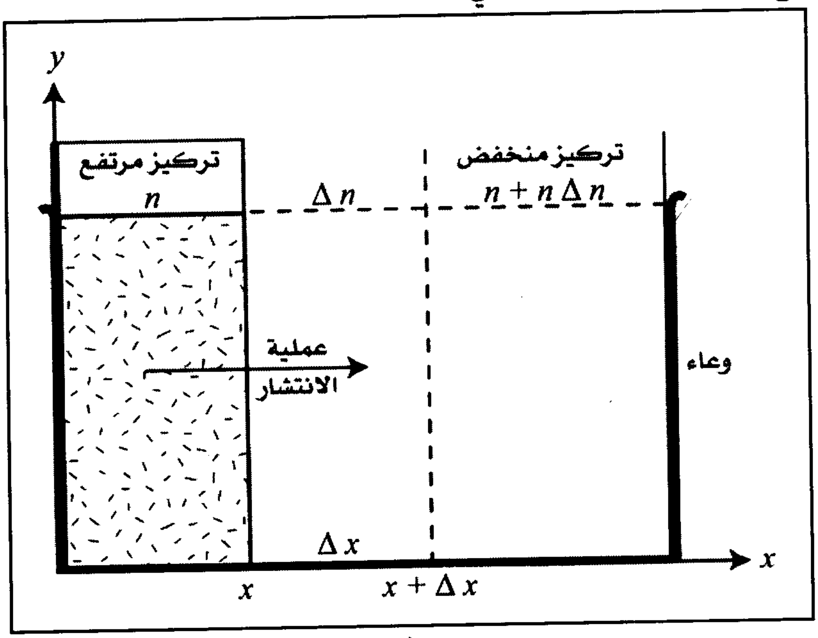
$$\frac{d_1}{d_2}=\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (13\text{-}41)$$

حيث إن: (d_2, d_1) هما معدل الانتشار للغازين الأول والثاني على التوالي.

إلا أن قانون غراهام هذا لا يساعد على استيعاب آلية الانتشار في السوائل، ولكن غراهام نفسه سجل استنتاجاته في دراسات أجراها حول هذه المسألة. أشار إلى أن معدل الانتشار يعتمد على طبيعة الملح المذاب *soluble salt* على الرغم من تساوي تراكيزها *concentrations*، كما أن هناك علاقة بين الانتشار والتراكيز للأملاح، وعلاقة ذلك بدرجة الحرارة، حيث وجد أن معدل الانتشار يزداد بازدياد درجة الحرارة.

أما العالم فك *Fick* فقد توصل في عام 1855م إلى وضع قانونه المعروف باسمه والذي يوضح فيه معدل الانتشار في كل من المواد السائلة والصلبة.

إن معدل انتشار المادة المذابة *soluble* خلال وحدة المساحة في أي اتجاه في المذيب *solvent* يتناسب طردياً مع انحدار تركيز المذاب في ذلك الاتجاه، ولتوضيح ذلك تأمل الشكل الآتي.



الشكل (15-13)

انتشار المذاب خلال المذيب

حيث إن:

(n): هو تركيز المذاب عند النقطة (x).

(A): المساحة التي قطعتها الجزيئات بين الموقعين (x) و$(x + \Delta x)$.

(Δt): الزمن اللازم لذلك.

(Δm): كتلة المذاب التي قطعت المساحة (A).

والآن نجد أن:

$(\Delta m / \Delta t)$: تمثل معدل انتشار المذاب خلال المساحة (A).

$(\Delta n / \Delta x)$: تمثل انحدار التركيز مع المسافة في ذات الاتجاه.

إذن:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \propto -A \frac{\Delta n}{\Delta x}$$

وبإدخال ثابت التناسب، نجد أنَّ:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = -D A \frac{\Delta n}{\Delta t} \qquad (13\text{-}42)$$

وهذه هي المعادلة التي تبين الصيغة الرياضية لقانون فك.

لاحظ أن (D) هو عبارة عن ثابت الانتشار، وأن الإشارة السالبة في قانون فك تعني أن حركة المذاب بعكس اتجاه زيادة التركيز.

إن الحالة التي تكون فيها جزيئات المذاب على شكل كرات ذوات أنصاف أقطار متساوية (r) وتتحرك في سائل ذي لزوجة (η) ودرجة حرارة (T) فإن معامل الانتشار (D) يُعبَّر عنه بالمعادلة الرياضية الآتية:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r} \qquad (13\text{-}43)$$

حيث إن (k): هو ثابت بولتزمان سابق الذكر، والمعادلة *(43-13)* تحمل اسم العالم أينشتاين *Einstein*، والجديد فيها أن حجم جزيئات السائل يلعب

دوراً هاماً في عملية الانتشار، وهي لا تنطبق على الغازات، ولكن باستخدام قانون *Fick* فإن معامل انتشار الغاز يعبر عنه بالعلاقة الرياضية:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v} \qquad (13\text{-}44)$$

حيث إن:

(λ): تمثل متوسط المسار الحر لجزيئات الغاز *mean free path*.

$(\bar{v})$: الجذر التربيعي لمتوسط مربعات سرعات جزيئات الغاز، وهي ما نطلق عليه اسم السرعة الفعالة *average velocity square root*.

ومن المعلوم أن النظرية الحركية للغازات تمكننا من التعبير عن لزوجة الغاز بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda \bar{v} \qquad (13\text{-}45)$$

حيث إن:

(ρ): هي عبارة عن كثافة الغاز وهي عبارة عن حاصل ضرب (m) كتلة الجزيء الواحد بعدد الجزيئات في وحدة الحجم (n).

