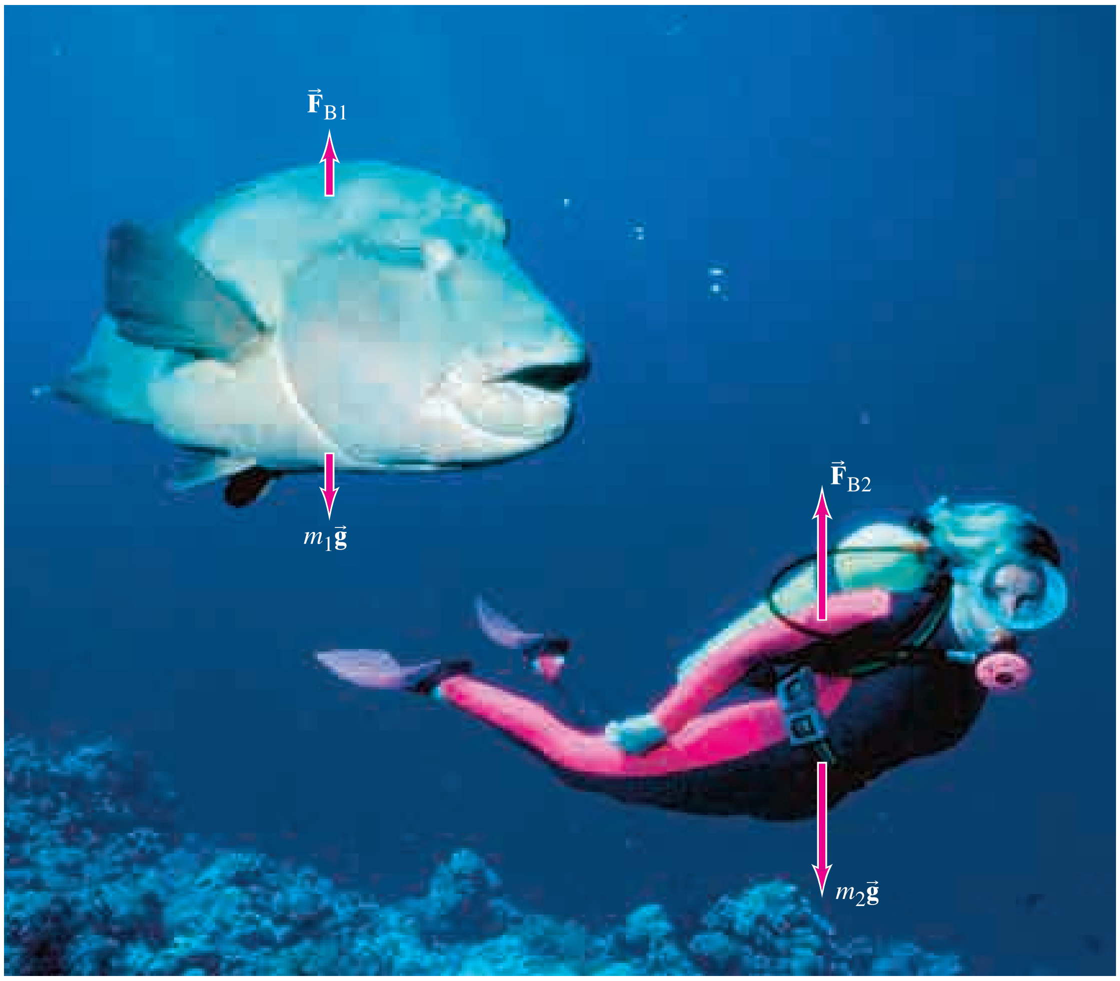



يتأثّر الغوّاصون المزوّدون بجهاز تنفس تحت الماء، وكذلك الأحياء البحرية بقوّة الطفو ($\vec{F}_B$) التي تعادل وزنها $m\vec{g}$. وتساوي هذه القوّة وزن حجم المائع المزاح (مبدأ أرخميدس). وتنشأ بسبب ازدياد الضغط مع العمق في المائع. إنّ الأحياء البحرية ذات كثافةٍ تساوي كثافة الماء تقريبًا. لذا، فإنّ وزنها يساوي قوّة الطفو نوعًا ما. إنّ كثافة الإنسان أقلّ من كثافة الماء، ولهذا فإنّه يستطيع الطفو. وعندما تتدفق الموائع، تحدث ظواهر مهمّة؛ لأنّ الضغط في المائع أقلّ حيثما تكون السرعة أكبر (مبدأ برنولي).

# الفصل 10

# الموائع

تحدثنا في فصول سابقةٍ عن أجسامٍ صُلبة تحافظ على شكلها، ويحدث فيها تغيّرٌ طفيفٌ مرن. وقد عاملنا الأجسام أحيانًا كجسيمات نقطيّة. والآن، سننقل اهتمامنا إلى مواد يتغيّر شكلها كثيرًا، وهي قابلة للجريان؛ إنّها "الموائع"، التي تتضمّن السوائل والغازات. وسندرس الموائع في حالة السكون (إستاتيكا الموائع) وفي حالة الحركة (ديناميكا الموائع).

## 1-10 حالات المادة

حالات المادة

للمادة إلى ثلاثة **أطوارٍ** أو **حالاتٍ** شائعة، هي: الصُلبة والسائلة والغازية. ويمكننا تمييز هذه الأطوار الثلاثة كما يلي: **الصُّلب** يحافظ على شكلٍ وحجمٍ ثابتين، حتى لو أثّرت فيه قوّةٌ كبيرة، فإنّها لا تغيّر شكله وحجمه بسهولة. أما **السائل** فلا يحتفظ بشكلٍ ثابت؛ بل إنّه يأخذ شكل الوعاء الذي يوضع فيه ، ولكن، وكما الجسم الصلب، فإنّ السائل لا ينضغط بسهولة، ولا يتغيّر حجمه إلّا تحت تأثير قوّةٍ كبيرة؛ فقط بتأثير قوّةٍ كبيرةٍ. في حين أنّ الغاز ليس له حجمٌ ثابتٌ ولا شكل ثابت أيضًا؛ بل يتمدّد ليملأ الوعاء الذي يحويه. فمثلًا، عند ضخّ الهواء في إطار السيارة، فإنّ الهواء لا ينساب جميعه ليملأ قاع الإطار كما يحدث في حالة السائل، إنّه ينتشر بحيث يملأ حجم الإطار كلّه. ولأنّ السوائل والغازات لا تملك شكلًا ثابتًا، فإنّها تملك القدرة على الجريان (الانسياب)، ولهذا تُدعى معًا **بالموائع**.

إنّ تقسيم المادة إلى ثلاثة أقسام ليس سهلًا دائمًا، ومثال ذلك كيفيّة تصنيف الزبدة. كما أنّ هناك طورًا رابعًا يمكن تمييزه، ألا وهو طور **البلازما**، الذي يحدث عند درجات حرارة عالية، وتتكون من ذرات متأينة (إلكترونات منفصلة عن أنويتها). ويعتقد بعض العلماء أنّ ما يُسمّى بالغرويات (جسيمات دقيقة معلّقة في السائل) يمكن اعتبارها حالةً منفصلةً للمادة. وتُعدّ **البلورات السائلة** التي تُستخدم في شاشات الحاسوب المحمولة، والآلات الحاسبة، والساعات الرقمية، حالةً من المادة بين الصُّلب والسائل. وعلى أيّ حال، فإنّنا لأهدافنا الحالية، سنهتمّ بصورةٍ رئيسةٍ بالحالات الثلاث الشائعة للمادة.

## 2-10 الكثافة والجاذبية النوعية

يُقال أحيانًا إنّ الحديد " أثقل" من الخشب. وهذا ليس صحيحًا؛ لأنّ جذعًا كبيرًا من الخشب أثقل من مسمارٍ من الحديد. لذا، علينا القول بأنّ الحديد أكثر كثافةً من الخشب.

تعريف الكثافة

**الكثافة**، $\rho$ ، لمادة ما ( $\rho$ هي الحرف الصغير اليوناني rho) تُعرّف بأنّها كتلة وحدة الحجم من تلك المادة.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \textbf{(1-10)}$$

حيث $m$ هي الكتلة لعيّنةٍ من المادة، و $V$ حجمها. والكثافة هي خاصيّةٌ مميزةٌ لأيّ مادةٍ نقية. الأجسام المصنوعة من مادةٍ معيّنةٍ نقيّة، مثل الذهب الخالص، يمكنها أن تأخذ أيّ حجم وأيّ شكل، ولكن ستبقى الكثافة نفسها دائمًا. (نستعمل أحيانًا مفهوم الكثافة ، المعادلة (1-10)، لكتابة كتلة الجسم بصورة $m = \rho V$، ووزن الجسم، $mg$، بصورة $\rho V g$ ).

الوحدة الدولية SI للكثافة هي $kg/m^3$. وأحيانا تعطى الكثافة بـ$g/cm^3$. لاحظ أن $1\,kg/m^3 = 1000\,g/(100\,cm)^3 = 10^3\,g/10^6\,cm^3 = 10^{-3}\,g/cm^3$ ولاعطاء الكثافة على صورة $g/cm^3$ لذلك يجب ضرب الكثافة $g/cm^3$ في 1000 للحصول على قيمة الكثافة $kg/m^3$. فمثلاً كثافة الألمنيوم $\rho = 2.70\,g/cm^3$، وهي تساوي $2700\,kg/m^3$. يبين (الجدول 1-10)كثافة مجموعة من المواد. كما أنّ القائمة تحدد درجة الحرارة والضغط لأنّهما عاملان يؤثران في كثافة المواد (رغم أنّ أثرها طفيف في السوائل والمواد الصُّلبة).

**الجدول 10 - 1 كثافة بعض المواد** *

| المادة | الكثافة $\rho\ (kg/m^3)$ |
|---|---|
| **المواد الصلبة** | |
| ألمنيوم | $2.70\times10^3$ |
| حديد وفولاذ | $7.8\times10^3$ |
| نحاس | $8.9\times10^3$ |
| رصاص | $11.3\times10^3$ |
| ذهب | $19.3\times10^3$ |
| أسمنت | $2.3\times10^3$ |
| رخام | $2.7\times10^3$ |
| خشب | $0.3\text{-}0.9\times10^3$ |
| زجاج (عادي) | $2.4\text{-}2.8\times10^3$ |
| جليد $(H_2O)$ | $0.917\times10^3$ |
| عظام | $1.7\text{-}2.0\times10^3$ |
| **السوائل** | |
| ماء $(4^\circ C)$ | $1.00\times10^3$ |
| دم (بلازما) | $1.03\times10^3$ |
| دم (عام) | $1.05\times10^3$ |
| ماء البحر | $1.025\times10^3$ |
| زئبق | $13.6\times10^3$ |
| كحول/إثيايل | $0.79\times10^3$ |
| غازولين | $0.68\times10^3$ |
| **الغازات** | |
| هواء | 1.29 |
| هيليوم | 0.179 |
| ثاني أكسيد الكربون | 1.98 |
| ماء (بخار) $(100^\circ C)$ | 0.598 |

* الكثافات تعطى عند $0^\circ C$ و 1 atm ما لم يذكر غير ذلك.

**المثال 1-10 الحجم، والكثافة معلومان**

ما كتلة كرةٍ حديديَّةٍ صُلبة نصف قطرها 18 cm؟

**النّهج**: نستعمل أولًا الصيغة المشهورة $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ (انظر داخل الغلاف الخلفي) لحساب حجم الكرة. ثم (المعادلة 1-10 والجدول 1-10)لتعطينا الكتلة $m$.

**الحل**: حجم الكرة هو:

$$V = \tfrac{4}{3}\pi r^3 = \tfrac{4}{3}(3.14)(0.18\,m)^3 = 0.024\,m^3.$$

من (الجدول 1-10) ، كثافة الحديد $\rho = 7800\,kg/m^3$. لذلك، (المعادلة 1-10) تعطي

$$m = \rho V = (7800\,kg/m^3)(0.024\,m^3) = 190\,kg.$$

تُعرّف **الجاذبيّة النوعيّة** لمادةٍ ما كنسبة كثافة المادة إلى كثافة الماء عند $4.0^\circ C$. ولأنّ الجاذبيّة النوعيّة نسبةً، لذلك، فهي مجرّد عددٍ من غير أبعاد أو وحدات. كثافة الماء هي $1.00\,g/cm^3 = 1.00\times10^3\,kg/m^3$. لذلك، فإنّ الجاذبيّة النوعيّة $(SG)$ لأيّ مادة تساوي عدديًّا كثافته بـ $g/cm^3$ أو $10^{-3}$ مضروبةً في كثافته بـ$kg/m^3$ . مثلًا (انظر الجدول 1-10) الجاذبيّة النوعيّة للرصاص هي 11.3، وللكحول 0.79.

مبدأ الكثافة أو الجاذبيّة النوعيّة تفيدنا خاصّةٍ عند دراسة الموائع؛ لأنّنا نتعامل دائمًا مع حجمٍ ثابتٍ أو كتلةٍ ثابتة.

## 3-10 الضغط في الموائع

يعرف **الضغط** بأنّه القوّة لكلّ وحدة مساحة؛ حيث يُفهم من القوّة $F$ أنّها مقدار القوّة المؤثّرة عموديًّا في مساحة السطح $A$

تعريف الضغط.

$$\text{الضغط} = P = \frac{F}{A} \qquad \textbf{(2-10)}$$

**تنويه:** الضغط كمية قياسية وليست متجهة.

وعلى الرغم من أنّ القوّة كميّةٌ متجهة، فإنّ الضغط كميّةٌ قياسية، فالضغط له مقدارٌ فقط. الوحدة الدوليّة للضغط هي $N/m^2$، ويُطلق على هذه الوحدة اسم **باسكال** (Pa) تكريمًا للعالِم بليز باسكال (انظر البند 10-5)؛ حيث $1pa=1N/m^2$ . وعلى أيّ حال، فسنستعمل $N/m^2$. وهناك وحداتٌ أخرى تُستعمل عادةً، مثل $dyne/cm^2$ , $1b/in^2$(تختصر psi). وهناك وحداتٌ أخرى متعدّدةٌ للضغط، مع تحويلاتها، ستناقش في (البند 10-6) (انظر كذلك القائمة داخل الغلاف الأمامي للكتاب).

### المثال 10-2 حساب الضغط

قدما فتاةٍ كتلتها 60-kg تغطّيان مساحةً قدرها $500\ cm^2$. (أ) احسب الضغط الذي تبذله القدمان على الأرض.(ب) إذا وقفت هذه الفتاة على قدمٍ واحدة، فماذا سيكون الضغط تحت هذه القدم؟

**النّهج:** افرض أنّ هذه الفتاة في حالة سكون. الأرض تدفع للأعلى على قدمها بقوّةٍ تساوي وزنها $mg$، وهي تؤثّر بقوّة $mg$ في الأرض؛ حيث القدم هي وسيلة الاتصال. ولأنّ $1\ cm^2 = (10^{-2}\ m)^2$ فإنّ $500\ cm^2 = 0.050\ m^2$.

**الحلّ:** (أ) الضغط على الأرض الناجم عن القدمين هو

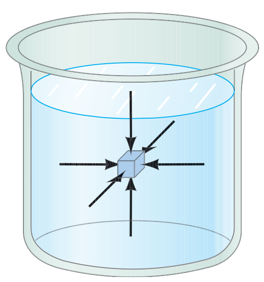
$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{(60\ kg)(9.8\ m/s^2)}{(0.050\ m^2)} = 12 \times 10^3\ N/m^2.$$

(ب) إذا وقفت الفتاة على قدمٍ واحدة، فإنّ القوّة لا تزال تساوي وزنها، ولكن المساحة سوف تساوي نصف المساحة الأولى، ولذلك سيكون الضغط ضعف الضغط المحسوب في (أ): $24 \times 10^3\ N/m^2$.

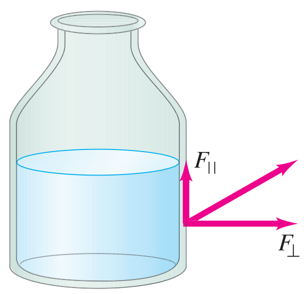
الموائع تنتج ضغطا في الاتجاهات جميعها.

إنّ الضغط مفيد، خاصّةً عند التعامل مع الموائع. وهناك مشاهداتٌ واقعيّةٌ في أنّ المائع ينتج ضغطًا في الاتّجاهات جميعها؛ وهذا معروفٌ جيدًا للسبّاحين والغوّاصين الذين يشعرون بضغط الماء على جميع أجزاء أجسامهم عند عمقٍ معيّن. وهذا موضّحٌ في (الشكل 10-1). اعتبر مكعبًا صغيرًا من الماء بحيث يمكن إهمال تأثير الجاذبيّة فيه. الضغط على أحد جوانبه يساوي الضغط على الوجه المقابل. ولو كان هذا غير صحيح، فستكون هناك قوّةٌ محصّلةٌ على المكعب، وسوف يبدأ بالحركة. وإذا لم يكن المائع جاريًا، فإنّ الضغوط يجب أن تكون متساوية.

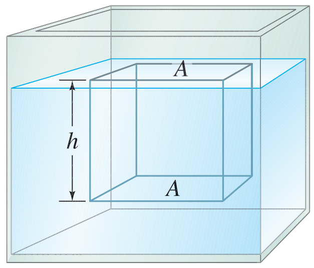
وهنالك خاصيّةٌ أخرى مهمّةٌ للموائع الساكنة، وهي أنّ القوّة الناجّة من ضغط المائع على أيّ سطحٍ صُلبٍ في تماسٍّ معها، تكون عموديّةً عليه. لو كانت هناك مركبةٌ لهذه القوّة موازيةٌ للسطح، كما هو مبيّن في (الشكل 10 - 2) ، فإنّ السطح، حسب قانون نيوتن الثالث، يولّد قوّةً على المائع، مّا يسبّب جريان المائع. وهذا يتضارب مع فرضنا بأنّ المائع ساكن. وعليه، فإنّ القوّة الناجّة من الضغط في المائع الساكن تكون دائمًا عموديّةً على السطح.



**الشكل 10-1** الضغط متساو في كلّ اتجاه داخل المائع عند أيّ عمق، ولو لم يكن الأمر كذلك، فإنّ المائع سيكون متحركا.




**الشكل 10-2** لو كانت هناك مركبة قوّة موازية للسطح الصلب للوعاء، فإنّ السائل سوف يتحرك استجابة لذلك. للسائل الساكن $F_{||} = 0$.




**الشكل 3-10** حساب الضغط عند عمق $h$ داخل سائل.

تغير الضغط مع العمق

دعنا الآن نحسب كميًّا كيفيّة تغيّر الضغط في المائع الساكن مع العمق. افترض نقطةً على عمق $h$ تحت سطح السائل (أي أنّ السطح على ارتفاع $h$ فوق هذه النقطة)، كما هو مبيّن في (الشكل 3-10). الضغط الناتج من السائل عند هذا العمق $h$ يعود إلى وزن عمود السائل فوقه. لذا، فإنّ القوّة الناتجة من وزن السائل التي تؤثّر في المساحة $A$ هي $F=mg=(\rho V)g=\rho Ahg$.
حيث $Ah$ حجم عمود السائل، أمّا $\rho$ فهي كثافة السائل (بفرض أنّها ثابتة)، في حين يشير $g$ إلى تسارع الجاذبيّة. الضغط $P$ بسبب وزن السائل يساوي

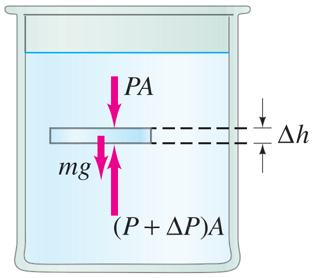
$$P = \frac{F}{A} = \frac{\rho Ahg}{A}$$

$$P = \rho gh. \qquad \text{[سائل]} \quad (\text{3-10أ})$$

لاحظ أنّ المساحة $A$ لا تؤثّر في الضغط عند عمقٍ معيّن. ويتناسب ضغط المائع طرديًّا مع كثافة السائل والعمق داخله. وعلى نحوٍ عام، فإنّ الضغط عند أعماقٍ متساويةٍ داخل السائل المنتظم يكون متساويًا. (المعادلة 3-10أ)مفيدة للغاية. إنّها تنطبق على الموائع التي كثافتها ثابتةٌ ولا تتغيّر مع العمق- أي أنّ المائع غير قابلٍ للانضغاط. ويُعدّ هذا تقريبًا جيّدًا للسوائل. (رغم أنّه على أعماقٍ كبيرةٍ في المحيطات، تزداد كثافة الماء بوضوح بالانضغاط الناتج من الوزن الكبير للماء فوقه).

أمّا الغازات، فهي قابلةٌ جدًا للانضغاط، وتتغيّر كثافتها بصورةٍ مهمّةٍ مع العمق بهذه الحالة الشاملة، التي تتغيّر فيها $\rho$، فإنّ (المعادلة 3-10أ) قد لا تكون مفيدة. لذلك دعنا نجرّب شريحةً رقيقةً من السائل حجمها $V = A\,\Delta h$ كما هو مبيّن في (الشكل 4-10) . نختار $\Delta h$ رقيقة لدرجة أنّ $\rho$ لا تتغيّر بصورةٍ مهمّةٍ مع هذا السمك القليل $\Delta h$. افرض أنّ $P$ هو الضغط المؤثّر للأسفل في السطح الأعلى، وافرض كذلك أنّ $P + \Delta P$ هو الضغط للأعلى على السطح الأسفل. القوّة المؤثّرة في شريحتنا الرقيقة هي $(P + \Delta P)A$ نحو الأعلى، و$PA$ للأسفل، ووزن الشريحة للأسفل $mg = (\rho V)g = \rho A\,\Delta h\,g$. ونفرض أنّ السائل ساكن. وعليه، فإنّ القوّة المحصّلة على الشريحة تساوي صفرًا.
وبالتالي:

$$(P + \Delta P)A - PA - \rho A\,\Delta h\,g = 0.$$




**الشكل 4-10** القوى على شريحة رقيقة من المائع (مبينة مثل سائل، ولكن قد تكون غازًا)

تختصر المساحة من كلّ حدّ، وعندما نحلّ لإيجاد $\Delta P$ نحصل على

التغير في الضغط مع تغير العمق في مائع.

$$\Delta P = \rho g\,\Delta h \qquad [\rho \approx \text{ثابت مع تغيّر العمق } \Delta h] \qquad (\text{3-10 ب})$$

تخبرنا (المعادلة 3-10ب) كيف يتغيّر الضغط مع تغيّرٍ طفيفٍ في العمق داخل المائع $(\Delta h)$ ، حتى لو كان قابلًا للانضغاط.

## المثال 3-10 الضغط عند الصنبور

يرتفع سطح الماء في الخزان 30 m عن صنبور الماء في المطبخ (الشكل 10 - 5). احسب الفرق في ضغط الماء بين الصنبور وسطح الماء في الخزان.

**النّهج:** عمليًّا، الماء غير قابلٍ للانضغاط، لذلك نفترض $\rho$ ثابتةً حتى مع ارتفاع $\Delta h$=30 m. وما يهمّنا هو $\Delta h$ فقط ، ويمكننا إهمال مسار أنبوب الماء وانحناءاته.

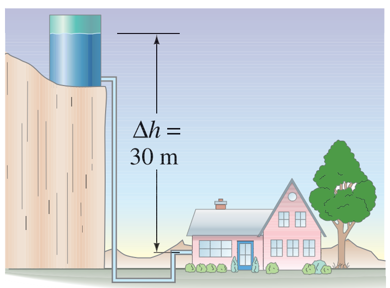
**الحلّ:** الضغط الجوّيّ نفسه يؤثّر عند سطح الماء في الخزّان والماء عند الصنبور. كذلك فإنّ فرق ضغط الماء بين الصنبور والسطح في الخزان هو

$$\begin{aligned}\Delta P = \rho g\,\Delta h &= (1.0 \times 10^3\,\mathrm{kg/m^3})(9.8\,\mathrm{m/s^2})(30\,\mathrm{m})\\ &= 2.9 \times 10^5\,\mathrm{N/m^2}.\end{aligned}$$

**ملحوظة:** أحيانًا، يُسمّى الارتفاع $h$ **رأس الضغط**. في هذا المثال، رأس الماء هو 30 m عند الصنبور. والاختلاف في قطر الخزان والصنبور لا يؤثّر في النتيجة: الضغط هو الذي يؤثّر فقط.

**تطبيق الفيزياء**
التزويد بالماء.

**الشكل 5-10** (المثال 3-10)




**التمرين** أ: سدّ يحفظ ماء بحيرةٍ عمقها عند السّدّ 85 m. إذا كان طول البحيرة 20 km، فكم يجب أن يكون سمك السّدّ لو كان طولها أصغر، فقط 1.0 km؟

## 4-10 الضغط الجوي والضغط المقيس

### الضغط الجوي

يتغير ضغط الجوّ الأرضي، كما في أيّ مائعٍ مع العمق. ولكن جوّ الأرض معقّدٌ بعض الشيء؛ إذ لا تتغير كثافة الهواء مع الارتفاع فقط، بل لا يوجد سطحٌ علويٌّ محدّدٌ يمكن قياس $h$ (معادلة 10-3أ) على أساسه. لكننا نستطيع حساب الفرق في الضغط بين ارتفاعين باستعمال المعادلة (10-3ب).

إنّ ضغط الهواء في مكانٍ ما يتغيّر قليلًا تبعًا للظروف الجوّيّة؛ فعند سطح البحر، الضغط الجوّيّ المتوسّط يساوي $1.013 \times 10^5\ \mathrm{N/m^2}$ (أو $14.7\ \mathrm{lb/in.^2}$). هذه القيمة تعطينا وحدةً تُستعمل عادةً للضغط، **الضغط الجوي** (باختصار atm):

ضغط جوي واحد (وحدة الضغط)

$$1\ \mathrm{atm} = 1.013 \times 10^5\ \mathrm{N/m^2} = 101.3\ \mathrm{kPa}.$$

وهناك وحدةٌ أخرى للضغط تُستعمل أحيانًا (في التنبُّؤات الجوّيّة وخرائط الطقس) وهي **البار bar** ، الذي يُعرّف كما يلي:

البار (وحدة ضغط)

$$1\ \mathrm{bar} = 1.00 \times 10^5\ \mathrm{N/m^2}.$$

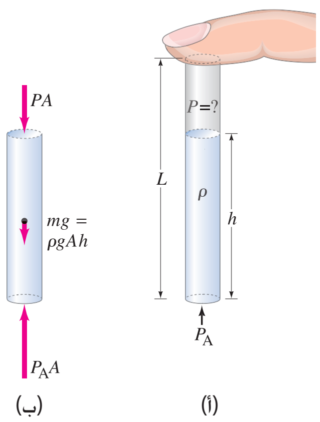
وهكذا، فإنّ الضغط الجوّيّ المعياريّ أكبر بقليلٍ من 1 bar. يؤثّر الضغط الناتج من وزن الغلاف الجوّيّ في الأجسام المغمورة كلّها في هذا البحر الهائل من الهواء، بما في ذلك أجسامنا. كيف يستطيع جسم الإنسان تحمّل الضغط الكبير على سطحه؟ الحلّ هو أنّ الخلايا الحيّة تنتج ضغطًا داخليًّا يساوي الضغط الخارجيَّ تقريبًا، كما هو الحال في أنّ الضغط داخل بالون يتلاءم مع الضغط الجوّيّ الخارجي. كما أنّ إطار السيّارة ينتج ضغطًا داخليًّا أكبر بكثيرٍ من الضغط الخارجيّ بسبب متانته.

تطبيق الفيزياء
الضغط على الخلايا الحية.

### المثال المفاهيمي 4-10 الإصبع يبقي الماء داخل القشّة

أدخل قشّةً طولها $L$ في قنينةٍ طويلةٍ من الماء. ضع إصبعك على أعلى القشّة لتحجز بعض الهواء فوق الماء، ولتمنع دخول هواءٍ إضافيٍّ أو خروجه ، ومن ثمّ ارفع القشّة من الماء. ستلاحظ أنّ القشّة تحتفظ بمعظم الماء. (انظر الشكل 6-10 أ). هل للهواء المحصور بين إصبعك وسطح الماء في الأنبوب ضغط $P$ أكبر، أم أقلّ، أم أنّه يساوي الضغط الجوّيّ $P_A$ خارج القشّة؟

**الإجابة:** افترض القوى على عمود الماء (الشكل 6-10 ب). إنّ الضغط الجوّيّ خارج الأنبوبة يدفع السطح الأسفل للماء إلى الأعلى، في حين تسحب الجاذبيّة الماء إلى الأسفل، أمّا ضغط الهواء داخل الجزء الأعلى للقشّة فيدفع الماء إلى الأسفل. وبما أنّ الماء في حالة اتزان، فإنّ القوّة إلى الأعلى بسبب الضغط الجوّيّ تعادل القوّتين للأسفل. إنّ الطريقة الوحيدة لذلك هو أنّ ضغط الهواء في الداخل يكون أقلّ من الضغط الجوّيّ خارج القشّة. (عندما تزيل القشّة في البداية، قد ينساب جزءٌ قليلٌ من الماء خارجها، وبذلك يزيد حجم الغاز المحصور داخلها. وهكذا سيقلّ ضغط كثافته).




الشكل **6-10** (المثال 4-10)

### الضغط المقيس

الضغط المقيس

من المهمّ ملاحظة أنّ أقيسة الضغط في الإطارات، ومعظم مقاييس الضغط الأخرى، تسجّل الضغط الذي يزيد على الضغط الجوي. ويُسمّى هذا **الضغط المقيس**. وللحصول على **الضغط المطلق (الكلي)**، $P$؛ علينا إضافة الضغط الجوي ، $P_A$، إلى الضغط المقيس، $P_G$:

الضغط الكلي = الضغط الجوي + الضغط المقيس

$$P = P_A + P_G.$$

إذا سجّل مقياس ضغط الإطارات 220 kpa، فإنّ الضغط المطلق داخل الإطار هو $220\ \mathrm{kPa} + 101\ \mathrm{kPa} = 321\ \mathrm{kPa}$، وهذا يكافيء 3.2 atm تقريبًا ( 2.2 atm الضغط المقيس ).

## 5-10 مبدأ باسكال

يبذل غلاف الجوّ الأرضيّ ضغطًا على الأشياء جميعها التي على اتصال به، بما في ذلك الموائع الأخرى. وينتقل الضغط الخارجيّ المؤثّر في المائع عبر ذلك المائع. فمثلا، حسب (المعادلة 3-10أ)، الضغط الناجِم من الماء على عمق 100 m تحت سطح البحيرة هو $P = \rho g \,\Delta h = (1000\,\mathrm{kg/m^3})(9.8\,\mathrm{m/s^2})(100\,\mathrm{m}) = 9.8 \times 10^5\,\mathrm{N/m^2}$ أو 9.7 atm. لكن الضغط الكلّيّ عند هذه النقطة يعود للضغط الناجِم من عمود الماء بالإضافة إلى الهواء فوقه. وعليه، فإنّ الضغط الناجِم (إذا كانت البحيرة قريبة من مستوى سطح البحر) يساوي $9.7\,\mathrm{atm} + 1.0\,\mathrm{atm} = 10.7\,\mathrm{atm}$. ويُعدّ هذا مجرّد مثالٍ واحدٍ على مبدأٍ عامٍّ يعود الفضل فيه إلى الفيلسوف والعالِم الفرنسي بليز باسكال (1623 – 1662). وينصّ *مبدأ باسكال على أنّه إذا أثّر ضغط خارجيّ في مائعٍ محصورٍ، فإنّ الضّغط عند أيّ نقطةٍ داخل المائع سوف يزداد بالمقدار نفسه من الضّغط.*

مبدأ باسكال

تطبيق الفيزياء

الرافعة الهيدروليكية

هناك عددٌ من الأدوات العمليّة تستفيد من مبدأ باسكال. أحد الأمثلة على ذلك الرافعة الهيدروليكيّة المبيّنة في (الشكل 7-10أ)، حيث تُستعمل قوّة صغيرةٌ للحصول على قوّةٍ ناتجةٍ كبيرة، وذلك بجعل مساحة مكبس الخرج أكبر من مساحة مكبس الدخل. ولرؤية كيفية عمل ذلك، نفرض أنّ مكبس الدخل والخرج في الارتفاع نفسه (تقريبًا). ثمّ تزيد قوّة الدخل $F_{in}$، وحسب مبدأ باسكال، الضغط بالتساوي خلال المائع. لذلك، عند المستوى نفسه (انظر الشكل 7-10أ).

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}}$$

ولكن $P = F/A$. لذلك، نكتب علاقة التساوي السابقة

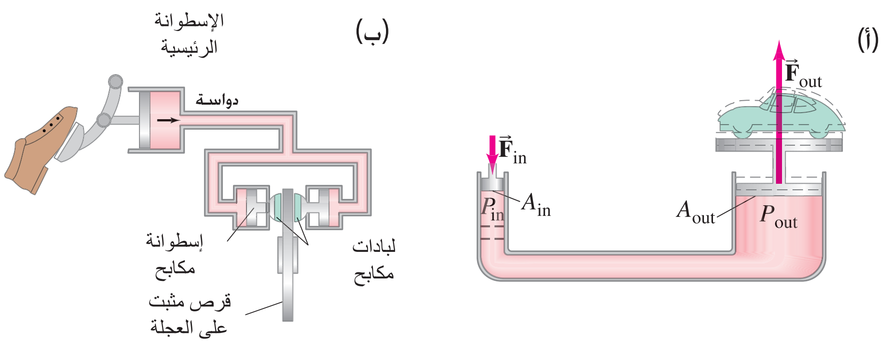
$$\frac{F_{\text{out}}}{A_{\text{out}}} = \frac{F_{\text{in}}}{A_{\text{in}}}$$

أو

$$\frac{F_{\text{out}}}{F_{\text{in}}} = \frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}$$

تُسمّى الكميّة $F_{\text{out}}/F_{\text{in}}$ الفائدة الآليّة للرافعة الهيدروليكيّة، وتساوي النسبة بين المساحتين. مثلًا، لو كانت مساحة مكبس الخرج أكبر 20 مرّةً من مساحة مكبس الدخل، فإنّ القوّة تضرب في معامل 20. أي أنّ قوّة 200 lb ترفع سيارة وزنها 4000-lb.

الفائدة الآلية




**الشكل 7-10** تطبيق مبدأ باسكال: (أ) الرافعة الهيدرولكية. (ب) المكابح الهيدروليكية في السيارة.

تطبيق الفيزياء

مكابح السيارة

يوضّح (الشكل 7-10 ب) نظام المكابح في السيارة. عندما يضغط السائق دوّاسة المكابح، يزيد الضغط في الأسطوانة الرئيسة. هذه الزيادة في الضغط تنتقل عبر سائل المكابح، وهكذا تدفع لبّادات المكابح لتضغط على قرصٍ مثبتٍ على العجلات.

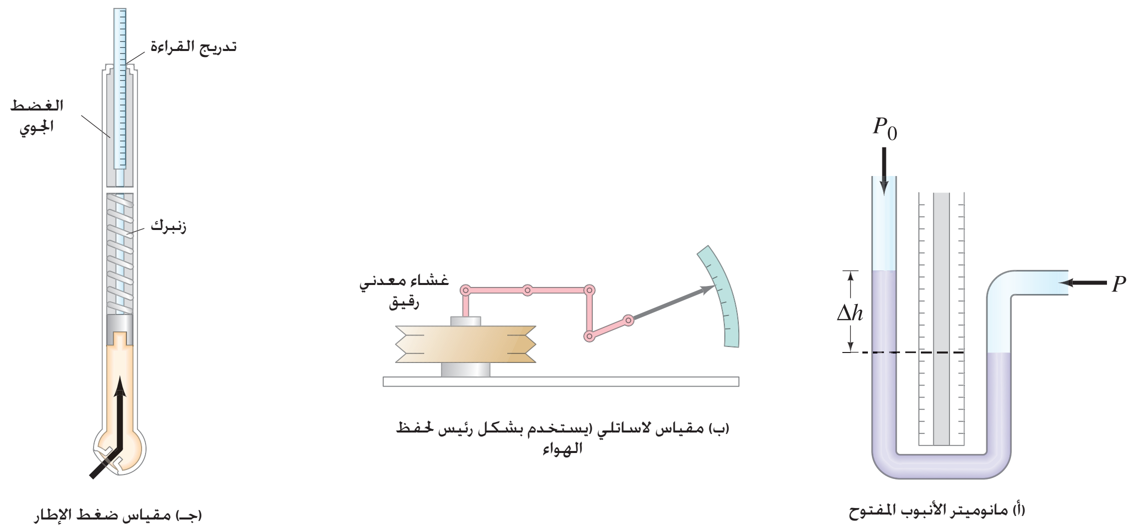
## 6-10 قياس الضغط، المقاييس والباروميتر

تمّ اختراع الكثير من الأدوات لقياس الضغط، بعضها مبيّن في (الشكل 8-10). أبسط هذه الأدوات هو مانوميتر الأنبوب المفتوح (الشكل 8-10 أ)، وهو أنبوبٌ بشكل حرف U يُملأ جزئيًّا بسائل الزئبق أو الماء عادة. يرتبط الضغط المقيس $P$ عادة (بالمعادلة 3-10 ب) بالفرق في الارتفاع $\Delta h$ بين مستويي السائل

المانوميتر

$$P = P_0 + \rho g \,\Delta h \tag{3-10جـ}$$

الضغط تحت سطح سائل معرض للضغط الجوي.