أي أن: $(\rho = m\,n)$.

ومن خلال المعادلتين *(13-44)* و*(13-45)* نجد أن معامل انتشار الغاز هو:

$$D = \frac{\eta}{\rho} \qquad (13\text{-}46)$$

13-9 الخصائص الميكانيكية للموائع المتحركة
:*Mechanical Properties of Dynamic*[1] *Fluids*

إن الحالة المتحركة للموائع *dynamic fluids* تُظهر خصائص مختلفة عن تلك التي بيَّناها في حالة الموائع الساكنة *static fluids*، وهذه الخصائص على درجة كبيرة من الأهمية، ولعل خاصية اللزوجة *viscosity* تأتي في مقدمتها، وهي المسؤولة عن مقاومة حركة المائع، ومن الفوارق الجوهرية بين الحالتين الساكنة والمتحركة للموائع، تلك التي تؤكد بأن ضغط المائع الساكن يبقى ثابتاً، أما ضغط المائع المتحرك فهو ليس كذلك.

إن حركة المائع تعود إلى وجود قوة غير متوازنة *unbalanced force* تؤثر عليه وتدفعه إلى الحركة، وتكون هذه الحركة معرضة إلى تأثير مجموعة من العوامل. ولدراسة الحالة المتحركة للموائع فإنه لا بد من التأكيد على أنها غير قابلة للانضغاط *incompressible* في دراستنا هذه، وسنتناول المفاهيم الأساسية ذات الصلة بحركة الموائع.

إن خاصية اللزوجة للمائع يتم التعبير عنها علمياً بمعامل اللزوجة، ويمكننا عملياً قياس معامل لزوجة المائع بطرق عديدة أشهرها طريقة العالم بوازيل *Poiseuille's method* وطريقة العالم ستوك *Stocke's method*، وسنناقش هاتين الطريقتين، كلاً على حدة.

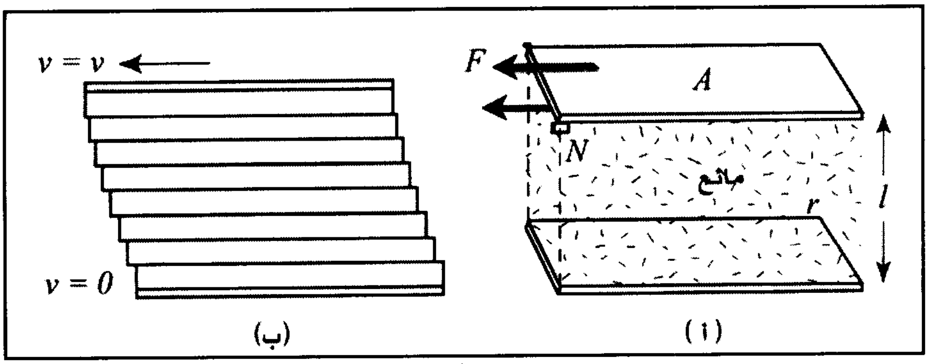
13-9-1 طريقة بوازيل :*Poiseuill's Method*

لقد تمكن العالم الفرنسي بوازيل *Poiseulle* في عام 1840م من تقديم طريقة محددة الخطوات لحساب معامل لزوجة سائل، وذلك من خلال قياس معدل التدفق *flow rate* للمائع المطلوب تحديد معامل لزوجته، ومعدل التدفق

(1) هناك ترجمة عربية أخرى لهذه الكلمة وهي «دينامي».

هو عبارة عن حجم المائع الذي ينساب خلال مجراه وسنوضح مفهوم اللزوجة بشيء من الإيضاح قبل أن نتناول طريقة بوازيل.

تعتبر لزوجة المائع *viscosity* مقياساً لمدى مقاومة المائع للانسياب، وتنشأ هذه المقاومة بسبب قوى الاحتكاك بين طبقات المائع في اتجاه معاكس لاتجاه حركته، إذ تعمل الموائع على مقاومة القوة التي تؤدي إلى تحريك طبقة من طبقات المائع فوق طبقة أخرى، وذلك بافتراض أن المائع مكون من مجموعة من الطبقات موضوعة الواحدة فوق الأخرى كما افترض ذلك العالم نيوتن، وتظهر هذه المقاومة فقط عند وجود حركة قاصة (مماسة) *tangantional* للمائع ناتجة عن قوة مؤثرة، وعندما تزول هذه القوة يتوقف المائع عن السريان وتبقى جزيئاته في المكان الذي وصلت إليه دون وجود أية إمكانية للعودة إلى وضعه الأصلي، انظر الشكل (16-13).



الشكل (16-13)

(أ) يمثل بداية تأثير القوة على الطبقة العلوية للمائع

(ب) انزلاق الطبقة العلوية يتبعها انزلاق باقي طبقات المائع

إن المعادلة الرياضية التي استخدمها بوازيل لحساب اللزوجة هي:

$$\eta = \left(\frac{F}{A}\right)\left(\frac{L}{v}\right) \qquad (13\text{-}47)$$

حيث إن:

(η): تمثل معامل اللزوجة وتقاس بوحدة البويز *poise*.

(F): القوة المؤثرة على طبقة المائع، وتقاس بالنيوتن.

(A): المساحة السطحية لطبقة المائع، وتقاس بالمتر المربع.

(v): سرعة طبقة المائع، وتقاس بالمتر لكل ثانية.