**الشكل 8-10** مقاييس الضغط: (أ) مانوميتر الأنبوب المفتوح. (ب) مقياس لاسائلي. (جـ) مقياس ضغط الإطارات المعتاد.

حيث $P_0$ هو الضغط الجوّيّ (يؤثّر في سطح السائل في الأنبوب الأيسر)، و$\rho$ هي كثافة السائل. لاحظ أنّ الكميّة $\rho g\,\Delta h$ هي الضغط المقيس – المقدار الذي يزيد به الضغط $P$ على الضغط الجوّيّ $P_0$. لو كان السائل في الأنبوب الأيسر أخفض من الأنبوب الأيمن، فإنّ $P$ تكون أقلّ من الضغط الجوّيّ ($\Delta h$ ستكون سالبة).

أحيانًا، بدلًا من حساب حاصل الضرب $\rho g\,\Delta h$، فإنّه يكفي تحديد التغيّر في الارتفاع $\Delta h$. وفي الواقع، يُقاس الضغط أحيانًا بإعطاء كم ملمتر زئبق (mm-$H_2O$) أو "ملمتر من الماء" (mm-$H_2O$). الوحدة mm-Hg تعادل ضغطًا $133\ N/m^2$، لأنّ $\rho g\,\Delta h$ التي تقابل 1mm = 1.0 * 10^-3 m من الزئبق تعطي

$$\rho g\,\Delta h = (13.6\times10^3\ kg/m^3)(9.80\ m/s^2)(1.00\times10^{-3}\ m) = 1.33\times10^2\ N/m^2$$

الـ *torr* (وحدة ضغط)

الوحدة mm-Hg تُسمّى كذلك "*torr*" تكريمًا للعالِم تورشللي (1608 - 1647)، الذي كان تلميذًا لجاليليو الذي اخترع البارومتر (انظر لاحقًا). معاملات التحويل بين الوحدات المختلفة للضغط معروضةٌ في (الجدول 2-10). ومن المهمّ أنّ وحدة $Pa = N/m^2$ هي الوحدة الدوليّة *SI* المستخدمة في الحسابات.

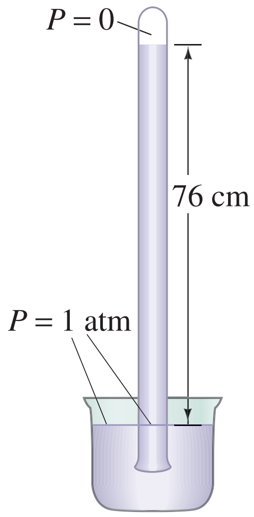
حل المسألة

إستخدام الوحدات العالمية SI في الحسابات $1\ Pa = 1\ N/m^2$

نوعٌ آخر من المقاييس هو اللاسائلي (الشكل 8-10ب): حيث يتصل المؤشّر مع طرف أنبوبٍ معدنيٍّ رقيقٍ مفرغٍ من الهواء. وفي المقياس الإلكتروني، يؤثّر الضغط في غشاءٍ معدنيٍّ رقيق؛ حيث تتمّ ترجمة تشوّهه إلى إشارةٍ كهربائيّةٍ عن طريق محوّلٍ للطّاقة. كيفيّة بناء مقياس ضغط الإطارات العادي مبينة في (الشكل 8-10جـ) .

**الجدول 2-10 معاملات التحويل بين الوحدات المختلفة للضغط**

| بدلالة $Pa = 1N/m^2$ | بالوحدات المختلفة 1amt |
|---|---|
| $1\ atm = 1.013\times10^5\ N/m^2$ | $1\ atm = 1.013\times10^5\ N/m^2$ |
| $= 1.013\times10^5\ Pa = 101.3\ kPa$ | |
| $1\ bar = 1.000\times10^5\ N/m^2$ | $1\ atm = 1.013\ bar$ |
| $1\ dyne/cm^2 = 0.1\ N/m^2$ | $1\ atm = 1.013\times10^6\ dyne/cm^2$ |
| $1\ lb/in.^2 = 6.90\times10^3\ N/m^2$ | $1\ atm = 14.7\ lb/in.^2$ |
| $1\ lb/ft^2 = 47.9\ N/m^2$ | $1\ atm = 2.12\times10^3\ lb/ft^2$ |
| $1\ cm\text{-}Hg = 1.33\times10^3\ N/m^2$ | $1\ atm = 76\ cm\text{-}Hg$ |
| $1\ mm\text{-}Hg = 133\ N/m^2$ | $1\ atm = 760\ mm\text{-}Hg$ |
| $1\ torr = 133\ N/m^2$ | $1\ atm = 760\ torr$ |
| $1\ mm\text{-}H_2O\ (4°C) = 9.81\ N/m^2$ | $1\ atm = 1.03\times10^4\ mm\text{-}H_2O\ (4°C)$ |




**الشكل 10-9** باروميتر زئبقي- اخترعه تورشللي- مبين هنا؛ حيث الضغط يساوي ضغطا عياريا ، 76 cm-Hg.

يمكن قياس الضغط الجوّي بواسطة نوع معدّلٍ من المانوميتر الزئبقي الذي إحدى نهايتيه مغلقة، وهو ما يُسمّى **باروميترا** زئبقيًّا (الشكل 10-9). يُملأ أنبوب الزجاج كاملًا بالزئبق، ثمّ يُقلب في حوضٍ من الزئبق. إذا كان طول الأنبوب كافيًا، فإنّ مستوى الزئبق ينخفض تاركًا فراغًا عند قمّة الأنبوب؛ لأنّ الضغط الجوّي يمكن أن يحمل عمودًا من الزئبق ارتفاعه 76 cm فقط (بالضغط 76 cm عند الضغط الجوّي العياري). أي أنّ عمودًا من الزئبق ارتفاعه 76 cm ينتج ضغطًا مساويًا للضغط الجوّي*:

$$\begin{aligned} P &= \rho g \,\Delta h \\ &= (13.6 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3})(9.80\ \mathrm{m/s^2})(0.760\ \mathrm{m}) = 1.013 \times 10^5\ \mathrm{N/m^2} = 1.00\ \mathrm{atm}. \end{aligned}$$

تكون المانوميترات المستخدمة في البيوت عادةً لاسائليّة (الشكل 10-8 ب) أو إلكترونيّة.

ستبيّن الحسابات المماثلة للحسابات في الأعلى أنّ الضغط الجوّي يتحمّل عمودًا من الماء ارتفاعه 10.3 m في أنبوب قمّته مفرغة (الشكل 10-10). ومهما كانت جودة مضخّة مفرغة، فإنّها لا تستطيع رفع الماء أكثر من 10 m تقريبًا. لقد درس جاليليو هذه المسألة، إلّا أنّ تلميذه تورشللي كان أول من فسرها. والفكرة هي أنّ المضخّة لا تمتصّ الماء إلى أعلى الأنبوب، بل تخفض الضغط عند قمّته. وبذلك يدفع الضغط الجوّي الماء إلى أعلى الأنبوب إذا كانت النهاية العليا أقلّ ضغطًا (بسبب الفراغ)، مثلما يدفع ضغط الهواء الزئبق 76 cm في الباروميتر.

**الشكل 10-10** باروميتر الماء: تدخل نهاية أنبوب مملوء بالماء في حوض ماء، مع المحافظة على السدادة في الأعلى مغلقة. عندما تفتح النهاية السفلى للأنبوب، ينساب بعض الماء من الأنبوب إلى الحوض. وبذلك يترك فراغًا بين السطح الأعلى

**المثال المفاهيمي 10-5** المصّ

تجلس في مقابلة، يقترح فيها مهندسٌ مبتدئٌ من وكالة الفضاء الأمريكيّة *NASA* صناعة أحذية ماصّة لروّاد مكوك الفضاء الذين يعملون خارج المركبة الفضائيّة. بعد أن تنتهي من دراسة هذا الفصل، تستطيع أن تذكّره بالفكرة الخطأ لهذه الخطة: ما هي؟

**الحل:** تعمل فناجين المصّ على طرد الهواء تحت الفنجان. ما يمسك الفنجان في مكان هو ضغط الهواء خارجه. (تكون هذه قوّة ملموسة على الأرض. فمثلًا، فنجان قطره 10 cm مساحته $7.9 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^2}$، قـوّة الضغط الجوّي عليه هي $(7.9 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^2})(1.0 \times 10^5\ \mathrm{N/m^2}) \approx 800\ \mathrm{N}$، حوالي (180 lbs!). لكن في الفضاء الخارجي، ليس هناك ضغطُ هواءٍ يمسك الحذاء الماصّ على المركبة الفضائيّة.

أحيانًا، نفكّر بطريق الخطأ أنّ المصّ هو شيءٌ نقوم بعمله. فمثلًا، نعتقد أنّنا نسحب الصودا خلال القشة الماصّة. ولكن الصحيح هو أنّنا نقلّل الضغط عن قمّة القشّة، فيقوم الضغط الجوّي بدفع الصودا إلى أعلاها

* هذه الحسابات تدعم ما هو مبين في الجدول 10-2، 1 atm = 76 cm-*Hg*.

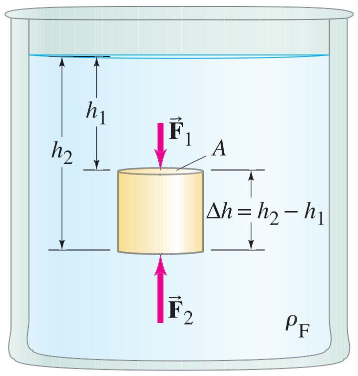
## 7-10 الطَّفو ومبدأ أرخميدس

تبدو الأجسام المغمورة في مائعٍ أخفّ وزنًا مّا لو كانت خارجه. فمثلًا، ستجد صعوبةً في رفع حجر كبيرٍ عن الأرض، في حين يمكن رفعه بسهولةٍ من قعر الوادي. عندما يبدأ الحجر بالخروج من سطح الماء، يبدو فجأة أثقل بكثير. كثيرٌ من الأجسام، مثل الخشب تطفو فوق سطح الماء. هذان مثالان على قوّة الطفو. في كلّ مثال، تؤثر قوّة الجاذبيّة نحو الأسفل. قوّة الطفو على الأسماك والغوّاصين (كما في صورة افتتاحية الفصل) تعادل قوّة الجاذبيّة نحو الأسفل تقريبًا ، وتسمح لهم أن "يسبحوا" باتزان.

يبدو وزن الصخور أقل تحت الماء.

طفو الأخشاب

تنتج قوّة الطفو بسبب زيادة الضغط مع زيادة العمق. وهكذا، فإنّ الضغط نحو الأعلى على قاعدة الجسم المغمور يكون أكبر من قوّة الضغط على سطحه الأعلى. ولرؤية هذا الأثر، افترض أسطوانةً ارتفاعها $\Delta h$ حيث $A$ مساحة كلٍّ من سطحيها العلويّ والسفليّ. وهي مغمورةٌ تمامًا في مائع كثافته $\rho_F$ ، كما هو مبيّن في (الشكل 10-11). يبذل المائع ضغطًا $P_1 = \rho_F g h_1$ على السطح العلويّ للأسطوانة (المعادلة 10-3أ).




**الشكل 10-11** تحديد قوّة الطفو.

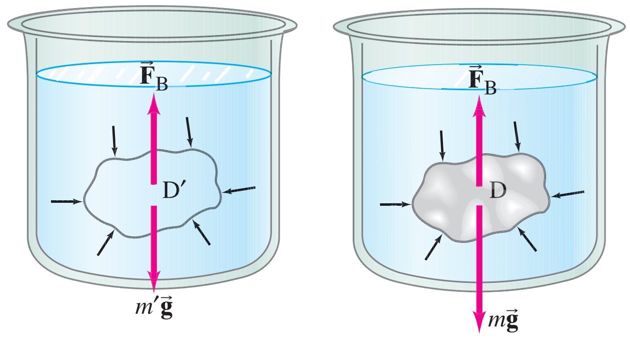
والقوّة الناجّة من هذا الضغط على السطح العلويّ للأسطوانة تساوي $F_1 = P_1 A = \rho_F g h_1 A$، وتؤثّر نحو الأسفل. وبصورةٍ مماثلة، فإنّ المائع يبذل قوّةً على قاعدة الأسطوانة تساوي $F_2 = P_2 A = \rho_F g h_2 A$.

القوّة المحصّلة على الأسطوانة الناجّة من ضغط المائع، وهي **قوّة الطفو**، $\vec{F}_B$، تؤثّر للأعلى ومقدارها

$$\begin{aligned} F_B = F_2 - F_1 &= \rho_F g A (h_2 - h_1) \\ &= \rho_F g A \, \Delta h \\ &= \rho_F V g \\ &= m_F g \end{aligned}$$

حيث $V = A\,\Delta h$ هو حجم الأسطوانة، أمّا حاصل الضرب $\rho_F V$ فهو كتلتها، في حين أنّ $\rho_F V g = m_F g$ هو وزن السائل الذي يأخذ حجمًا يساوي حجم الأسطوانة. وهكذا، فإنّ قوّة الطفو على الأسطوانة تساوي وزن المائع المزاح بوساطتها. وهذه النتيجة صحيحةٌ بغضّ النظر عن شكل الجسم. ويُعزى اكتشافها إلى أرخميدس (287-212 قبل الميلاد)، وتُدعى بقاعدة **(مبدأ) أرخميدس** التي تنصّ على أنّ: **قوّة الطفوّ على جسمٍ مغمورٍ في مائع تساوي وزن المائع المزاح بواسطة الجسم.** ونقصد بـ " المائع المزاح" حجمًا من المائع مساويًا لحجم الجسم المغمور، أو ذلك الجزء من الجسم المغمور إذا كان الجسم طافيًا أو مغمورًا جزئيًّا (المائع الذي اعتاد أن يكون مكان الجسم). إذا وُضع الجسم في إناءٍ زجاجيٍّ مملوءٍ حتى الحافّة بالماء، فإنّ الماء المنسكب يمثّل الماء الذي أُزيح بواسطة الجسم.

قاعدة (مبدأ) أرخميدس.




(ب) (أ)

**الشكل 12-10** مبدأ أرخميدس

يمكننا اشتقاق مبدأ أرخميس بصورةٍ عامَّةٍ باتباع طريقةٍ بسيطةٍ ولكنّها رائعة. الجسم $D$ ذو الشكل غير المنتظم، المبيّن في (الشكل 12-10أ) تؤثر فيه قوّة الجاذبيّة (وزنه) $m\vec{\mathbf{g}}$ نحو الأسفل)، وقوّة الطفو $\vec{\mathbf{F}}_B$ نحو الأعلى. ونريد أن نحدّد قوّة الطفو $F_B$. لعمل ذلك؛ نفترض جسمًا $D'$ في (الشكل 12-10 ب)، والآن، هذا الجسم مكوّنٌ من المائع نفسه، $d$ شكل الجسم الأصليّ وحجمه، ويقع على العمق نفسه. ويمكنك تخيّل أنّ هذا الجسم من المائع كأنّه مُحاطٌ بغشاءٍ غير مرئيّ من المائع. إنّ قوّة الطفو $F_B$ على هذا الجسم من المائع هي نفسها تمامًا التي تؤثّر في الجسم الأصليّ؛ لأنّ المائع المحيط، الذي يؤثّر بقوّة $F_B$ له التوزيع نفسه. هذا الجسم من المائع $D'$ في حالة اتزان (لأنّ المائع على نحو عام في حالة سكون). لذا، فإنّ $F_B = m'g$ حيث $m'g$ وزن الجسم المائع، وبالتالي فإنّ قوّة الطفو $F_B$ تساوي وزن جسم المائع الذي حجمه يساوي حجم الجسم الأصليّ المغمور؛ وهذا هو مبدأ أرخميدس.

إنّ اكتشاف أرخميدس تمّ بواسطة التجربة. وما بيّنّاه في الفقرات السابقة هو أنّ مبدأ أرخميدس يمكن اشتقاقه من قوانين نيوتن.

### المثال المفاهيمي 6-10 وعاءان من الماء

افرض أنّ هناك وعاءين متماثلين من الماء مملوءين حتى الحافة. أحد الوعاءين يحتوي على ماءٍ فقط، أمّا الآخر فيحتوي على قطعةٍ من الخشب تطفو فيه. أيُّ الوعاءين أكثر وزنًا؟

**الإجابة**: كِلا الوعاءين لهما الوزن نفسه. تذكّر مبدأ أرخميدس: يزيح الخشب كميّةً من الماء مساويةً لوزنه. بعض الماء سوف ينسكب من فوق حافة الوعاء، ولكن مبدأ أرخميدس يشير إلى أنّ الماء المنسكب له وزنٌ مساوٍ لوزن الخشب؛ لذا، فإنّ للوعاءين وزنين متساويين.

### المثال 7-10 الضغط عند الصنبور

يستقرّ تمثالٌ قديمٌ كتلته 70-kg على أرض قعر البحر. إذا كان حجم التمثال يساوي $3.0 \times 10^4\ \text{cm}^3$. فكم القوّة اللازمة لرفعه؟

**النّهج**: القوّة $F$ اللازمة لرفع التمثال تساوي وزن التمثال $mg$ مطروحًا منه قوّة الطفو $F_B$. (الشكل 13-10) هو مخطط الجسم الحرّ.

**الحل**: قوّة الطفو على التمثال بسبب الماء تساوي وزن $3.0 \times 10^4\ \text{cm}^3 = 3.0 \times 10^{-2}\ \text{m}^3$ من الماء. (ماء البحر $\rho = 1.025 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$).

$$F_B = m_{H_2O}\,g = \rho_{H_2O} V g$$

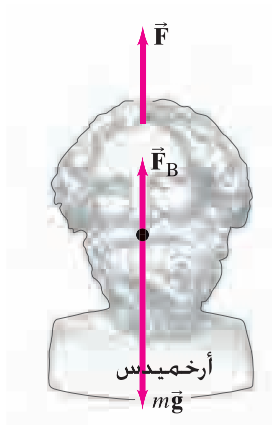
$$= \left(1.025 \times 10^3\ \text{kg/m}^3\right)\left(3.0 \times 10^{-2}\ \text{m}^3\right)\left(9.8\ \text{m/s}^2\right)$$

$$= 3.0 \times 10^2\ \text{N}.$$

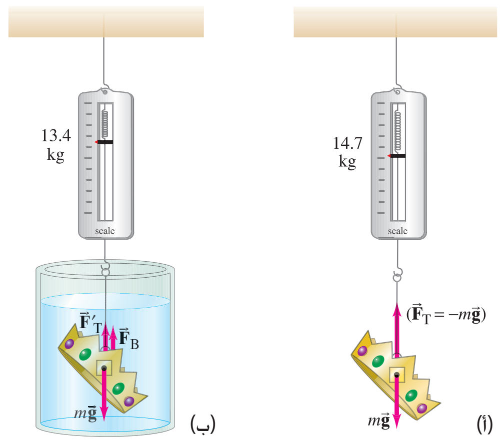
وزن التمثال هو $mg = (70\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 6.9 \times 10^2\ \text{N}$ لذا، فإنّ القوّة $F$ التي تلزم لرفع التمثال هي $690\ \text{N} - 300\ \text{N} = 390\ \text{N}$. إنّها كما لو أنّ التمثال كتلته $(390\ \text{N})/(9.8\ \text{m/s}^2) = 40\ \text{kg}$ فقط

**ملحوظة**: هنا، $F = 390\ \text{N}$ هي القوّة اللازمة لرفع التمثال من غير تسارعٍ وهو تحت الماء. وعندما يخرج التمثال، فإنّ القوّة $F$ تزداد لتصل إلى 690 N عندما يصبح التمثال خارج الماء تمامًا.

**الشكل 13-10** (المثال 7-10). القوّة اللازمة لرفع التمثال $\vec{\mathbf{F}}$.



يقال إنّ أرخميدس اكتشف مبدأه في حوض السباحة من خلال تفكيره في إثبات أنّ تاج الملك مصنوعٌ من الذهب الخالص أم فيه زيف. للذهب جاذبيّةٌ نوعيّةٌ مقدارها 19.3، أكبر بعض الشيء من معظم الفلزات، إلّا أنّ تحديد الجاذبيّة النوعيّة أو الكثافة ليس أمرًا مباشرًا؛ لأنّه حتى لو كانت الكتلة معلومة، فإنّ حجم جسمٍ غير منتظمٍ لا يمكن حسابه بسهولة. على أيّ حال، إذا كان وزن الجسم ($=w$) في الهواء، وكذلك وزنه تحت الماء ($=w'$)، فإنه يمكن استخدام قاعدة أرخميدس لحساب الكثافة، كما يبين المثال التالي. الكمية $w'$ تُسمّى الوزن الظاهري، وهو ما يقرأه الميزان في أثناء غمر الجسم في الماء (انظر الشكل 14-10)؛ $w'$ يساوي الوزن الحقيقي ($w = mg$) مطروحًا منه قوّة الطفو.




الشكل **14-10** (أ) يقرأ الميزان كتلة الجسم في الهواء، وهو في هذه الحالة التاج في المثال (8-10). الأجسام كلّها في حالة سكون. لذا، فإنّ الشد $F_T$ في الخيط يساوي وزن الجسم $w$ $F_T = mg$ نبيّن مخطّط الجسم الحرّ للتاج، $F_T$ هي ما تُسبّب قراءة الميزان (إنّها تساوي القوّة المحصّلة نحو الأسفل على الميزان، تبعًا لقانون نيوتن الثالث). (ب) عندما يكون الجسم مغمورًا، فهناك قوّة إضافيّةٌ عليه هي قوّة الطفو $F_B$. القوّة المحصّلة تكون صفرًا، لذلك، $F'_T + F_B = mg\,(=w)$ . يقرأ الميزان الآن $m' = 13.4$ kg، حيث $m'$ ترتبط بالوزن الفعلي $w' = m'g$. وهكذا، فإن $F'_T = w' = w - F_B$.

## المثال 8-10 أرخميدس: هل التاج من الذهب الخالص؟

عندما يغمر تاجٌ كتلته 14.7 kg في الماء، فإنّ ميزانًا دقيقًا يقرأ 13.4 kg فقط. فهل التاج مصنوعٌ من الذهب الخالص؟

**النّهج**: إذا كان التاج من الذهب، فإنّ كثافته أو جاذبيّته النوعيّة يجب أن تكون عالية. SG = 19.3 (انظر البند 2-10 والجدول 1-10) تحدد الجاذبيّة النوعيّة باستخدام مبدأ أرخميدس ومخطط الجسم الحرّ المبيّن في (الشكل 14-10).

**الحلّ**: الوزن الظاهريّ للجسم المغمور (التاج) يساوي $w'$، ويساوي $F'_T$ في (الشكل 14-10 ب). مجموع القوى على الجسم يساوي صفرًا، وبهذا $w'$ يساوي $w\,(=mg)$ مطروحًا منه قوّة الطفو $F_B$:

$$w' = F'_T = w - F_B$$

ولذلك

$$w - w' = F_B$$

افرض أنّ $V$ حجم الجسم المغمور كليًّا، و $\rho_O$ كثافة (ولذلك $\rho_O V$ تساوي كتلته). وافترض كذلك أنّ $\rho_F$ كثافة المائع (ماء). عندما $(\rho_F V)g$ يساوي وزن المائع المزاح ($=F_B$). يمكننا الآن كتابة.

تذكر أنّ $m = \rho V$ (المعادلة 1-10).

$$w = mg = \rho_O Vg$$
$$w - w' = F_B = \rho_F Vg.$$

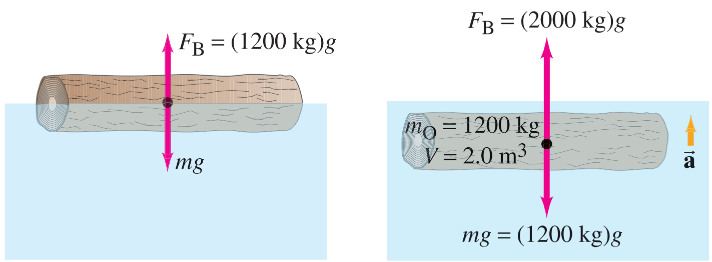
وبقسمة المعادلتين، نستنتج ما يلي:

$$\frac{w}{w - w'} = \frac{\rho_O Vg}{\rho_F Vg} = \frac{\rho_O}{\rho_F}.$$

ونرى أنّ $w/(w - w')$ يساوي الجاذبيّة النوعية للجسم، وإذا كان المائع ماء، فإنّ كثافة الماء $(\rho_F = 1.00 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)$ وهكذا

$$\frac{\rho_O}{\rho_{H_2O}} = \frac{w}{w - w'} = \frac{(14.7\ \text{kg})g}{(14.7\ \text{kg} - 13.4\ \text{kg})g} = \frac{14.7\ \text{kg}}{1.3\ \text{kg}} = 11.3$$

وهذا يكافىء كثافة $11{,}300\ \text{kg/m}^3$. وعليه، يبدو أنّ التاج مصنوعٌ من الرّصاص (انظر الجدول 1-10)!.




(ب) (أ)

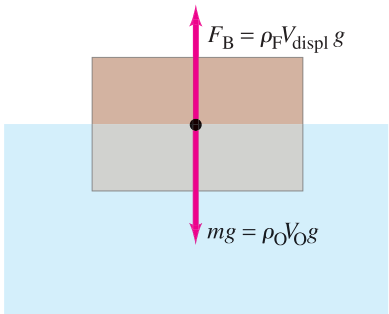
**الشكل 15-10** (أ) يتسارع الجذع المغمور كليًا نحو الأعلى بسبب أنّ $F_B > mg$. يصل الجذع إلى الاتزان؛ (ب) عندما تصبح $\Sigma F = 0$ ، وبذلك تكون $F_B = mg = (1200\ \text{kg})g$. أي أنّ 1200 kg أو $1.2\ \text{m}^3$ من الماء أزيح.

ينطبق مبدأ أرخميدس كذلك على الأجسام الطافية، مثل الخشب. على نحوٍ عام، يطفو الجسم على المائع إذا كانت كثافته أقلّ من كثافة المائع. وهذا ما يبدو واضحًا في (الشكل 10-15أ)؛ حيث يتأثر الجسم المغمور بقوّة محصّلة للأعلى، ويطفو على السطح إذا كانت $F_B > mg$؛ أي أنّه، إذا كانت $\rho_F Vg > \rho_O Vg$ أو $\rho_F > \rho_O$. في حالة الاتزان – أي، قوّة الطفو في حالة الطفو على جسم ما تساوي وزن الجسم. فمثلًا، إذا كانت الجاذبيّة النوعيّة للجذع تساوي 0.60 وحجمه يساوي $2.0\ \text{m}^3$ وكتلته

المغمور

$$m = \rho_O V = (0.60 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)(2.0\ \text{m}^3) = 1200\ \text{kg}.$$

إذا انغمر الجذع بصورة كاملة، فإنّه سيزيح كميّةً من الماء كتلتها $m_F = \rho_F V = (1000\ \text{kg/m}^3)(2.0\ \text{m}^3) = 2000\ \text{kg}$. وهكذا تكون قوّة الدفع (الطفو) على الجذع أكبر من وزنه، لذا، يطفو إلى أعلى السطح (الشكل 10-15). وسوف يصل الجذع إلى الاتزان عندما يزيح 1200 kg من الماء؛ أي أنّ $1.2\ \text{m}^3$ من حجمه سوف ينغمر. وهنا $1.2\ \text{m}^3$ تكافىء 60% من حجم الجذع $(1.2/2.0 = 0.60)$ وبهذا، فإنّ 60% من حجم الجذع سوف يكون مغمورًا.




**الشكل 16-10** جسم يطفو في حالة اتزان $F_B = mg$.

وعلى نحوٍ عام، عندما يطفو الجسم، تكون $F_B = mg$ التي يمكننا كتابتها بالصورة (الشكل 10-16).

$$\rho_F V_{displ}\, g = \rho_O V_O\, g$$

حيث $V_O$ هو الحجم الكلّيّ للجسم، و $V_{displ}$ هو حجم السائل المزاح (= حجم الجزء المغمور)، وهكذا

$$\frac{V_{displ}}{V_O} = \frac{\rho_O}{\rho_F}$$

أي أنّ الجزء المغمور من الجسم يُعطى كنسبة كثافة الجسم إلى كثافة المائع. إذا كان المائع ماء، فإنّ هذه النسبة تساوي الجاذبيّة النوعيّة للجسم.

نسبة الجزء المغمور من الجسم في الماء = كثافته النوعية.

## المثال 10-9 تدريج الهيدرومتر

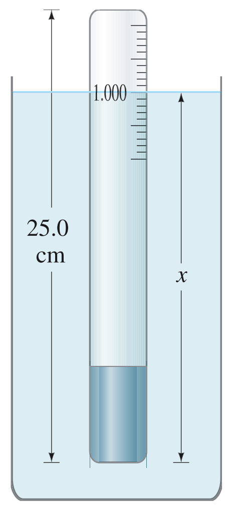
الهيدرومتر جهازٌ بسيطٌ يستعمل لقياس الجاذبيّة النوعيّة لسائل بمعرفة إلى أيّ عمقٍ يغوص الجهاز في السائل. يتكوّن الهيدرومتر (الشكل 17-10) من أنبوبٍ زجاجيّ، يوجد في أسفله ثقل، طوله 25.0 cm، ومساحة مقطعه $2.00\ \text{cm}^2$، وكتلته $45.0g$. فعلى أيّ بعد من النهاية يجب وضع إشارة 1.000؟

**النّهج:** سوف يطفو الهيدرومتر في الماء إذا كانت كثافته $\rho$ أقلّ من كثافة الماء $\rho_w = 1.000\ \text{g/cm}^3$. نسبة الجزء الطافي من الهيدرومتر $(V_{displaced}/V_{total})$ تساوي نسبة الكثافة $\rho/\rho_w$.

**الحلّ:** كثافة الهيدروميتر هي

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{45.0\ \text{g}}{(2.00\ \text{cm}^2)(25.0\ \text{cm})} = 0.900\ \text{g/cm}^3$$

وهكذا، عند وضعه في الماء، فإنّه يصل إلى الاتزان عندما يغمر 0.900 من حجمه. وبما أنّه منتظم المقطع، فإنّ $(0.900)(25.0\ \text{cm}) = 22.5\ \text{cm}$ من طوله سوف ينغمر. تعرف الجاذبيّة النوعيّة للماء بأنها تساوي 1.000. ولهذا، توضع العلامة عند 22.5 cm من النهاية (الطرف).




**الشكل 17-10** الهيدروميتر (المثال 10-9).

**تمرين أ:** على الهيدروميتر في (المثال 10-9)، هل العلامات فوق علامة 1.000 تمثّل قيمًا أكبر أم أصغر من كثافة السائل الذي يغمر فيه الهيدروميتر؟

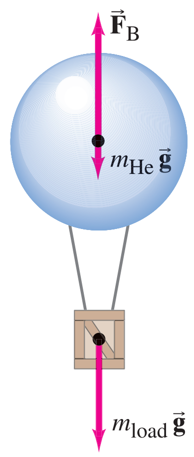
يُستفاد كذلك من مبدأ أرخميدس في الجيولوجيا؛ تبعًا لنظريّات تغيّر شكل قشرة الأرض والانسياق القارّي، فإنّ القارات تعوم على "بحر" من مائع صخريٍّ قابلٍ للتشويه. ويمكن عمل حسابات مهمّة باستخدام نماذج بسيطة، نوردها في مسائل نهاية الفصل.

**تطبيق الفيزياء**

الجرف القاري – تغير شكل قشرة الأرض.

يُعدّ الهواء كذلك مائعًا. لذا، فإنّه ينتج قوّة طفو (قوّة دفع). ويكون وزن الأجسام العاديّة أقلّ في الهواء ممّا هي عليه في الفراغ. ولأنّ كثافة الهواء قليلة، فإنّ الأثر في الأجسام الصلبة يكون قليلًا أيضًا. لكن هناك أجسامًا تطفو في الهواء مثل البالونات المملوءة بالهيليوم؛ لأنّ كثافة الهيليوم أقلّ من كثافة الهواء.

الوزن يتأثر بقوّة دفع الهواء.




الشكل **10-18** (المثال 10-10).

**المثال 10-10** بالون الهيليوم

ما حجم الهيليوم $V$ المطلوب إذا كان على البالون رفع ثقل 180 kg (متضمنًا وزن البالون الفارغ)؟

**النّهج:** قوّة الطفو على بالون الهيليوم، $F_B$، التي تساوي وزن الهواء المزاح، يجب، على الأقل، أن تساوي وزن الهيليوم بالإضافة إلى وزن البالون والثقل. (الشكل 10-18). (الجدول 10-1) تعطي كثافة الهيليوم بـ $0.179\ \text{kg/m}^3$.

**الحلّ:** قوّة الطفو يجب أن تكون لها قيمةٌ دنيا وهي

$$F_B = (m_{He} + 180\ \text{kg})g$$

ويمكن كتابة هذه المعادلة بدلالة الكثافات باستعمال مبدأ أرخميدس كما يلي:

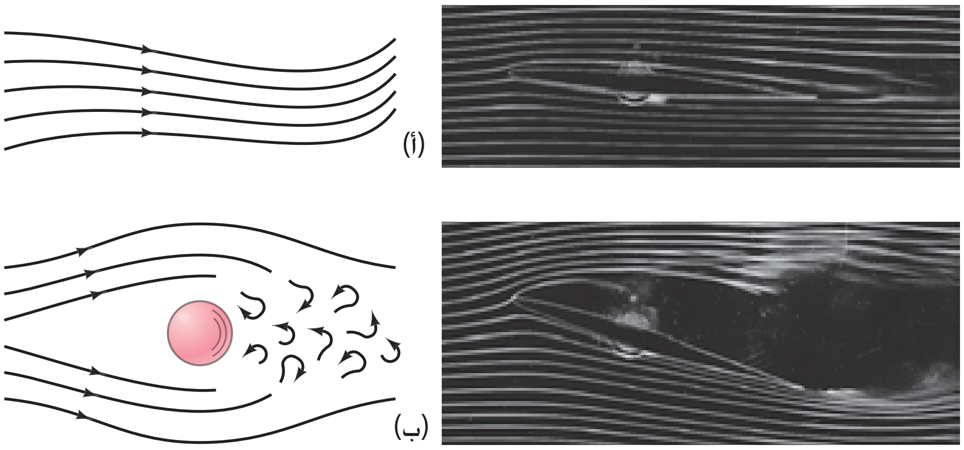
$$\rho_{air} V g = (\rho_{He} V + 180\ \text{kg})g$$

ونحلّ هذه المعادلة لإيجاد $V$:

$$V = \frac{180\ \text{kg}}{\rho_{air} - \rho_{He}}$$

$$= \frac{180\ \text{kg}}{(1.29\ \text{kg/m}^3 - 0.179\ \text{kg/m}^3)} = 160\ \text{m}^3$$

**ملحوظة:** هذا هو الحجم الأصغر اللازم بالقرب من سطح الأرض؛ حيث $\rho_{air} = 1.29\ \text{kg/m}^3$، للوصول إلى ارتفاع كبير، نحتاج إلى حجم أكبر؛ لأنّ كثافة الهواء تقل مع زيادة الارتفاع.




**الشكل 10-19** (أ) خطوط التيار، الجريان الانسيابي. (ب) الجريان الاضطرابي.

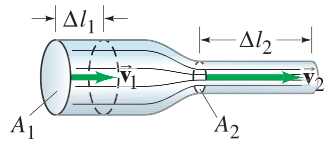
## 8-10 الموائع المتحركة؛ معدل الجريان ومعادلة الاستمرارية

نتحوّل الآن إلى موضوع الموائع المتحرّكة الذي يُدعى **ديناميكا الموائع** أو (خاصّةً إذا كان المائعُ ماءً) **هيدروديناميكا**. هناك جوانب متعدّدة من حركة الموائع لا تزال تحت الدراسة (مثل الجريان الاضطرابي كمظهر من مظاهر الفوضى هو موضوعٌ قيد الدراسة هذه الأيام بشكلٍ كبير). وبغضّ النظر، يمكننا فهم الكثير حول الموضوع مع فرضيّات مبسّطة.