إن البويز *poise* هو وحدة قياس معامل اللزوجة في النظام الدولي (SI) وهي عبارة عن النيوتن ثانية لكل متر مربع.

$$SI\ viscosity\ unit = N.s.m^{-2} = 10\ P$$

$$10\ P = 1000\ cP$$

حيث تشير (P) اختصاراً إلى البويز، وحدة قياس معامل اللزوجة *poise*، أما (cP) فتشير إلى وحدة أخرى أصغر من البويز بمئة مرة وهي السنتي بويز *centipoise*، أي أن:

$$1\ P = 100\ cP$$

إذا كان المائع يسري خلال الماسورة *pipe* ذات الطول (L) ونصف القطر (R) بسرعة مقدارها (v) في فترة زمنية مقدارها (t) من منطقة الضغط العالي (P_1) إلى منطقة الضغط (P_2) عند فوهة الماسورة، ضمن هذه المواصفات وجد بوازيل أن معدل انسياب المائع خلال الماسورة يمكن التعبير عنه رياضياً على النحو الآتي:

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} \qquad (13\text{-}48)$$

وتسمى هذه الصيغة بقانون بوازيل *Poiseuillo's law*.

حيث إن:

(Q): الحجم الذي ينساب من الأنبوبة في الثانية الواحدة، (معدل انسياب المائع) وهو يساوي $(Q = V/t)$.

حيث إن:

(V): يساوي حجم المائع.

(P_1): الضغط العالي *high pressure*.

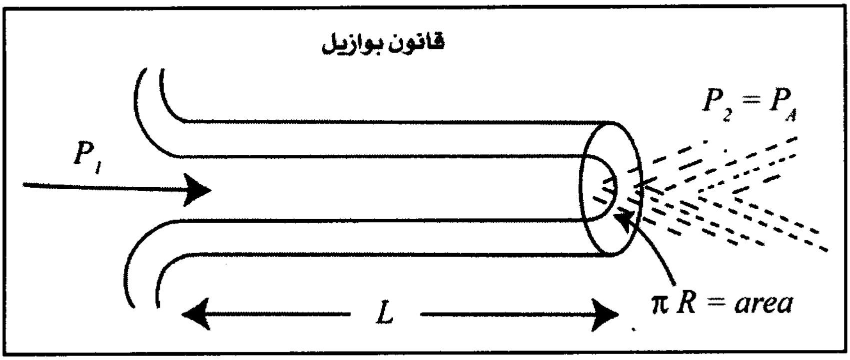
(P_2): الضغط عند فوهة الماسورة، وهو بطبيعة الحال أقل من الضغط (P_1)، *low pressure*.

(η): معامل لزوجة المائع *viscosity coefficient*.

(L): طول الماسورة *the pipe length*.

(R): نصف قطر الماسورة *radius*.

انظر الشكل (17-13).



الشكل (17-13)

توضيح معاملات معادلة بوازيل، الموضحة في المعادلة *(48-13)*

Poiseuille's law

وكان بوازيل قد وضع مجموعة من الشروط لاستخدام معادلته هذه، ونذكرها فيما يلي:

1- يجب أن يكون جريان المائع انسيابياً *steady flow*.

2- يجب أن يتدفق المائع بانتظام *regular flow*.

3- طبقة المائع الملاصقة لجدار الأنبوبة يجب أن تكون ساكنة *static layer*.

4- يبقى ضغط المائع ثابتاً خلال أي مقطع من مقاطع سريانه، كما أن حركة المائع تبقى طولية *nolateral flow*.

ومن الممكن تحقيق كل هذه المواصفات، وذلك إذا كانت الأنبوبة شعرية *capillarity type*، ومنتظمة المقطع، وأفقية الانسياب *horizontal*.

مثال (13-24) Example

إذا علمت أن مقدار لزوجة الماء يساوي ($0.81\ cP$) وذلك عند درجة الحرارة ($30°C$). أوجد حسابياً كمية الماء التي تنساب في الثانية الواحدة (Q) خلال أنبوبة شعرية طولها ($20\ cm$) ونصف قطرها ($0.15\ cm$) إذا كان فرق الضغط عبر الأنبوبة ($P_1 - P_2 = 3\ mm\ Hg$).

الحل Solution:

$$L = 0.2\ m$$

$$R = 0.15 \times 10^{-2}\ m$$

$$\eta = 0.81\ cP = 0.801 \times 10^{-3}\ N\ sec\ m^{-2}$$

$$(P_1 - P_2) = 3\ mm\ Hg = \left(\frac{3}{76}\right)(1.01 \times 10^{5}\ N.m^{-2})$$

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L}$$

$$= \frac{(3.14)\left(0.15\times 10^{-2}\ m\right)^4 \left(\frac{3}{76}\right)(1.01\times 10^5\ N.m^{-2})}{(8)(0.2\,m)(0.801\times 10^{-3}\ N.m^{-2})}$$

$$= 5\times 10^5\ m^3.s^{-1} = 50\,cm^3\ sec^{-1}$$

13-9-2 طريقة ستوك *Stocke's Method*:

لقد تمكن العالم البريطاني ستوك *Stocke* في منتصف القرن التاسع عشر من قياس معامل لزوجة المائع، وذلك بترك كرة معدنية نصف قطرها يساوي (r) تسقط سقوطاً حراً لتسير خلاله، وبيَّن أن المقاومة الاحتكاكية من قبل المائع لحركة الكرة المعدنية تنشأ بسبب القوة التي تمثلها العلاقة الرياضية:

$$F = 6\,\pi r\,\eta\,v \tag{13-49}$$

حيث إن: (v) هي السرعة النهائية للكرة المعدنية الساقطة في المائع.

ولكي نتوصل إلى الصيغة الرياضية المعبرة عن معامل لزوجة السائل، لابد أن نحدد مجموعة القوى التي تؤثر على الكرة خلال حركتها داخل المائع.

إن الكرة خلال حركتها داخل المائع تتعرض لتأثير ثلاثة قوى، هي:

1- قوة وزنها، ويكون اتجاهها نحو الأسفل *weight* (W) وتساوي إلى:

$$W = \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho\right) g \tag{13-50}$$

2- قوة الطفو نحو الأعلى *buoyancy force*، وهي تساوي وفقاً لقاعدة أرخميدس وزن المائع المزاح، أي:

$$F_b = \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \sigma \right) g \qquad (13\text{-}51)$$

حيث إن: (σ) تعبِّر عن كثافة المائع.

3- قوة احتكاك الكرة المعدنية مع المائع، وهي نحو الأعلى، أما مقدارها فتمثله المعادلة (49-13).

إن المقدار (v) يعبِّر عن السرعة التي تكتسبها الكرة بعد أن يصبح مجموع القوى المؤثرة عليها مساوياً إلى الصفر، عندئذٍ تصبح (v) سرعة منتظمة، أي أن:

$$(W - F_b) = F$$

وبتعويض هذه القوى من المعادلات (13-49)، (13-50)، و(13-51) نجد أنَّ:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \sigma g = 6 \pi \eta r v$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho - \sigma) = 6 \pi \eta r v$$

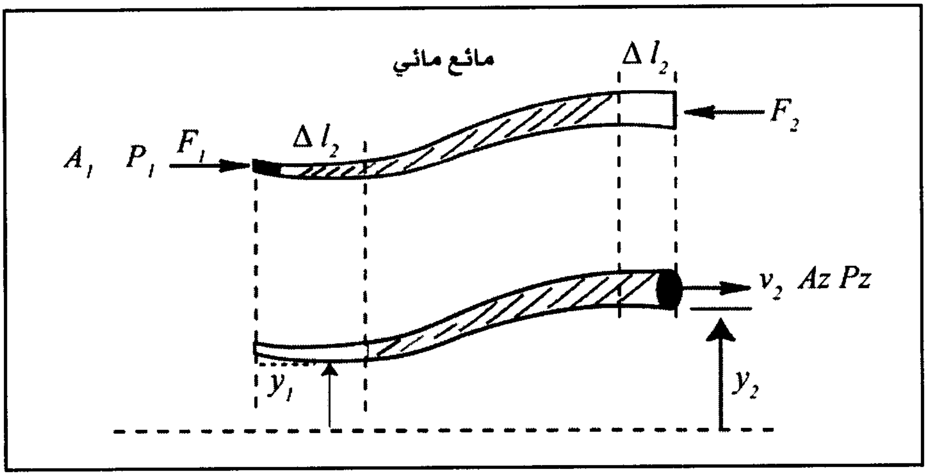
$$\eta = \frac{2}{9} \frac{g r^2}{v} (\rho - \sigma) \qquad (13\text{-}52)$$

ولا بد من مراعاة عامل العمق المناسب لحساب السرعة (v)، وهذه هي إحدى التجارب التي يتم إنجازها عادة في المراحل الأولى الجامعية، وذلك باعتماد طريقة مناسبة لقياس السرعة (v) التي تبدأ الكرات الساقطة حركتها بها بعد أن تصل حالة الاتزان، وذلك من خلال إيجاد العلاقة بين كل من المسافة التي تقطعها الكرة داخل المائع والزمن اللازم لذلك، ولغرض الدقة نعمد إلى رسم خط بياني لتمثيل هذه العلاقة ثم إيجاد مقدار السرعة

(v) حسابياً، وتعويض مقدارها في المعادلة *(52-13)*، كما يمكن إجراء ذات التجربة لمجموعة من الكرات بعد قياس أنصاف أقطارها، ورسم العلاقة بين السرعة ومربع نصف القطر.

13-9-3 معادلة برنولي *Bernoulli's Equation*:

لقد وضع العالم السويسري دانيال برنولي في عام 1788م، المعادلة أو المبدأ الذي يحمل اسمه بعد أن قام باشتقاقها، وأكد فيها أن ضغط المائع يتغير بتغير سرعته، وافترض أن كثافة المائع تبقى ثابتة وهذا يتفق مع كون المائع غير قابل للانضغاط، كما أن معادلة برنولي تحقق قانون حفظ الطاقة، الذي ينص على أن مجموع الضغط والطاقة الحركية والطاقة الكامنة لوحدة الحجم يبقى ثابتاً في أي نقطتين على امتداد مسار المائع الانسيابي المثالي، ولتوضيح ذلك انظر الشكل (18-13)



الشكل (18-13)

يبين أن الشغل المنجز بواسطة القوى الضاغطة يساوي التغير في الطاقة خلال المنطقة المظللة

إنَّ قانون حفظ كمية الطاقة يؤدي إلى:

$$\Delta U = \Delta mg(y_2 - y_1) \quad \text{(التغيير في الطاقة الكامنة)}$$

$$\Delta K = \frac{1}{2}\Delta m(v_2^2 - v_1^2) \quad \text{(التغيير في الطاقة الحركية)}$$

$$W = \Delta U + \Delta K \quad \text{(الشغل)}$$

حيث إن (v_1, A_1, P_1) المبينة على الشكل (18-13) تمثل الضغط ومساحة المقطع وسرعة المائع عند النقطة الأولى، بينما تمثل (v_2, A_2, P_2) هذه المقادير عند النقطة الثانية، كما أن ارتفاع المساحة (A_1) عن المستوى الأفقي هو (y_1) وارتفاع المساحة (A_2) عن ذات المستوى الأفقي هو (y_2)، وتكون معادلة برنولي على هذا الأساس وبعد التعويض عن كثافة المائع $(\rho = \Delta m / \Delta V)$ نجد أن:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