يمكننا تمييز نوعين رئيسين من جريان الموائع. فإذا كان الجريان سلسًا، بحيث إنّ طبقات المائع المتجاورة تنزلق بسهولة عن بعضها، فإنّ هذا الجريان يُسمّى **خطوط التيار أو الجريان الانسيابي***. في الجريان الانسيابي يتبع كلّ جُسيمٍ من المائع مسارًا معيّنًا يُسمّى خطّ التيار، وهذه الخطوط جميعها لا تتقاطع (الشكل 10-19أ). وفوق سرعةٍ معيّنة، يصبح الجريان اضطرابيًّا. يتميّز الجريان الاضطرابي بدوائر غريبة الأطوار تشبه الدوّامات الصغيرة، تُدعى تيّارات دوّاميّة (الشكل 10-19ب).

تمتصّ هذه الدوّامات طاقةً كبيرة، وبالرغم من وجود احتكاكٍ داخليٍّ يُسمّى **اللزوجة** حتى في أثناء الجريان الانسيابي، فإنّها تكون كبيرةً بوجود الجريان الاضطرابي. إذا أضفت نقاطًا صغيرةً من الحبر أو صبغة الغذاء إلى سائلٍ يتحرك، فيمكنك أن تبيّن بسهولةٍ أنّ الجريان انسيابيٌّ أو اضطرابيٌّ.

دعنا نفترض الجريان الانسيابيّ المائع عبر أنبوبٍ يحتويه كما هو مبيّنٌ في (الشكل 10-20). سوف نحدّد أولًا كيف تتغيّر سرعة المائع عندما يتغيّر حجم الأنبوب. نعرّف معدّل تدفّقٍ بكتلة المائع $\Delta m$ التي تعبر نقطةً معيّنةً لكلّ وحدة زمن $\Delta t$:




**الشكل 10-20** تدفق المائع عبر أنبوب مختلف القطر.

$$\text{معدّل جريان الكتلة} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

في (الشكل 10-20) حجم المائع الذي يعبر النقطة 1 (أي خلال المساحة $A_1$) في زمن $\Delta t$ هو $A_1 \Delta l_1$؛ حيث $\Delta l_1$ هي المسافة التي يتحرّكها المائع في زمن $\Delta t$. وبما أنّ سرعة** المائع العابر للنقطة 1 هي $\Delta l_1 / \Delta t$ فإنّ معدل جريان الكتلة $\Delta m_1 / \Delta t$ خلال المساحة $A_1$ هو

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1 \Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1 A_1 \Delta l_1}{\Delta t} = \rho_1 A_1 v_1$$

حيث $\Delta V_1 = A_1 \Delta l_1$ حجم الكتلة $\Delta m_1$، و $\rho_1$ كثافة المائع. وبالطريقة نفسها عند النقطة 2 (خلال المساحة $A_2$) فإنّ معدّل الجريان هو $\rho_2 A_2 v_2$. وبما أنّه لا يوجد مائعٌ يدخل أو يخرج من جوانب الأنبوب، فإنّ معدّل الجريان عبر $A_1$ و $A_2$ يجب أن يكونا متساويين. لذا، فإنّ

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t}$$

أي أنّ

معادلة الاستمرارية (عام).

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \qquad \text{(4-10 أ)}$$

وتُسمّى هذه **معادلة الاستمرارية**.

* تعني كلمة لامينار "على صورة طبقات".
** لو لم تكن هناك لزوجة، فإنّ سرعة المائع ستكون ثابتةً عبر مقطع الأنبوب. الموائع الحقيقية لها لزوجة، وهذا الاحتكاك الداخليّ يسبب تدفّق الطبقات المختلفة للمائع بسرعاتٍ مختلفة. في هذه الحالة، تمثّل السرعتان $v_1$ و $v_2$ السرعة المتوسّطة عند كلّ مقطعٍ عرضيٍّ للأنبوب.

إذا كان المائع غير قابلٍ للانضغاط، فإنّ ρ لا تتغيّر مع الضغط. وهذا تقريبٌ ممتازٌ للسوائل تحت معظم الظروف (وأحيانًا للغازات أيضًا)، عندها $\rho_1 = \rho_2$ وتصبح معادلة الاستمرارية

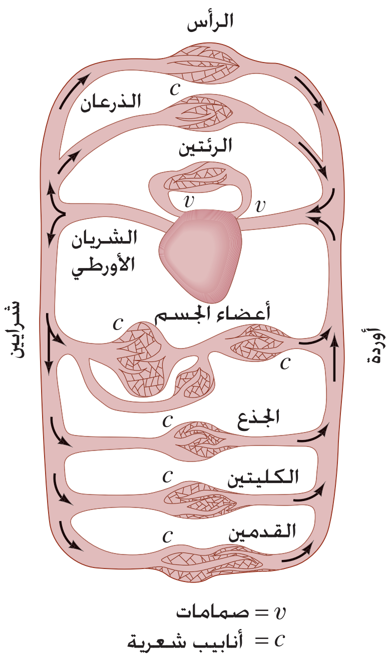
معادلة الاستمرارية ($\rho$ = ثابت).

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad [\rho=\text{ثابت}] \qquad \textbf{(10-4ب)}$$

تعبر الكميّة $Av$ عن معدّل الجريان الحجمي (حجم المائع المار عند نقطةٍ في الثانية الواحدة)؛ $Av = A\,\Delta l/\Delta t = \Delta V/\Delta t$ حيث وبالوحدات الدولية $\mathrm{m^3/s}$. تخبرنا (المعادلة 10-4ب) أنّه حيثما تكون مساحة المقطع كبيرةً تكون السرعة صغيرة، وحيثما تكون المساحة صغيرةً تكون السرعة كبيرة. ويمكن إدراك أنّ ذلك معقولٌ بمراقبة جريان ماء النهر: فالنهر يجري بطيئًا في المروج المنبسطة حيث يكون عريضًا، لكنّه يتسارع ليصل سرعته الجارفة عند عبوره مدخلًا ضيّقًا.

تطبيق الفيزياء

جريان الدم




**الشكل 10-21**
نظام الدورة الدموية للإنسان

## المثال 10-11 قدّر جريان الدم

يجري الدم في الإنسان من القلب إلى الشريان الأورطي، ومنه إلى الشرايين الرئيسة التي تتفرّع إلى شرايين صغيرة، تتفرّع بدورها إلى شعيراتٍ دموية، (الشكل 10-21). ومن ثمّ يعود الدم إلى القلب عبر الأوردة. نصف قطر الشريان الأورطي حوالي $1.2\ \mathrm{cm}$ وسرعة الدم خلاله حوالي $40\ \mathrm{cm/s}$. نصف قطر الشعيرات الدموية حوالي $4 \times 10^{-4}\ \mathrm{cm}$، ويعبرها الدم بسرعة $5 \times 10^{-4}\ \mathrm{m/s}$ تقريبًا، خمّن عدد الأنابيب الشعرية في الجسم.

**النّهج**: نفرض أنّ كثافة الدم لا تتغيّر بصورةٍ ملموسةٍ من الأورطة إلى الشعيرات الدمويّة. ومن معادلة الاستمراريّة، فإنّ معدّل الجريان الحجميّ في الأورطة يجب أن يساوي معدّل الجريان الحجميّ عبر الأنابيب الشعريّة كلّها. المساحة الكليّة للأنابيب الشعريّة تساوي مساحة أنبوبةٍ شعريّةٍ واحدةٍ مضروبةً في عدد الأنابيب الشعرية $N$.

**الحلّ**: افرض أنّ $A_1$ مساحة الأورطة، و $A_2$ المساحة الكليّة للأنابيب الشعريّة التي يتدفّق عبرها الدم. عندها $A_2 = N\pi r_{\text{cap}}^2$ ؛ حيث $r_{\text{cap}} \approx 4 \times 10^{-4}\ \mathrm{cm}$ هو نصف القطر التقريبيّ للأنبوب الشعري. ومن معادلة الاستمراريّة (المعادلة 10-4) ، يكون عندنا

$$v_2 A_2 = v_1 A_1$$

لذلك

$$v_2 N\pi r_{\text{cap}}^2 = v_1 \pi r_{\text{aorta}}^2$$

$$N = \frac{v_1}{v_2}\frac{r_{\text{aorta}}^2}{r_{\text{cap}}^2} = \left(\frac{0.40\ \mathrm{m/s}}{5 \times 10^{-4}\ \mathrm{m/s}}\right)\left(\frac{1.2 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}}{4 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}}\right)^2 \approx 7 \times 10^9$$

أي حوالي عشرة بلايين أنبوبة شعرية.

تطبيق الفيزياء

مجرى التهوية.

## المثال 10-12 مجرى التدفئة في غرفة

ما المساحة التي يجب أن يكون عليها مجرى التدفئة لهواءٍ يندفع بسرعة $3.0\ \mathrm{m/s}$ بحيث يتجدّد الهواء كلّ 15 دقيقةً في غرفةٍ حجمها $300\ \mathrm{m^3}$؟ افرض أنّ كثافة الهواء تبقى ثابتة.

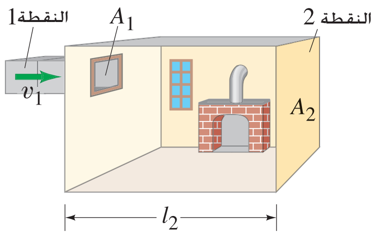
**النّهج**: نطبّق معادلة الاستمراريّة بكثافةٍ ثابتة، (المعادلة 10-4) . على الهواء الذي يتدفّق عبر مجرى النقطة 1 في (الشكل 10-22) ومن ثَمّ عبر الغرفة (النقطة 2) . معدّل الجريان الحجميّ في الغرفة يساوي حجم الغرفة مقسومًا على زمن تجديد التهوية $15\ \mathrm{min}$.

**الحلّ**: افترض الغرفة عند مقطعٍ كبيرٍ للمجرى، (الشكل 10-22) ، وافرض كذلك أنّ الهواء مساوٍ لحجم الغرفة عند عبوره النقطة 2 في زمن $t = 15\ \mathrm{min} = 900\mathrm{s}$ . وللسبب نفسه الذي استخدمناه عند استنتاج (المعادلة 10-4أ) ، نكتب $v_2 = l_2/t$، وبهذا $A_2 v_2 = A_2 l_2/t = V_2/t$.
حيث $V_2$ حجم الغرفة. عندها تصبح معادلة الاستمراريّة $A_1 v_1 = A_2 v_2 = V_2/t$

$$A_1 = \frac{V_2}{v_1 t} = \frac{300\ \mathrm{m^3}}{(3.0\ \mathrm{m/s})(900\ \mathrm{s})} = 0.11\ \mathrm{m^2}$$

إذا كان المجرى مربّعًا، فإنّ طول ضلعه $l = \sqrt{A} = 0.33\ \mathrm{m}$ أو $33\ \mathrm{cm}$.ومجرى مستطيل $20\ \mathrm{cm} \times 55\ \mathrm{cm}$ سوف يكون مناسبًا أيضًا.

**الشكل 10-22** المثال 10-12.



## 9-10 معادلة برنولي

معادلة برنولي

هل تعجّبت يومًا كيف تستطيع الطائرة التحليق؟ أو كيف يتحرّك القارب الشراعيّ ضدّ الريح؟ هذان مثالان على مبدأ استنتجه دانيال برنولي (1700-1782) يتعلّق بحركة الموائع. في الجوهر، ينصّ **مبدأ برنولي على**: "حيث تكون سرعة المائع كبيرةً، يكون ضغطه منخفضًا، وحيث تكون سرعة المائع منخفضةً، يكون الضغط عاليًا. فمثلًا، لو قيس الضغطان عند النقطتين 1 و 2 (الشكل 10-20)، فسنجد أنّ الضغط سيكون أقلّ عند النقطة 2، لأنّ السرعة أكبر ممّا هي عليه عند النقطة 1؛ حيث السرعة أقلّ. وللوهلة الأولى يبدو ذلك غريبًا، فقد تتوقّع أنّ السرعة الكبيرة عند النقطة 2 تتضمّن ضغطًا أكبر، ولكن ذلك ليس صحيحًا. إذا كان الضغط عند النقطة 2 أعلى من الضغط عند النقطة 1، فإنّ هذا سوف يبطّىء المائع، ولكن الحقيقة هو أنّ المائع يتسارع عند انتقاله من 1 إلى 2. وهكذا، و يجب أن يكون الضغط عند النقطة 2 أقلّ من الضغط عند النقطة 1؛ ليتلاءم ذلك مع حقيقة أنّ المائع يتسارع.

[لتوضيح أيّ غموض: فإنّ المائع الأسرع سوف يؤثّر بقوّة أكبر في حاجز (عائق) يوضع في طريقه إذا أوقف المائع أو ارتدّ بعيدًا عن العائق. لكن ليس ذلك ما نعنيه بالضغط داخل المائع، كما أنّنا لا نناقش وجود عوائق تعترض المائع في جريانه، إنّنا نبحث جريانًا سلسًا انسيابيًّا. يؤثّر ضغط المائع في الاتجاهات كلّها بما في ذلك جدران الأنبوب أو سطوح المواد التي يتجاوزها المائع].

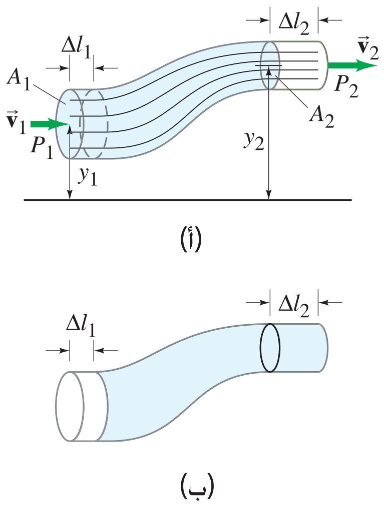
لقد طوّر برنولي معادلةً تعبّر عن هذا المبدأ بصورةٍ كمّيّة. ولاشتقاق معادلة برنولي؛ نفرض جريانًا انسيابيًّا ثابتًا، وأنّ المائع غير قابلٍ للانضغاط، وإهمال اللزوجة لصغرها. وعلى نحوٍ عام، نفرض أنّ المائع يتدفّق في أنبوبٍ مساحة مقطعه متغيّرة، ويختلف ارتفاعه بالنسبة إلى مستوًى مرجعي، (الشكل 10-23). سوف نفترض حجم المائع في الجزء الملوّن، ونحسب الشغل اللازم لنقل هذا الحجم من موقعه في (الشكل 10-23 أ). إلى موضعٍ جديد (الشكل 10-23 ب). في هذه العمليّة، يندفع المائع عند النقطة 1 مسافة $\Delta l_1$، ويجبر المائع عند النقطة 2 ليتحرّك مسافة $\Delta l_2$ . المائع إلى يسار النقطة 1 يؤثّر بضغط $P_1$ في مقطع المائع، ويعمل بذلك شغلًا

$$W_1 = F_1 \Delta l_1 = P_1 A_1 \Delta l_1$$

عند النقطة 2، الشغل المبذول على مقطع المائع هو

$$W_2 = -P_2 A_2 \Delta l_2$$

إنّ الإشارة السالبة موجودةٌ لأنّ القوّة المؤثّرة في المائع عكس اتجاه الحركة (وهكذا، يعمل المائع المبيّن بالألوان شغلًا على المائع إلى يمين النقطة 2). ويبذل شغلًا كذلك على المائع بواسطة قوّة الجاذبيّة. الأثر المحصّل لهذه العمليّة المبيّنة في (الشكل 10-23) هو تحريك كتلته $m$ وحجمها $A_1 \Delta l_1 (= A_2 \Delta l_2)$ لأنّ المائع غير انضغاطي، من النقطة 1 إلى النقطة 2، ولهذا يكون الشغل المبذول من الجاذبيّة




**الشكل 10-23**
جريان المائع: لاشتقاق معادلة برنولي.

$$W_3 = -mg(y_2 - y_1)$$

حيث $y_1$ و $y_2$ هما ارتفاعا مركز الأنبوب فوق مرجعٍ معيّن (اختياري). في الحالة المبيّنة في (الشكل 10-23)، هذا الحدّ سالبٌ لأنّ الحركة باتّجاه الارتفاعٍ عكس قوّة الجاذبيّة. وهكذا يكون الشغل المبذول على المائع

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$
$$W = P_1 A_1 \Delta l_1 - P_2 A_2 \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1$$

وتبعًا لمبدأ الشغل – الطاقة (بند 6-3)، فإنّ الشغل المحصّل المبذول على نظامٍ يساوي التغيّر في طاقته الحركيّة. وعليه فإنّ

$$\tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 = P_1 A_1 \Delta l_1 - P_2 A_2 \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1$$

الكتلة $m$ حجمها $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$، لذلك يمكننا تعويض $m = \rho A_1 \Delta l_1 = \rho A_2 \Delta l_2$ ومن ثَمّ القسمة على $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$ للحصول على

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

وهذا يُعاد ترتيبه بحيث نحصل على

معادلة برنولي

$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2. \qquad \textbf{(10-5)}$$

وهذه هي **معادلة برنولي**. لأنّ 1 و 2 يمكن أن تكونا أيّ نقطتين على امتداد أنبوب الجريان، ويمكن كتابة هذه المعادلة كما يلي:

$$P + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{ثابت}$$

عند كلّ نقطة من المائع؛ حيث $y$ ارتفاع منتصف الأنبوب فوق مرجعٍ معيّن . [لاحظ أنّه لو لم يكن هناك جريان $(v_1 = v_2 = 0)$، تعود عندها (المعادلة 10-5) إلى معادلة الهَيدروستاتيك 10-3 ب أو 10-3 جـ].
وتُعدّ هذه المعادلة تعبيرًا عن قانون حفظ الطاقة؛ لأنّنا استنتجناها من معادلة الشغل – الطاقة.

**تمرين C**: عندما يمرّ الماء عبر أنبوبٍ مستوٍ من مقطعٍ ضيّقٍ للأنبوب إلى مقطعٍ أوسع. فكيف يتغيّر الضغط؟

تطبيق الفيزياء
نظام التدفئة بالماء الساخن

**المثال 10-13 الجريان والضغط في نظام التدفئة بالماء الساخن** يدور الماء الساخن في البيت في نظام تدفئة بالماء الساخن. إذا تمّ ضخّ الماء بسرعة $0.50\ \text{m/s}$ عبر أنبوبٍ قطره $4.0\ \text{cm}$ في التسوية تحت ضغط $3.0\ \text{atm}$، فماذا ستكون سرعة الجريان والضغط في أنبوبٍ قطره $2.6\ \text{cm}$ في الطابق الثاني على ارتفاع $5.0\ \text{m}$؟ افرض أنّ الأنبوب دون تفرعات.

**النّهج**: نستعمل معادلة الاستمراريّة بكثافةٍ ثابتةٍ لتحديد سرعة الجريان في الطابق الثاني، ثم معادلة برنولي لإيجاد الضغط.

**الحل**: نأخذ $v_2$ في معادلة الاستمراريّة، (المعادلة 10-4) ، كسرعة الجريان في الطابق الثاني، و $v_1$ سرعة الجريان في الأرضيّة. وبما أنّ المساحات تتناسب مع مربع أنصاف الأقطار $(A = \pi r^2)$، فإنّ

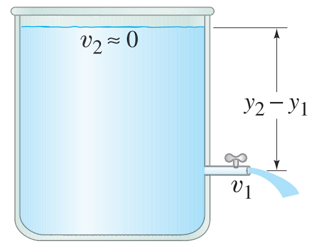
$$v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2} = \frac{v_1 \pi r_1^2}{\pi r_2^2} = (0.50\ \text{m/s})\frac{(0.020\ \text{m})^2}{(0.013\ \text{m})^2} = 1.2\ \text{m/s}$$

ولحساب الضغط في الطابق الثاني؛ نستخدم معادلة برنولي

$$\begin{aligned}
P_2 &= P_1 + \rho g(y_1 - y_2) + \tfrac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \\
&= (3.0 \times 10^5\ \text{N/m}^2) + (1.0 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)(-5.0\ \text{m}) \\
&\quad + \tfrac{1}{2}(1.0 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)[(0.50\ \text{m/s})^2 - (1.2\ \text{m/s})^2] \\
&= (3.0 \times 10^5\ \text{N/m}^2) - (4.9 \times 10^4\ \text{N/m}^2) - (6.0 \times 10^2\ \text{N/m}^2) \\
&= 2.5 \times 10^5\ \text{N/m}^2 = 2.5\ \text{atm}.
\end{aligned}$$

**ملحوظة**: يساهم حدّ السرعة بكمية ضئيلة في هذه الحالة.

## 10-10 تطبيقات على مبدأ برنولي: من تورشللي إلى الطائرات، كرات البيسبول والأسكيمية




**الشكل 24-10** نظرية تورشللي: $v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}$

يمكن تطبيق معادلة برنولي في مواقف عديدة. أحد الأمثلة هو حساب السرعة $v_1$ لسائلٍ يتدفّق من صنبورٍ عند قاعدة خزّان؛ (الشكل 10-24). نختار النقطة 2 في المعادلة 10-4 لتكون السطح العلويّ للسائل. وبفرض أنّ نصف قطر السطح كبيرٌ مقارنةً بنصف قطر الصنبور، فإنّ $v_2$ تساوي صفرًا تقريبًا. النقطتان 1 (الصنبور) و 2 (السطح العلوي) مفتوحتان للجوّ الخارجيّ. لذا، فإنّ الضغط عند النقطتين يساوي الضغط الجوي: $P_1 = P_2$ عندئذٍ، تصبح معادلة برنولي

$$\tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = \rho g y_2$$

أو:

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)} \qquad \textbf{(6-10)}$$

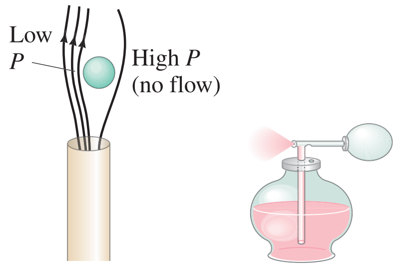
نظرية تورشللي

تُسمّى هذه النتيجة **نظرية تورشللي**. وعلى الرغم من أنّها تبدو حالةً خاصّةً لمعادلة برنولي، إلّا أنّها اكتشفت قبل ذلك بقرنٍ من الزمن على يد إيفانجلستا تورشللي. تشير (المعادلة 10-6)إلى أنّ السائل يخرج من الصنبور بالسرعة نفسها لجسمٍ يسقط سقوطًا حرًّا من على الارتفاع نفسه. ويجب ألّا يبدو هذا غريبًا لأنّ اشتقاق معادلة برنولي يستند إلى قانون حفظ الطّاقة.

وتظهر حالةٌ خاصّةٌ أخرى من معادلة برنولي عندما يتدفّق سائلٌ أفقيًّا من غير تغيّر يُذكر في الارتفاع؛ أي أنّ $y_1 = y_2$ عندئذ تصبح (المعادلة 10-5)

$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad \textbf{(7-10)}$$

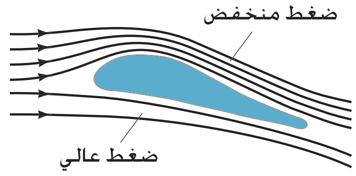
التي تقول لنا بصورةٍ كمّيّة إنّ السرعة تكون عاليةً حيث الضغط منخفضٌ والعكس صحيح. وهذا يفسّر كثيرًا من الظواهر العامة، بعضها موضّح في (الأشكال من 10-25 إلى 10-31) . الضغط في الهواء المنفوخ بسرعةٍ كبيرةٍ عند فوهة بخاخ العطر (الشكل 10-25أ) أقلّ من ضغط الهواء العادي المؤثّر في سطح السائل في القنينة. لذلك، يدفع ضغط الهواء في القنينة العطر إلى أعلى الأنبوب بسبب قلّة الضغط عند الفوهة. يمكن أن تجعل كرة تنس الطاولة تطفو فوق تيّارٍ من الهواء المندفع (بعض المكانس الكهربائيّة يمكن أن تنفث الهواء)، (الشكل 10-25ب)، إذا بدأت الكرة بالابتعاد عن تيار الهواء، فإنّ الضغط الأعلى في الهواء الساكن يدفع الكرة لترجع إلى تيار الهواء.




**الشكل 25-10** أمثلة على معادلة برنولي: (أ) البخاخ، (ب) كرة التِّنس في تيار الهواء.

### جناحا الطائرة والرفع الديناميكي

**الشكل 26-10** رفع جناح الطائرة. نحن في الإطار المرجعي على الجناح، ونرى مرور الهواء حولنا.



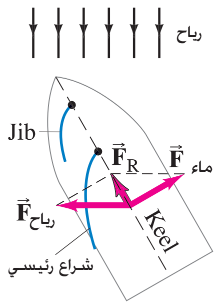

تتأثر الطائرات بقوّة "رفع" على جناحيها، تبقيها عاليةً في الهواء، إذا كانت تتحرّك بسرعةٍ عاليةٍ بالنسبة إلى الهواء، ويرفع الجناح نحو الأعلى بزاويةٍ صغيرة "زاوية الهجوم"، كما في (الشكل 10-26) ؛ حيث خطوط التيّار الهوائيّ تندفع بالقرب من الجناح. (نحن في المستوى المرجعيّ للجناح، كما لو كنّا نجلس على الجناح.) إنّ الانحناء إلى الأعلى بالإضافة إلى التدوير في الحافّة العليا للجناح يسبّب دَفْعَ خطوط التيّار إلى الأعلى لتتجمّع فوق الجناح. المساحة بين خطوط الجريان لتدفّق الهواء بين أيّ خطيّ جريان سوف تقلّ كلّما اقتربت الخطوط من بعضها. وبالرجوع إلى معادلة الاستمراريّة $(A_1 v_1 = A_2 v_2)$، فإنّ سرعة الهواء تزداد فوق الجناح؛ لأنّ السرعة فوقه أعلى من السرعة تحته. لذا، يكون الضغط أقلّ فوقه من الضغط تحته (مبدأ برنولي). وعليه، فإنّ هناك قوّةً محصّلة نحو الأعلى على الجناح تُسَمّى **الرفع الديناميكي**. تشير التجارب إلى أنّ سرعة الهواء فوق الجناح تصل إلى ضعف السرعة تحته. (الاحتكاك بين الهواء والجناح يولّد قوّة انسياقٍ نحو الخلف، يجب التغلّب عليها بواسطة المحرّكات).

تطبيق الفيزياء
الطائرات والرفع الديناميكي

الجناح المنبسط، أو ذلك ذو المقطع المتماثل، سوف يتأثّر بالدفع ما دام الجزء الأماميّ للجناح مائلًا إلى الأعلى (زاوية الهجوم والمواجهة). وسوف يتأثّر الجناح المبيّن في (الشكل 10-26) بالرفع حتى لو كانت زاوية المواجهة صفرًا؛ لأنّ السطح العلويّ المدوّر سوف يدفع الهواء نحو الأعلى، ضاغطًا خطوط الجريان على بعضها. ويمكن أن تطير الطائرات مقلوبة، متأثّرةً بالرفع، إذا كانت زاوية المواجهة كافيةً لانحراف خطوط المواجهة نحو الأعلى ومتقاربةً من بعضها.

تأخذ الصورة الخطوط الإنسيابية بعين الاعتبار، لكن إذا كانت زاوية المواجهة أكبر من $15^o$ ، فسينشأ جريان اضطرابي (الشكل 10-19ب) يؤدي إلى قوى جرٍّ نحو الخلف وأقلّ قوّة رفع، وهذا يسبّب انهيار الجناح وسقوط الطائرة.

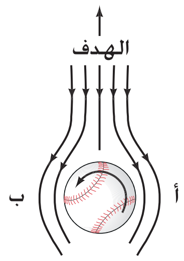
ومن جهةٍ أخرى، فإنّ ميل الجناح إلى الأعلى يعني أنّ الهواء المتحرّك أفقيًّا أمام الجناح للأسفل: إنّ التغيّر في زخم جزيئات الهواء المرتدّة يؤدّي إلى قوّةٍ نحو الأعلى على الجناح (قانون نيوتن الثالث).



**الشكل 10-27** يبحر القارب الشراعي ضد الرياح.

## القوارب الشراعية

بوضع الشراع بزاوية، كما هو مبين في (الشكل 10-27) . يتحرّك الهواء بسرعة فوق السطح الأمامي المنتفخ للشراع، والهواء الساكن نسبيًّا خلف الشراع يولّد ضغطًا أكبر، ممّا ينتج قوّةً محصّلةً على الشراع، $\vec{F}_{wind}$. هذه القوّة ستؤدّي بالقارب إلى التحرّك بصورةٍ جانبيّةٍ لولا وجود العارضة الرئيسة الممتدة رأسيًّا من أسفل القارب تحت الماء. يولّد الماء قوّةً عموديّةً تقريبًا على العارضة الرئيسة. والقوّة المحصّلة للقوّتين ($\vec{F}_R$) تكون موجّهةً نحو الأمام كما هو مبيّن.



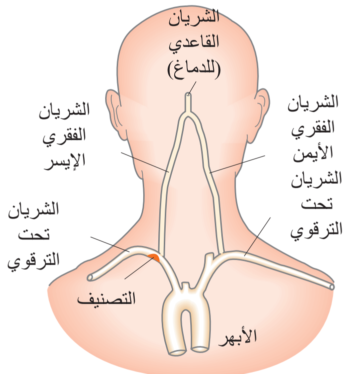
**الشكل 10-28** النظر إلى الأسفل على كرة بيسبول مقذوفة نحو الهدف. نحن في المرجع المرافق للكرة، والهواء يمر بجانبنا.

## التفاف كرة (القاعدة) البيسبول

لماذا يمكن تفسير التفاف كرة البيسبول التي تدور في أثناء قذفها (أو كرة التّنس) باستخدام مبدأ برنولي. ومن السهل وضع أنفسنا في مرجع كرة البيسبول، والهواء يندفع حولنا، مثلما أوردنا عند الحديث عن جناح الطائرة.

افرض أنّ الكرة تدور بعكس اتجاه عقارب الساعة إذا نظرنا إليها من الأعلى، (الشكل 10-28). هناك طبقةٌ رقيقةٌ من الهواء (الطبقة على الحدود) تجري مع الكرة. وننظر إلى الكرة نحو الأسفل عند النقطة $A$، (الشكل 10-28)، هذه الطبقة الحدّيّة تؤدّي إلى إبطاء الهواء القادم. وعند النقطة $B$ ، فإنّ الهواء الذي يدور مع الكرة يضيف سرعته إلى سرعة الهواء القادم. لذا، فإنّ سرعة الهواء عند $B$ أكبر ممّا هي عليه عند $A$. وتعني السرعة الأعلى عند $B$ أنّ الضغط أقلّ عند $B$ مما هو عليه عند $A$، وهذا ينتج قوّةً محصّلة نحو $B$. وهكذا ينحني مسار الكرة نحو اليسار (كما يبدو للرامي).

**الشكل 10-29** خلف الرأس والكتف تظهر الشرايين المؤدية إلى الدماغ والذراعين. سرعة الدم العالية عند تفرع الشريان تحت الترقوة الأيسر بسبب نقص الضغط، يؤدي إلى جريان دم عكسي (نحو الأسفل) وهذا ينتج TIA (الأسكيمية).

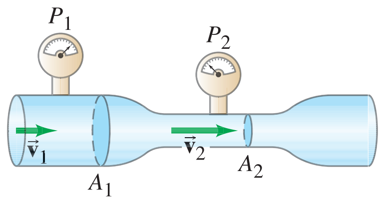



## نقص الدم الوارد إلى الدماغ-TIA (الأسكيمية العابرة)

في الطبّ، أحد تطبيقات مبدأ برنولي هو تفسير TIA (الأسكيمية العابرة)، وهي نقص ورود الدم إلى الدماغ بصورةٍ مؤقّتة. الشخص الذي يعاني من TIA يعاني أعراضًا، مثلَ: الدوّار، الرؤية المزدوجة، ألم في الرأس، ضعف في الأطراف. ويمكن أن تحدث TIA كما يلي: يتدفّق الدم عادةً إلى الدماغ من الخلف عبر اثنين من الأورطة الفقاريّة – كلّ واحد على أحد جانبي الرقبة – التي تتحد لتكون الأورطة تحت الدماغ مباشرة، (الشكل 10-29) . تصدر الأورطة الفقاريّة عن الشريان تحت الترقوي قبل أن يذهب الأخير إلى الذراع. عندما يتمّ تدريب الذراع بشدة، فإنّ الدم يندفع بقوّةٍ لتلبية حاجة عضلات الذراع. إذا كان أحد الشريانين تحت الترقوي مغلقًا جزئيًّا (تصلّب الشريان)، فستكون سرعة الدم أكبر على هذا الجانب لتزويد الدم اللازم. (تذكّر معادلة الاستمرارية: مساحة أقلّ تعني سرعة أكبر). لكن السرعة الزائدة قرب فتحة الأورطة الفقاري تؤدّي إلى ضغط أقلّ (معادلة برنولي). وهكذا، فإنّ الدم المرتفع في الأورطة "الجيدة" سوف ينحرف ليذهب إلى الأورطة الأخرى؛ حيث الضغط هناك أقلّ، بدل أن يذهب إلى الدماغ. وهكذا يقلّ تزويد الدم للدماغ.

### تطبيقات أخرى

**أنبوب فينتوري** هو في الأساس أنبوب يحتوي على جزءٍ ضيّقٍ (الحنجرة). يتسارع الهواء المتدفّق عند مروره عبر هذا الاختناق، ولذلك يكون الضغط منخفضًا عبر هذه الحنجرة. يُستعمل مقياس فينتوري (الشكل 10-30) لقياس سرعة جريان الغازات والسوائل بما في ذلك سرعة الدم في الشريان.




**الشكل 10-30** مقياس فينتوري

لماذا يرتفع الدخان في المدخنة؟ إنّ ذلك يعود جزئيًّا إلى أنّ الهواء الساخن يرتفع (لأنّه أقلّ كثافةً ولذلك يطفو). ولكن مبدأ برنولي له دورٌ كذلك. عندما تهبّ الرياح قرب فوّهة المدخنة، فإنّ الضغط هناك أقلّ من داخل البيت. وهكذا يدفع الهواء والدخان إلى أعلى المدخنة بواسطة الضغط العالي داخل البيت. حتى في الليالي التي يكون فيها الهواء ساكنًا، فإنّ هناك حركةً كافيةً للهواء قرب قمّة المدخنة تكفي لدفع الهواء والدخان إلى الأعلى.

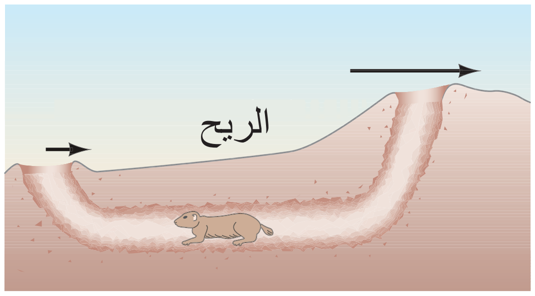
**تطبيق الفيزياء**

الدخان نحو أعلى المدخنة.

إذا كان على السلحفاة الأمريكيّة، وكلب المروج، والأرانب والحيوانات الأخرى التي تعيش في جحورٍ تحت الأرض، أن تتجنب الاختناق، فيجب أن يدور الهواء في جحورها. تحتوي هذه الجحور على الأقلّ على مدخلين (الشكل 10-31)، وتختلف سرعة جريان الهواء عبر الفتحات المختلفة. وهذا ينتج اختلافًا طفيفًا في الضغط يدفع جريان الهواء عبر الجحور بسبب مبدأ برنولي. يكون جريان الهواء قويًّا إذا كانت إحدى الفتحات أعلى من الأخرى (تبنى الحيوانات عادة كومة صغيرة)؛ لأنّ سرعة الهواء تزداد مع الارتفاع.

**تطبيق الفيزياء**

دورة الهواء تحت الأرض للحيوانات التي تعمل الجحور.



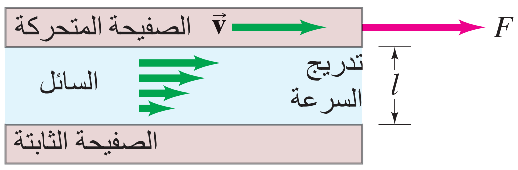

**الشكل 10-31** يفسر مبدأ برنولي جريان الهواء في الجحور تحت الأرض.

تهمل معادلة برنولي آثار الاحتكاك (اللزوجة) وقابليّة المائع للانضغاط. إنّ الطاقة التي تتحوّل إلى طاقةٍ داخلية (أو طاقة وضع) بسبب الانضغاط وطاقةٍ حراريّةٍ بسبب الاحتكاك يمكن أخذها بالحسبان بإضافة حدودٍ جديدةٍ إلى (المعادلة 10-5). هذه الحدود يصعب حسابها نظريًّا. لذا، يتمّ تحديدها تجريبيًّا. إنّها لا تؤثّر بصورةٍ مهمةٍ في التفسيرات الواردة أعلاه للظواهر المختلفة.