وبشكل عام يمكن صياغتها على النحو الآتي:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = a \ \text{(مقدار ثابت)} \qquad (13\text{-}53)$$

وهي الصيغة العامة لمعادلة برنولي لمائع في الحالة الحركية، ومن الممكن استخدامها لإيجاد ضغط المائع الساكن عند نقطة مجهولة، وذلك بالتعويض في المعادلة $(13\text{-}53)$ عن $(v_1 = v_2)$ لنحصل على:

$$P_2 = P_1 + \rho g (y_1 - y_2) \qquad (13\text{-}54)$$

أما إذا كان المقدار $(y_1 - y_2)$ مساوياً للصفر، وهذا يعني أن السائل لا يعاني من أي ارتفاع، فإن المعادلة تؤول إلى الشكل الآتي:

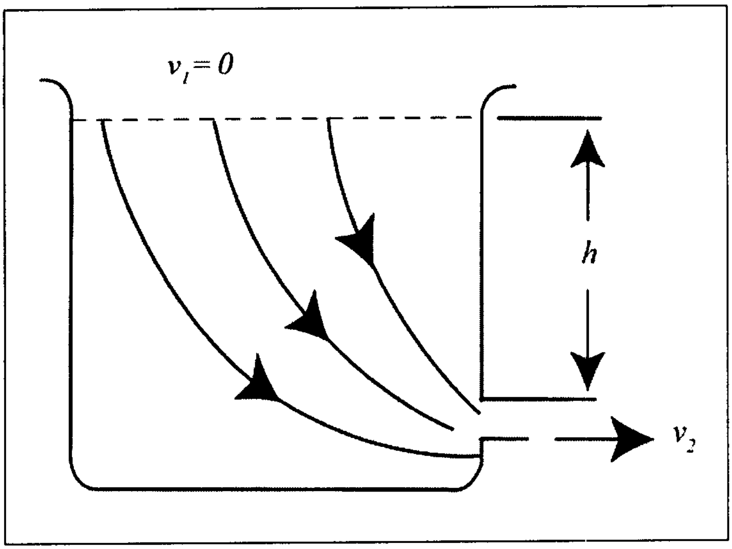
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad (13\text{-}55)$$

والتي تفسَّر على أن الزيادة في سرعة جزيئات المائع على طول خط مستقيم تؤدي إلى نقصان في ضغط المائع، والعكس صحيح.

مثال (13-25) *Example*

يتسرب الماء من فتحة صغيرة في أسفل خزان ماء كبير، انظر الشكل (13-19)، إذا كانت الفتحة تقع على عمق (h) داخل الخزان.

أوجد الصيغة الرياضية المعبِّرة عن سرعة تسرب الماء من الخزان.



الشكل (13-19)، المثال (13-25)

يتسرب الماء من فتحة الخزان، كما لو كان يسقط من ارتفاع (h)

الحل **Solution**:

بما أن الخزان كبير جداً، فإن السرعة الابتدائية على سطح الخزان سوف تكون مساوية للصفر، والضغط عند السطح وعند الفتحة التي يتسرب منها الماء هو عبارة عن الضغط الجوي، وهكذا نجد أن معادلة برنولي تأخذ الشكل الآتي:

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1$$

$$P_1 = P_2 = P$$

$$h_2 = h$$

$$h_1 = 0$$

$$v_1 = 0$$

$$\therefore \left(\frac{1}{2}\right)\rho v_2^2 = \rho g h$$

$$v_2 = \sqrt{2 g h}$$

مسائل وتمارين الفصل الثالث عشر

Chapter Thirteen Exercises & Problems

13-1 كتلة من الكحول الإيثيلي مقدارها $(19 \times 10^{-2}\ kg)$ إذا علمت أن حجمها يساوي $(24 \times 10^{-5}\ m^3)$.

أوجد حسابياً مقدار كل من:

أ- الكثافة.

ب- الكثافة النسبية للكحول الإيثيلي.

13-2 إذا علمت أنَّ الكثافة النسبية لرابع كلوريد الكربون تساوي (1.6).

أوجد حسابياً حجم كتلة منه يبلغ مقدارها $(20\ kg)$.

13-3 إذا علمت أنَّ الكثافة النسبية للألمنيوم تساوي (2.7).

أوجد حسابياً كتلة قطعة من الألمنيوم حجمها $(1.5\ m^3)$

13-4 إذا علمت أنَّ كتلة ذرة الهيدروجين تساوي $(1.66 \times 10^{-21}\ kg)$.

أوجد حسابياً عدد ذرات الهيدروجين في كتلة منه مقدارها $(2 \times 10^{-3}\ kg)$.

13-5 كرتين من النحاس كتلتيهما $(20\ kg)$ و$(30\ kg)$ على التوالي، تفصل بين مركزيهما مسافة مقدارها $(2\ m)$.

أوجد حسابياً مقدار قوة التجاذب بين الكرتين.

13-6 تعتبر الأرض على وجه التقريب كروية، نصف قطرها $(6.4 \times 10^6\ m)$.