## * 10-11 اللزوجة

إنّ الموائع الحقيقية لديها مقدارٌ معيّنٌ من الاحتكاك الداخليّ بين الجزيئات يُدعى اللزوجةَ، كما ذكرنا في (البند 10-8). توجد اللزوجة في السوائل والغازات، وهي في الواقع قوّة احتكاك بين الطبقات المتجاورة للمائع عندما تتحرّك واحدةٌ بالقرب من الأخرى. وفي السوائل، تعود اللزوجة إلى قوى كهربائيّةٍ لاصقةٍ بين الجزيئات. وتوصف اللزوجة عادةً بواسطة معامل اللزوجة $\eta$، (الحرف اليوناني الصغير إيتا)، الذي يُعرف بالطريقة الآتية: تُوضع طبقةٌ رقيقةٌ من المائع بين صفيحتين. تبقى إحدى الصفيحتين ثابتة، في حين يسمح للأخرى بالحركة. (الشكل 10-32). المائع الملامس مباشرةً لكلّ صفيحةٍ يمسك بالصفيحة بواسطة قوى الالتصاق بين جزيئات كلٍّ من المائع والصفيحة. وهكذا يتحرّك السطح العلويّ للمائع بالسرعة $v$ نفسها التي تتحرك بها الصفيحة العليا، في حين يبقى الجزء الملامس للصفيحة الساكنة ساكنًا. الطبقة الساكنة من المائع تعيق حركة الطبقة التالية الملاصقة لها التي تعيق الطبقة اللاحقة لها، وهكذا. لذا، تتغيّر السرعة من صفر إلى $v$ كما هو مبين. وتُسمّى الزيادة في السرعة على المسافة التي يحصل خلالها هذا التغيّر تدرّج السرعة $v/l$. وقد وُجد لسائل ما أنّ القوّة اللازمة لتحريك الصفحة العليا التي تُدعى $F$ تتناسب مع مساحة سطح المائع الملاصق لها $A$ والسرعة "$v$" وعكسيًّا مع البعد بين الصفيحتين $F \propto vA/l$ وللموائع المختلفة، كلّما كان المائع أكثر لزوجةً كانت القوّة اللازمة أكبر.

**الشكل 10-32**
تحديد اللزوجة



وهكذا، يعرف ثابت التناسب في هذه المعادلة بمعامل اللزوجة، $\eta$

$$F = \eta A \frac{v}{l} \tag{8-10}$$

وإذا كتبنا المعادلة بدلالة $\eta$، فإنّنا نجد $\eta = Fl/vA$ الوحدة الدوليّة لـ $\eta$ هي $N.s/m^2 = Pa$ (باسكال. ثانية) في نظام $cgs$ الوحدة هي $dyne.s/cm^2$ التي تُدعى عادة بـ بويز (P). تُعطى اللزوجات عادة بـ $(1\ cP = 10^{-2}\ P)$ *centiposise* . يبين (الجدول 10-3)معامل اللزوجة لموائع مختلفة، وكذلك درجة الحرارة محددة؛ لأنّ لها أثرًا قويًّا. وتقل لزوجة السوائل، مثل زيت السيارات مثلًا، بسرعةٍ مع زيادة درجة الحرارة**.

**الجدول 10 - 3 معاملات اللزوجة**

| المائع (درجة الحرارة °C) | معامل اللزوجة η(Pa.s)* |
|---|---|
| الماء (°0) | $1.8\times10^{-3}$ |
| (°20) | $1\times10^{-3}$ |
| (°100) | $0.3\times10^{-3}$ |
| الدم (°37) | $\approx4\times10^{-3}$ |
| بلازما الدم (°37) | $\approx1.5\times10^{-3}$ |
| كحول الإيثايل (°20) | $1.2\times10^{-3}$ |
| زيت الموتور (°30) | $200\times10^{-3}$ |
| (SAE 10) | $1500\times10^{-3}$ |
| جليسرين (°20) | $0.018\times10^{-3}$ |
| الهواء (°20) | $0.009\times10^{-3}$ |
| الهيدروجين (°0) | $0.013\times10^{-3}$ |
| بخار الماء (°100) | |

* 1 Pa.s = 10 P = 1000 cP

## * 12-10 الجريان في الأنابيب؛ معادلة بوسيلي، جريان الدم

إذا كان المائع عديم اللزوجة، فإنّه يجري عبر أنبوبٍ مستوٍ دون الحاجة إلى قوّة تدفعه. تؤثّر اللزوجة كنوع من الاحتكاك. لذا، فمن الضروري وجود فرقٍ في الضغط بين نهايتي أنبوبٍ مستوٍ لاستمرار الجريان لأيّ مائع حقيقي، سواءً أكان ماءً أم زيتًا في أنبوب، أم دمًا في الدورة الدموية للإنسان.

إنّ معدّل جريان المائع في أنبوبٍ مثنيٍ يعتمد على لزوجة المائع، وفرق الضغط، وأبعاد الأنبوب. لقد حدّد العالِم الفرنسي بوسيلي (1799-1869)، الذي كان مهتمًّا بفيزياء دورة الدم (الذي سُمِّيت وحدة اللزوجة "بويز" تكريمًا له)، كيفيّةَ تأثير المتغيرات في معدّل الجريان لمائع غير قابلٍ للانضغاط ويجري انسيابيًّا عبر أنبوبٍ أسطواني.

تُعرف نتيجته بمعادلة بوسيلي، وهي

معادلة بوسيلي لمعدل الجريان عبر أنبوب.

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} \tag{9-10}$$

حيث $R$ نصف القطر الداخليّ للأنبوب، و $L$ طول الأنبوب، و$P_1 - P_2$ الفرق في الضغط بين نهايتيه، و $\eta$ معامل اللزوجة، و $Q$ معدّل الجريان الحجمي (حجم المائع المار عبر نقطةٍ في الثانية).
(المعادلة 10-9) تنطبق على الجريان الانسيابيّ فقط.

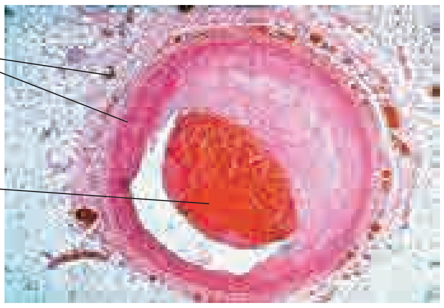
تطبيق الفيزياء

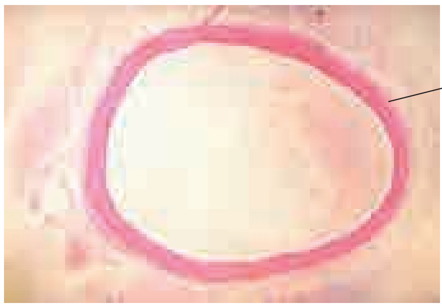
الطب – جريان الدم وأمراض القلب.

تخبرنا معادلة بوسيلي أنّ معدّل الجريان $Q$ يتناسب مع تدرّج الضغط $(P_1 - P_2)/L$، ويتناسب عكسيًّا مع لزوجة المائع. وهذا بالضبط ما نتوقعه. ولكن قد يكون غريبًا اعتماد $Q$ على القوّة الرابعة لنصف قطر الأنبوب. إنّ هذا يعني أنّه للتدرّج نفسه في الضغط، لو نقص نصف قطر الأنبوب إلى النصف، فإنّ معدل الجريان ينقص كنسبة 16؛ أي أنّ معدل الجريان يتأثّر بشدّةٍ عند تغيّرٍ طفيفٍ في نصف القطر.

مثالٌ مهمٌّ لهذا العامل $R^4$ هو جريان الدم في جسم الإنسان. تنطبق المعادلة السابقة على جريانٍ انسيابيٍّ لمائع غير انضغاطيٍّ وبمعامل لزوجة ثابت. لذلك، لا تكون المعادلة دقيقةً لدمٍ جريانه لا يخلو من الاضطراب، والذي يحتوي على خلايا دم (قطرها يساوي قطر الأنبوب تقريبًا). لذا، تعتمد $\eta$ - إلى درجةٍ معيّنة - على سرعة جريان الدم $v$. ومع ذلك تعطي معادلة بوسيلي جريان الدم بواسطة عضلات تحيط بالشرايين. إنّ انقباض هذه العضلات يقلّل القطر لأيّ شريان، وبسبب الحد $R^4$ في (المعادلة 10-9)، يقلّ معدّل الجريان بشدّةٍ لأيّ تغيّرٍ طفيفٍ في نصف القطر.

** تشير جمعية المهندسين الميكانيكيين إلى أرقامٍ تمثّل لزوجة الزيوت: فمثلًا ( $SA\ E\ 30$) أكثر لزوجة من $10wt$. الزيوت متعدّدة الدرجات، مثل 20-50 تعني اللزوجة عند تغيّر درجة الحرارة. فمثلًا، 20 تعني اللزوجة عندما يكون ساخنًا، و50 عندما يكون باردًا.

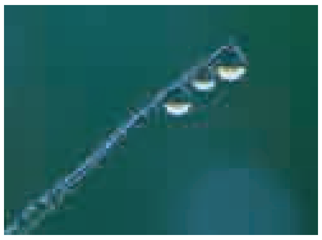



**الشكل 10-33** المقطع العرضي لشريان شخص (أ) سليم. (ب) مغلق جزئيا بسبب التصلب.

سنتناول الآن موضوعًا آخر، وهو أنّ نصف قطر الشرايين ينقص بسبب تصلبها (الشكل 10-33) وتراكم الكولسترول. فعند حدوث ذلك، لا بدّ من زيادة تدرّج الضغط للحصول على المعدّل نفسه لجريان الدم. إذا نقص نصف القطر إلى النصف، فعلى القلب زيادة تدرّج الضغط بمعدّل 16 مرّةً للوصول إلى المعدّل نفسه لجريان الدم. وعلى القلب العمل بمجهودٍ أكبر بكثيرٍ تحت هذه الظروف، ولكنّه لا يستطيع الوصول إلى معدّل جريان الدم الأصليّ عادةً. لذلك، فإنّ ارتفاعَ ضغط الدم مؤشّرٌ على أنّ القلب يعمل أكثر، وأنّ معدّل جريان الدم أقلّ.

## * 10-13 التوتر السطحي والخاصية الشعرية



**الشكل 10-34** قطارات الماء الكروية، الندى على نصل ورقة عشب.

التوتر السطحي

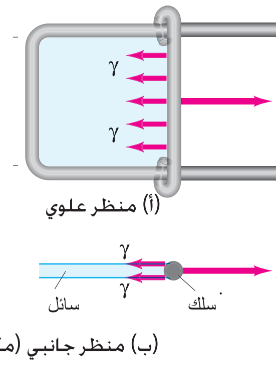
يتصرّف سطح السائل الساكن بطريقةٍ مثيرةٍ للاهتمام، تقريبًا كما لو كان غشاءً مطوطًا تحت الشدّ. ومثال ذلك، قطرة ماءٍ عند نهاية صنبورٍ آخذٍ في التنقيط، أو قطرة ندى معلّقة بنهاية فرع نبتةٍ في الصباح الباكر (الشكل 10-34)، تتشكّل بصورةٍ كرويّةٍ تقريبًا كما لو كانت بالونًا صغيرًا مملوءًا بالماء. يمكن أن تجعل إبرةً من الفولاذ تطفو على سطح الماء رغم أنّها أكثر كثافةً منه. يتصرف سطح السائل كما لو كان مشدودًا، وهذا الشدّ الذي يعمل في السطح ناتج من قوى التجاذب بين الجزيئات. يُسَمّى هذا الأثرُ **التوترَ السطحيّ**. وبتحديدٍ أكبر، هناك كميّةٌ تُسَمّى التوتّر السطحي $\gamma$ (الحرف اليوناني الصغير جاما) تُعرف بالقوّة $F$ لكلّ وحدة طول $L$ التي تؤثّر عموديًّا في أيّ خطٍ أو قطعٍ في سطح السائل، تؤدّي إلى غلق السطح

$$\gamma = \frac{F}{L}. \tag{10-10}$$

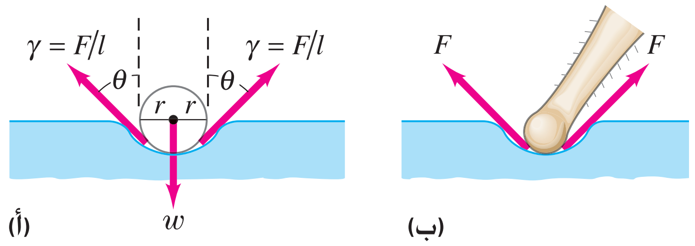
لفهم ذلك: افترض الأداة على شكل حرف $U$ المبيّنة في (الشكل 10-35)، التي تحتوي على غشاءٍ رقيقٍ من السائل. بسبب التوتّر السطحي، تلزم قوّة $F$ لسحب السلك القابل للحركة، ومن ثمّ زيادة مساحة سطح السائل. إنّ السائل داخل هذا الإطار من السلك هو غشاءٌ رقيقٌ له سطحٌ علويٌّ وآخر سفلي. وهكذا، فإنّ طول السطح يكون قد زاد بـ $2L$، والتوتّر السطحيّ هو $\gamma = F/2L$ . إنّ أداةً بسيطةً كهذه يمكن استعمالها لقياس معامل التوتر السطحيّ لسوائل متفرّقة. يساوي التوتّر السطحيُّ للماء $0.072\text{N/m}$ عند درجة $20°\text{C}$. (الجدول 10-4) يعرض التوتّر السطحيّ لعدّة سوائل. لاحظ أنّ لدرجة الحرارة تأثيرًا مهمًّا في التوتّر السطحيّ.

وبسبب التوتّر السطحيّ، تستطيع بعض الحشرات (الشكل 10-36) أن تسير على الماء، كما أنّ أجسامًا كثافتها أكبر من كثافة الماء، مثل إبرة فولاذية تستطيع أن تطفو فوق سطح الماء.

**الشكل 10-35** جهاز سلك له شكل U يمسك غشاء من السائل لقياس التوتر السطحي.




**الشكل 10-36** حشرة على سطح الماء.




**الشكل 37-10** التوتر السطحي يؤثر في: (أ) كرة . (ب) ساق حشرة، (المثال 10-14).

الشكل 10-37 أ يبيّن كيف أنّ التوتّر السطحيّ يمكن أن يحمل وزنًا لجسم مقداره $w$. في الواقع يغطس الجسم قليلًا في المائع، لذلك $w$ هي "الوزن الفاعل" لذلك الجسم – إنّه وزنه الحقيقيّ مطروحًا منه قوّة الطفو.

## المثال 10-14 قدّر حشرة تمشي على الماء

قاعدة رِجل الحشرة كرويّة الشكل تقريبًا، وبنصف قطر حوالي $2.0\times10^{-5}$ m. كتلة الحشرة $0.003g$ محمولة بالتساوي على ستّ أرجل . خمّن الزاوية $\theta$ (انظر الشكل 10-37) لحشرةٍ على سطح الماء. افرض أنّ درجة حرارة الماء تساوي $20^oC$.

**النّهج**: بما أنّ الحشرة متّزنةٌ، فإنّ قوّة التوتّر السطحيّ نحو الأعلى تساوي قوّة سحب الجاذبيّة نحو الأسفل على كلّ رِجل.

**الحلّ**: نفرض أنّ لكلّ رِجل قوّة توترٍ سطحيٍّ تؤثّر حول دائرةٍ نصف قطرها $r$ عند زاوية $\theta$، كما هو مبين في (الشكل 10-37). إنّ المركبة الرأسيّة، $\gamma \cos\theta$، فقط هي التي تؤثّر بحيث توازن $mg$. لذلك، نضع الطول $L$ في (المعادلة 10-10) يساوي محيط الدائرة، $L \approx 2\pi r$، ثمّ تكون القوّة المحصّلة نحو الأعلى بسبب التوتّر السطحيّ كما يلي:

$F_y \approx (\gamma\cos\theta)L \approx 2\pi r\gamma\cos\theta$. ومن ثمّ نعوّض هذه القوّة بحيث تساوي سدس وزن الحشرة؛ لأنّ لها ستّ أرجل:

$$2\pi r\gamma\cos\theta \approx \tfrac{1}{6}mg$$

$$(6.28)(2.0\times10^{-5}\,\text{m})(0.072\,\text{N/m})\cos\theta \approx \tfrac{1}{6}(3.0\times10^{-6}\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)$$

$$\cos\theta \approx \frac{0.49}{0.90} = 0.54.$$

لذلك $\theta \approx 57°$ لو كان $\cos\theta$ أكبر من 1، فإنّ التوتّر السطحيّ لا يكون كافيًا لدعم وزن الحشرة.

**ملحوظة**: إنّ تقريبنا يهمل قوّة الطفو، كما يهمل أيّ فرقٍ بين نصف قطر "رِجل" الحشرة، ونصف قطر انخفاض السطح.

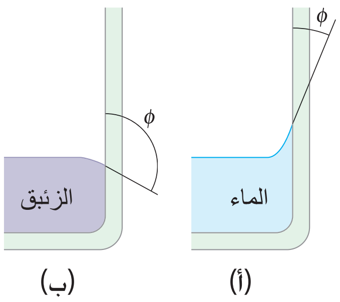
إنّ الصابون والمنظفات تقلّل التوتّر السطحي للماء؛ وهذا ضروريٌّ للغسيل والتنظيف؛ لأنّ التوتّر السطحيّ الكبير للماء النقي يمنعه من التغلغل بسهولةٍ بين خيوط المادة والشقوق الصغيرة. يؤدي التوتّر السطحيّ دورًا في ظاهرةٍ أخرى مهمّة، وهي الخاصيّة الشعريّة. إنّها مشاهدةٌ عامة، حيث يرتفع الماء في وعاءٍ زجاجيٍّ قليلًا يلامس الزجاج، (الشكل 10-38أ). يقال إنّ الماء "يرطّب" الزجاج. وفي المقابل، ينخفض الزئبق عند نقطة تلامسه مع الزجاج، (الشكل 10-38)ب، الزئبق لا يرطب الزجاج. هل يرطب السائل السطح الصُّلب؟ الحلّ هو أنّ هذا يعتمد على قوّة ترابط جزيئات الوعاء. ويعود الترابط إلى جزيئات السائل مع جزيئات الوعاء. إنّ الترابط يعود إلى جزيئات من النوع نفسه، أمّا الالتصاق، فيعود إلى القوّة بين جزيئاتٍ من نوعين مختلفين. الماء يرطّب الزجاج؛ لأنّ قوّة التصاق جزيئات الماء مع الزجاج أكبر من قوّة ترابط جزيئات الماء ببعضها. والعكس صحيحٌ بالنسبة للزئبق؛ لأنّ قوى الترابط أقوى من قوّة الالتصاق.