أوجد حسابياً مقدار كتلة الأرض إذا علمت أن مقدار التعجيل الأرضي يساوي ($9.8\ m.s^{-2}$).

13-7 استخدم النتيجة التي حصلت عليها في المسألة (13-6) عن مقدار كتلة الأرض، وذلك لحساب قوة التجاذب بين الأرض والقمر إذا علمت أن مقدار كتلة القمر تساوي ($7.35 \times 10^{22}\ kg$)، ومقدار المسافة الفاصلة بينهما يساوي ($3.84 \times 10^{8}\ m$).

13-8 إذا علمت أنَّ كتلة ($1000\ cm^3$) من الحليب العادي تساوي ($1.032\ kg$)، وتبلغ نسبة الدهن فيه (4%) من حجمه الكلي.
أوجد حسابياً مقدار كثافة الحليب الخالي من الدهون إذا علمت أن كثافة المتر المكعب منه تساوي ($865\ kg.m^{-3}$).

13-9 قضيب من الحديد الصلب طوله يساوي ($2\ m$) مثبت من نهايته العليا بشكل عمودي، ومعلق في نهايته السفلى ثقل قدره ($1000\ N$).
أوجد حسابياً مقدار استطالة القضيب، إذا علمت أنَّ نصف قطره يساوي ($2.5 \times 10^{-3}\ m$)، ومعامل يونج للحديد الصلب يساوي ($2.2 \times 10^{11}\ N.m^{-2}$).

13-10 قضيب من الحديد على شكل أسطوانة دائرية نصف قطرها ($3 \times 10^{-3}\ m$)، مثبت من نهايته العليا، ومعلق في نهايته السفلى ثقل قدره ($3000\ N$) أدى إلى إحداث استطالة مقدارها ($0.5\ mm$).
أوجد حسابياً مقدار معامل يونج لهذا النوع من الحديد، إذا كان الطول الأصلي للقضيب يساوي ($3\ m$).

13-11 قضيب معدني مرن طوله يساوي $(8\ m)$، ومقدار نصف قطره يساوي $(2 \times 10^{-3}\ mm)$ مثبت من نهايته العليا، ومعلق في نهايته السفلى ثقل كتلته تساوي $(250\ kg)$، أحدث في القضيب استطالة مقدارها $(5\ mm)$.

أوجد حسابياً مقدار كلٍ من:

أ- الإجهاد.

ب- الانفعال.

ج- معامل يونج للمرونة.

13-12 إذا كان الارتفاع العمودي لجسم إنسان يساوي $(80 \times 10^{-2}\ m)$.

أوجد حسابياً مقدار الضغط اللازم كي يرتفع الدم من القلب إلى أعلى نقطة في الرأس، علماً بأن كثافة الدم تساوي $(1.2 \times 10^{-3}\ kg.m^{-3})$، اعتبر قوة الاحتكاك مهملة.

13-13 حوض من الماء على شكل أسطواني دائري، ارتفاعه يساوي $(5\ m)$، ونصف قطر قاعدته يساوي $(1.5\ m)$.

أوجد حسابياً مقدار كلٍ من:

أ- الضغط المؤثر على قعر الإناء.

ب- الضغط عند نقطة تبعد مسافة $(3\ m)$ عن سطح الخزان السفلي.

ج- القوة الكلية المؤثرة على قعر الخزان.

د- القوة المؤثرة عند نقطة تبعد $(3\ m)$ عن سطح الخزان السفلي.

13-14 خزان على شكل متوازي أضلاع، قاعدته مربعة الشكل طول ضلعها يساوي $(2\ m)$، يحتوي على كمية من الزئبق ارتفاعها عن سطح

الخزان السفلي يساوي $(50 \times 10^{-2}\ m)$، تليها كمية من الماء ارتفاعها عن سطح الزئبق العلوي يساوي $(80 \times 10^{-2}\ m)$.
أوجد حسابياً مقدار القوة المؤثرة على السطح السفلي للخزان.

13-15 وعاء مكعب الشكل طول ضلعه يساوي $(40 \times 10^{-2}\ m)$، يحتوي على غاز محصور بداخله يبلغ مقدار ضغطه $(6\ atm)$.
أوجد حسابياً محصلة القوة المؤثرة على جدار الوعاء، إذا علمت أن الضغط الخارجي يساوي $(1\ atm)$.
ملاحظة: $(1\ atm = 1.013 \times 10^{5}\ N / m^{2})$.

13-16 من المعروف أن عدد أفوكادرو يساوي $(N_A = 6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1})$.
أوجد حسابياً مقدار كلٍ من:
أ- عدد الجزيئات الموجودة في $(5\ mol)$ من غاز الهيدروجين.
ب- كتلة $(1\ mol)$ من غاز الهيدروجين.

13-17 جدار مقدار مساحته $(10\ m^{2})$ يخضع لتأثير ضغطين **جانبيين**، مقدار الأول منهما يساوي $(2\ atm)$ ومقدار الثاني يساوي $(3\ atm)$.
أوجد حسابياً مقدار القوة المؤثرة على هذا الجدار.

13-18 فقاعة من الهواء صعدت من قعر بحيرة إلى سطحها فازداد حجمها بمقدار ثماني مرات.
أوجد حسابياً عمق البحيرة إذا كان مقدار الضغط الجوي يساوي $(76.4\ mm\ Hg)$، علماً بأنَّ درجة حرارة الهواء داخل الفقاعة بقيت ثابتة.

13-19 إذا علمت أنَّ كثافة ماء البحر عند السطح تساوي $(1.02 \times 10^3\ kg\ m^3)$.
أوجد حسابياً مقدار كثافة ماء البحر عند القعر إذا كان مقدار الضغط يساوي $(10^8\ N.m^2)$.

13-20 جسم مقدار وزنه في الهواء يساوي $(20\ N)$، ومقدار وزنه في الماء يساوي $(15\ N)$، أما مقدار وزنه في المائع فيساوي $(1200\ N)$.
أوجد حسابياً مقدار كلٍ من:
أ- كثافة الجسم.
ب- كثافة المائع.

13-21 كرة مصنوعة من مادة الحديد مقدار كتلتها $(4\ kg)$، ومقدار كثافة الحديد تساوي $(7.79 \times 10^3\ kg.m^{-3})$، معلقة بسلك و مغمورة في مائع مقدار كثافته $(0.8 \times 10^3\ kg.m^{-3})$.
أوجد حسابياً مقدار قوة الشد في السلك.

13-22 رجل سباح يعوم في الماء بحيث يمكننا أن نعتبر جسمه مغموراً بشكل كامل.
أوجد حسابياً حجم هذا السباح إذا علمت أن وزنه يساوي $(700\ N)$.

13-23 علبة أسطوانية الشكل، تطفو عمودياً على سطح وعاء من الماء، مقدار قطرها يساوي $(16 \times 10^{-2}\ m)$ ومقدار ارتفاعها $(30 \times 10^{-2}\ m)$، وضعنا في داخلها وزن مقداره $(4\ N)$.

ما الذي تتوقع حدوثه الآن؟ هل سيزداد الجزء المغمور من العلبة داخل الماء أم سيقل؟ أوجد حسابياً مقدار ذلك.

13-24 رجل مقدار وزنه في الماء يساوي $(60\ N)$، يطفو في الماء على قطعة من الجليد.

أوجد حسابياً كلاً من كتلة وحجم قطعة الجليد.

13-25 سلك على شكل دائري مصنوع من مادة البلاتين طول محيطه يساوي $(16 \times 10^{-2}\ m)$ غُمر في وعاء من الكحول بشكل أفقي.

أوجد حسابياً مقدار التوتر السطحي (T_S) للكحول، إذا كانت القوة الإضافية الناشئة عن التوتر السطحي اللازمة لشد السلك خارج المائع تساوي $(7.72 \times 10^{-3}\ N)$.

13-26 يبلغ مقدار التوتر السطح لمحلول من الصابون $(32 \times 10^{-3}\ Nm^{-1})$.

أوجد حسابياً مقدار الشغل اللازم بذله لتكوين فقاعة كروية الشكل من هذا المحلول قطرها $(30 \times 10^{-2}\ m)$.

ملاحظة: مساحة الكرة تساوي $(4\pi r^2)$.

13-27 قضيب مصنوع من الزجاج مستقر بشكل عمودي على سطح وعاء من الماء.

أوجد حسابياً مقدار الشد الناتج عن التوتر السطحي المؤثر على قضيب الزجاج، إذا علمت أن نصف قطره يساوي $(2 \times 10^{-2}\ m)$، وأن مقدار التوتر السطحي للماء يساوي $(7.5 \times 10^{-4}\ N.m^{-1})$.

13-28 أنبوبة زجاجية شعرية، غُمر أحد طرفيها عمودياً في وعاء من الماء عند درجة حرارة الغرفة.

أوجد حسابياً مقدار ارتفاع الماء خلال الأنبوبة الشعرية إذا علمت أن نصف القطر الداخلي لها يساوي $(12 \times 10^{-3}\ m)$، وأن الشد السطحي للماء هو $(72 \times 10^{-3}\ N.m^{-1})$.

ملاحظة: درجة حرارة الغرفة تساوي $(20\ ^{\circ}C)$.

13-29 إذا كان مقدار الشد السطحي للبنزين يساوي $(289 \times 10^{-4}\ N.m^{-1})$.

أوجد حسابياً قطر الأنبوبة الشعرية التي يرتفع خلالها البنزين مسافة مقدارها $(40 \times 10^{-2}\ m)$، وذلك في درجة حرارة الغرفة، إذا كان مقدار زاوية التماس:

أ- يساوي صفر.

ب- يساوي (5°).

13-30 إذا علمت أنَّ كثافة غاز النيتروجين عند الشروط القياسية من ضغط ودرجة حرارة تساوي $(1.25\ kg.m^{-3})$.

أوجد متوسط مربع سرعة جزيئات غاز النيتروجين.

ملاحظة: عند الشروط القياسية يكون مقدار الضغط $(1.05 \times 10^{5}\ N.m^{-2})$ ومقدار درجة الحرارة $(20\ ^{\circ}C)$.

13-31 إذا علمت أنَّ مقدار متوسط طول المسار الحر لجزيئات غاز النيتروجين عند الشروط القياسية يساوي $(8 \times 10^{-3}\ m)$، وعدد جزيئاته عند هذه الظروف يساوي $(2.4 \times 10^{25}\ mol.m^{-3})$.

أوجد حسابياً مقدار قطر جزيء النيتروجين.

13-32 أوجد حسابياً مقدار السرعة النهائية لذرة من التراب مقدار نصف قطرها يساوي $(10^{-5}\ m)$، ومقدار كثافتها يساوي $(2 \times 10^{3}\ kg.m^{-3})$ وذلك في الهواء عند درجة الحرارة $(20\ ^{\circ}C)$.

13-33 نصف القطر الداخلي لشريان أحد الكلاب يساوي $(4 \times 10^{-3}\ m)$، حيث يتدفق الدم خلال هذا الشريان بمعدل $(10^{-6}\ m^{3}.s^{-1})$.

أوجد حسابياً مقدار كلٍ من:

أ- متوسط سرعة الدم وكذلك أقصى سرعة للدم خلال هذا الشريان.

ب- تغير الضغط خلال مسافة $(0.1\ m)$ على طول هذا الشريان.

13-34 خلال أنبوب نقل النفط الخام ذي مساحة المقطع الثابتة والمسار الأفقي ينخفض الضغط بمقدار $(5\ N.m^{-2})$ بين نقطتين فيه، مقدار المسافة بينهما $(1000\ m)$.

أوجد حسابياً مقدار الفقدان في الطاقة للمتر المكعب الواحد من النفط خلال المتر الواحد من المسافة.

13-35 ينساب الهواء فوق جناح الطائرة ذي المساحة (A) بسرعة (v_t) وينساب تحت الجناح بسرعة (v_u).

أثبت رياضياً أن المقدار (L) لقوة الدفع المسلطة على الجناح إلى الأعلى تساوي:

$$L = \frac{1}{2} \rho A (v_t^2 - v_u^2)$$

حيث (ρ) هي كثافة الهواء.

الخلاصة

Summary

- توجد المادة بصفة عامة على ثلاث حالات هي: الجامدة والسائلة والغازية، ومن الأهمية بمكان أن يتم التعرف على خصائص المادة الميكانيكية في أي من الحالات الثلاث قبل استخدامها في المجالات التطبيقية المختلفة، مثل: الكثافة، الوزن النوعي، تأثير القوى الخارجية عليها، تأثير الضغط، لزوجة المادة، مرونة المادة، انسيابيتها، إلى ما هنالك من خصائص أخرى.
- **كثافة المادة**: هي كتلة وحدة الحجوم وتقاس في النظام الدولي بوحدة الكيلو غرام لكل متر مكعب، وذلك عند درجة حرارة ثابتة، حيث تؤثر درجة الحرارة على كثافة المادة، ولا بد من أن نتذكر الحالة الخاصة للماء بين درجتي الحرارة $(0 - 4\,°C)$.
- **الكثافة النسبية**: هي النسبة بين كثافة المادة في الهواء وكثافة الماء عند درجة الحرارة $(3.8\,°C)$.
- **الوزن**: إنَّ وزن الجسم في أي نقطة في الفضاء هو محصلة قوى الجذب المسلطة عليه من باقي الأجسام الأخرى الموجودة في هذا الفضاء.
- **المرونة**: هي نزوع المادة للرجوع إلى حالتها الأولية عندما تزول القوة التي تؤثر فيها.

- **الإجهاد:** وهو كمية فيزيائية قياسية ناتج عن تأثير المركبة العمودية للقوة الخارجية على المسافة التي تؤثر فيها ويقاس بنفس وحدات الضغط (الباسكال)، ويكون الإجهاد طولياً أو قصياً (القوة موازية لسطح الجسم)، أو حجمياً.

- **الانفعال:** وهو كمية فيزيائية قياسية بدون وحدة، ناتج عن قسمة التغير الحادث في الأطوال أو الحجوم على الطول أو الحجم الأولي قبل تأثير القوة، ويكون مثل الإجهاد أيضاً، طولياً أو قصياً أو حجمياً.

- **معامل يونغ:** وهو تعبير عن مقدرة الجسم على مقاومة أو معاوقة التغير في الطول عند تأثير إجهاد طولي عليه، سواءً كان على شكل شد أو ضغط، ويقاس بوحدة الباسكال أيضاً في النظام الدولي للقياس.

- **ضغط المائع:** القوة العمودية التي يؤثر المائع بها على وحدة المساحة، يضاف إلى ذلك مقدار الضغط الجوي.

- **ضغط الغاز:** إن ضغط الغاز المثالي يمكننا أن نعبِّر عنه بواسطة قانون بويل، أما ضغط الغاز الحقيقي فإننا نحتاج إلى تطبيق معادلة فاندرولز لتحديده ومعرفة العوامل الإضافية المؤثرة عليه.

- **قاعدة أرخميدس:** عندما يتم غمر الجسم جزئياً أو كلياً في المائع، فإن الجسم يتعرض لقوة دفع من الأسفل إلى الأعلى تساوي وزن السائل المزاح، ويطلق على الفرق بين وزن الجسم وهذه القوة، قوة الطفو.

- **قاعدة باسكال:** الضغط المؤثر على سائل محصور ينقله السائل دون تغيير إلى جميع أجزائه الأخرى وإلى جدران الوعاء الذي يحتويه، ويستخدم هذا المبدأ في علم الهيدروليك.
- **قاعدة برنولي:** يتناسب ضغط المائع المتحرك تناسباً طردياً مع سرعته.
- **التوتر السطحي:** نزوع السائل إلى الانكماش إلى أقل مساحة ممكنة بسبب قوى التماسك بين جزيئات سطح السائل، والتي تبقى محصلتها جذباً نحو الداخل، وهذا ما يفسر ظهور سطح السائل على شكل غشاء.
- **معامل التوتر السطحي:** هو الشغل اللازم بذله لزيادة مساحة سطح السائل بمقدار وحدة المساحة.
- **الخاصية الشعرية:** ارتفاع أو انخفاض السوائل في الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة جداً قياساً إلى أبعاد الوعاء الذي يحتويها، إلى مستوى أعلى أو أقل من مستوى سطح السائل تبعاً لمحصلة قوتي التلاصق والتماسك.