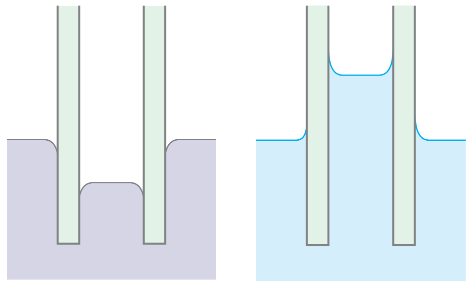
**الجدول 10-4**
**كثافة بعض المواد**

| المادة | التوتر السطحي (N/m) |
|---|---|
| الزئبق (20°C) | 0.44 |
| الدم (37°C) | 0.058 |
| بلازما الدم (37°C) | 0.073 |
| كحول الإيثايل (20°C) | 0.023 |
| الماء (0°C) | 0.076 |
| الماء (20°C) | 0.072 |
| الماء (100°C) | 0.059 |
| البنزين (20°C) | 0.029 |
| محلول الصابون (20°C) | ≈ 0.025 |
| الأكسجين (-193°C) | 0.016 |

### تطبيق الفيزياء
الصابون و المنظفات
الخاصية الشعرية

**الشكل 10-38** الماء (أ) "يرطب" سطح الزجاج، ولكن (ب) الزئبق لا "يرطب" الزجاج.





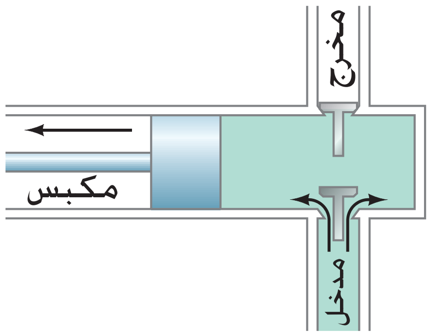

**الشكل 39-10** الخاصية الشعرية

في الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة جدًّا، يُلاحظ أنّ السوائل قد ترتفع أو تنخفض بالنسبة إلى مستوى السائل المحيط. تُسَمَّى هذه **الظاهرةُ "الخاصيةَ الشعرية"**، وهذه الأنابيب الدقيقة تُسَمّى **الأنابيبَ الشعرية**. هل سيرتفع السائل أم سينخفض؟

(الشكل 10-39) يعتمد هذا على النسبة بين قوّتي الترابط والالتصاق. وهكذا يرتفع الماء في أنبوبٍ زجاجيٍّ، في حين ينخفض الزئبق. إنّ المقدار الفعليّ للارتفاع (أو الانخفاض) يعتمد على التوتّر السطحيّ الذي يقي سطح السائل من التمزّق.

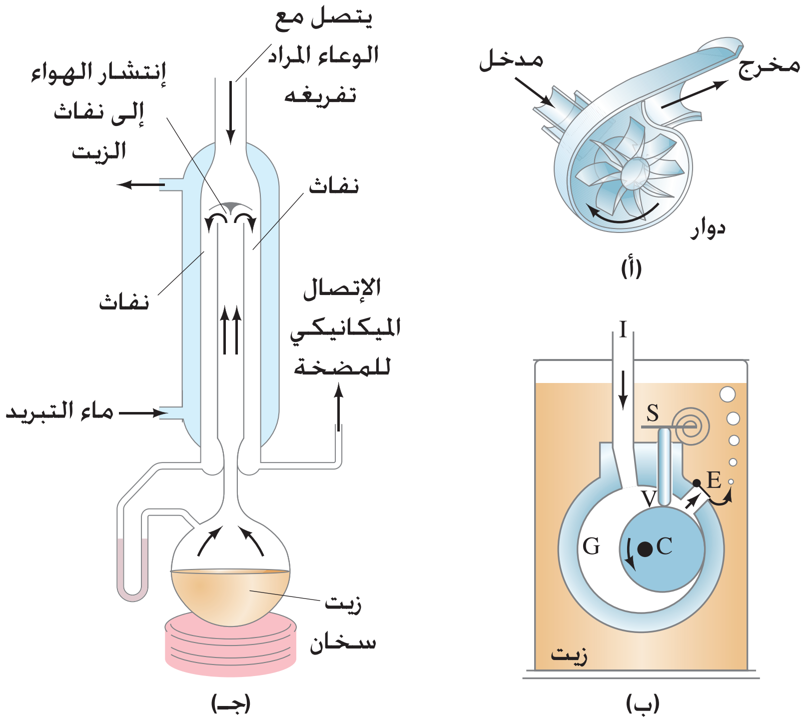
## * 14-10 المضخات، والقلب

نختم هذا الفصل بمناقشةٍ مختصرةٍ للمضخّات بأنواعها المختلفة، بما في ذلك القلب. يمكن تصنيف المضخّات تبعًا لوظيفتها. إنّ "مضخة التفريغ" مصمّمةٌ بحيث تعمل على تقليل ضغط الهواء في وعاءٍ معيّن. أمّا المضخّة الكابسة بالمقابل فهي تعمل على زيادة الضغط، كرفع سائل (كالماء من بئر)، أو دفع مائع في أنبوب. ويوضح (الشكل 10-40) المبدأ وراء عمل مضخّة "عاكسة" بسيطة. يمكن أن تكون مضخّة بحيث يتصل المدخل بالوعاء المراد تفريغه. تُستخدم ميكانيكيّةٌ مماثلةٌ في بعض المضخّات الكابسة، في هذه الحالة، يدفع السائل تحت زيادة الضغط إلى المخرج.

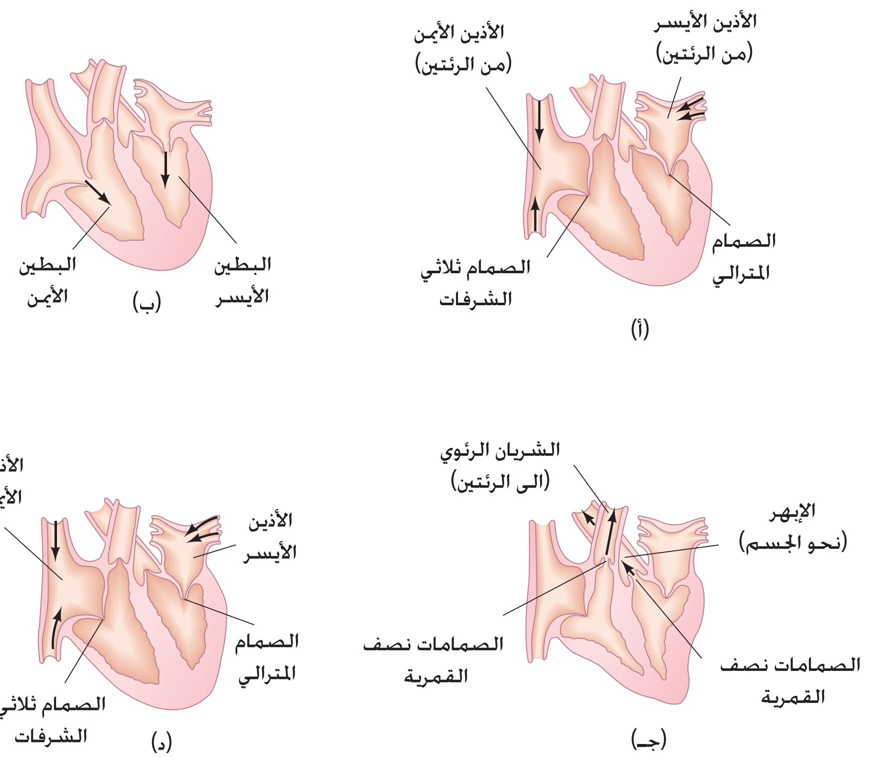



**الشكل 40-10** نوع من المضخات: يفتح صمام المدخل والهواء (أو المائع المراد ضخه)، يملأ الحيز الفارغ عندما يتحرك المكبس نحو اليسار. وعندما يتحرك المكبس نحو اليمين (ليس مبينا هنا) يفتح صمام المخرج ويدفع المائع إلى الخارج.

أنواعٌ أخرى من المضخّات مبيّنة في (الشكل 10-41). ويمكن استعمالُ مضخّة الطرد المركزي، أو أيّ مضخّة قوّة، مضخّةً دوارةً؛ أي لإدارة سائل حول مسار مغلق ، مثل ماء التبريد أو زيت التشحيم في السيارة.




**الشكل 41-10.** أ مضخة الطرد المركزي. تدفع النصول الدوارة المائع عبر أنبوب الخروج. يستخدم هذا النوع من المضخات في المكانس الفراغية، أو مضخة الماء في السيارة (ب) تستعمل مضخة الزيت المحصور للحصول على تفريغ بحدود $10^{-4}$ mm-Hg : الغاز (عادة الهواء) من الوعاء المراد تفريغه ينتشر إلى الحيز G عبر أنبوب الأخذ؛ الأسطوانة الدوارة غير المركزة C تحصر الغاز الذي في G وتحمله لتدفعه عبر صمام العدم E، وخلال هذا المنزلقv V في حالة تماس مع C بواسطة الزنبرك S، وهذا يمنع الغاز من العودة إلى G. (جـ) تستخدم مضخة الانتشار للوصول إلى تفريغ يصل إلى $10^{-8}$ mm-Hg: جزيئات الهواء من الوعاء المراد تفريغه تنتشر إلى النفاث؛ حيث يجرّ دفقا من الزيت المدفوع بسرعة الجزيئاتِ بعيدا. نحتاج عادة إلى "مضخة قبل مضخة الانتشار"، وتكون عادة مضخة ميكانيكية (دوارة) (ب)؛ وتعمل كمرحلة أولى في تقليل الضغط.




**الشكل 10-42** (أ) في طور (مرحلة) الانبساط، يرتخي القلب بين الضربات. يتحرك الدم إلى القلب ويمتلىء الأذينان بسرعة. (ب) وعند انقباض الأذين، يبدأ طور الانقباض أو الضّخّ. يدفع الانقباض الدم عبر الصمّام التاجيّ وثلاثيّ الأطراف إلى البطينين. (جـ) يدفع انقباض البطينين الدم خلال الصمّام الهلالي إلى الشريان الرئوي، الذي يصل بدوره إلى الرئتين والأورطي (أكبر شريان في الجسم)، الذي يصل إلى الشرايين التي تخدم الجسم كلّه. (د) وعند انبساط القلب، تغلق الصمّامات الهلاليّة، ثمّ يملأ الدم الأذينين لتبدأ الدورة من جديد.

**تطبيق الفيزياء**

القلب كمضخة

إنّ قلب الإنسان (والحيوانات الأخرى كذلك) هو في الأساس مضخّةٌ دوّارة. عمل قلب الإنسان مبين في (الشكل 10-42). وهناك في الواقع، ممرّان منفصلان لجريان الدّم: المجرى الأطول ينقل الدّم إلى أجزاء الجسم، عبر الشرايين؛ ليجلب الأكسجين إلى أنسجة الجسم وليأخذ ثاني أكسيد الكربون، ومن ثَمَّ يعيده إلى القلب بواسطة الأوردة، ثم يضخّ هذا الدم إلى الرئتين (الممرّ الثاني)؛ حيث يطلق ثاني أكسيد الكربون ويأخذ الأكسجين. ثم يُعاد الدّم المحمل بالأكسجين إلى القلب، ليُضخّ ثانيةً إلى أنسجة الجسم.

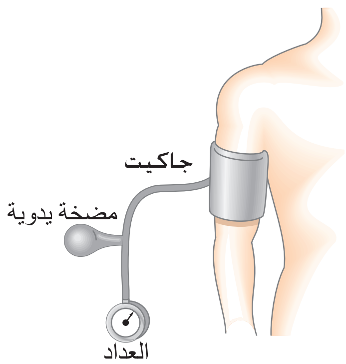
**تطبيق الفيزياء**

*ضغط الدم*

يقاس ضغط الدّم باستعمال مانوميتر زئبقي أو أحد الأنواع الأخرى المذكورة سابقًا (البند 10-6)، ويدرّج عادة بـ mm-Hg. يوصل المقياس إلى غلافٍ مملوءٍ بالهواء، ومغلق يُلفّ حول الذراع العلويّ في مستوى القلب، (الشكل 10-43). تُقاس قيمتان لضغط الدّم هما: 1- الضغط الانقباضيّ وهو الضغط الأقصى عندما يضخّ القلبُ الدّمَ. 2- الضغط الانبساطيّ الذي يكون فيه القلب في حالة استرخاء. في البداية، يُزاد الضغط داخل الغلاف فوق الضغط الانقباضي بواسطة مضخّة يدويّة، وهذا يضغط الشريان الرئيس في الذراع، ويُقطع جريان الدّم لفترةٍ وجيزة. ثمّ يُخفّف ضغط الهواء تدريجيًّا حتى يبدأ الدّم ثانيةً بالجريان عبر الذراع، ويُكشف عن ذلك بواسطة سماعة* حتى سماع النبضات المعتادة للدّم الذي يتدفّق نحو أسفل الذراع. في هذه اللحظة، يساوي الضغطُ الانقباضيّ ضغطَ الهواء في الغلاف، الذي يقرأ من التدريج. ثم يستمرّ تخفيض الضغط في الغلاف، ويختفي صوت النبضات عندما يدخل الدّم إلى الشريان. عندها يشير المقياس إلى الضغط الانبساطي. الضغط الانقباضي حوالي 120 mm-Hg، أمّا الضغط الانبساطي والطبيعي فهو 80 mm-Hg تقريبا.

* عندما يبدأ الدم بالجريان عبر الاختناق (التضيق) الناتج من الغلاف المضغوط، تكون سرعته عالية والجريان اضطرابيا: إنه الاضطراب الذي يسبب صوت النبضات.

**الشكل 10-43** جهاز لقياس ضغط الدم.




## ملخص

الحالات الثلاث للمادة هي: **الصلبة**، و**السائلة**، و**الغازية**. تُسَمَّى السوائل والغازات مجتمعة الموائع، وتعني أنّ لها القدرة على الجريان. تعرف **كثافة** المادة بكتلتها لكلّ وحدة حجم:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \textbf{(1-10)}$$

**الجاذبيّة النوعيّة** هي نسبة كثافة المادة إلى كثافة الماء (عند 4°C). الضغط يعرف بالقوّة لكلّ وحدة مساحة

$$P = \frac{F}{A} \qquad \textbf{(2-10)}$$

**الضغط** عند عمق h في سائلٍ كثافته ثابتةٌ يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$P = \rho g h \quad \textbf{(3-10 أ)}$$

حيث g هو التسارع الناتج من الجاذبيّة الأرضيّة. ينصّ **مبدأ باسكال** على أنّ الضغط الخارجيّ المؤثّر في مائع محصور ينتقل خلال المائع. يُقاس الضغط بالمانومیتر الزئبقي أو أيّ مقياس آخر. يُستعمل **البارومتير** لقياس **الضغط الجوّيّ**. الضغط الجوّيّ المعياري (عند سطح البحر) يساوي $1.013 \times 10^5\ \mathrm{N/m^2}$. الضغط المُقيس هو الضغط الكلّيّ مطروحًا منه **الضغط الجوّيّ**.

ينصّ **مبدأ أرخميدس** على أنّ الجسم المغمور كليًّا أو جزئيًّا في مائعٍ يُدفع إلى الأعلى بقوّة تساوي وزن المائع المُزاح. $(F_B = m_F g = \rho_F V_{\mathrm{displ}}\, g)$ يُوصف جريان المائع إمّا بالانسيابيّ؛ حيث تتحرّك طبقات المائع بسلاسةٍ وبانتظامٍ في مساراتٍ تُعرف بخطوط الجريان، أو **بالاضطرابيّ**؛ حيث الجريان ليس منتظمًا، بل دوامات اضطرابية.

معدّل جريان المائع هو كتلة المائع أو حجمه الذي يعبر نقطةً ما لكلّ وحدة زمن.

تنصّ **معادلة الاستمراريّة** على أنّه في المائع غير القابل للانضغاط ويجري في أنبوب، فإنّ حاصل ضرب السرعة ومساحة المقطع تبقى ثابتة:

$$A\,v = \text{ثابت} \quad \textbf{(4-10)}$$

**يخبرنا مبدأ برنولي** أنه حيث تكون السرعة للمائع عالية، يكون الضغط منخفضًا، وحيث تكون السرعة منخفضةً يكون الضغط عاليًا. للجريان الانسيابي في مائعٍ غير انضغاطيٍّ وعديم اللزوجة، فإنّ **معادلة برنولي** المستندة إلى قانون حفظ الطاقة، هي:

$$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad \textbf{(5-10)}$$

لنقطتين في مسار الجريان.

[* تعود **اللزوجة** إلى الاحتكاك ضمن المائع، وهي بصورة أساسيّةٍ قوّة احتكاك بين طبقات متجاورة من المائع عندما تنزلق إحداها على الأخرى].

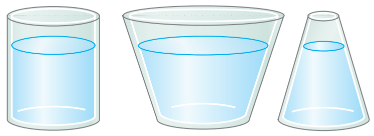
[* تكون سطوح السوائل متماسكة كما لو أنّها تخضع لتوتّر **(التوتّر السّطحيّ)** يسمح بتشكيل القطرات وأجسامٍ، مثل الإبرة الفولاذيّة والحشرات؛ لتقف على سطح السائل].

## أسئلـــة

**1.** إذا كانت كثافة مادّةٍ ما أكبر من كثافة مادةٍ أخرى، فهل يجب أن تكون جزيئات الأولى أثقل من جزيئات الثانية؟ فسّر ذلك.

**2.** يلاحظ المسافرون بالطائرات أحيانًا أنّ قوارير موادّ التجميل وغيرها تنسكب محتوياتها في أثناء الطيران. ما سبب ذلك؟

**3.** الأوعية الثلاثة المبيّنة في (الشكل 10-44) مملوءةٌ بالماء إلى الارتفاع نفسه، ولها مساحة القاعدة ذاتها. لذا، فإنّ ضغط الماء والقوّة الكليّة على القاعدة تكون متساوية، علمًا بأنّ وزن الماء فيها ليس متساويًا. فسّر هذه "المعضلة الهيدروستاتيكيّة".



**الشّكل 10-44** (السؤال 3)

**4.** إذا ضغطت دبّوسًا ورأس قلمٍ غير حادٍّ على جلدك بالقوّة نفسها. فما الذي سيجرح جلدك؛ القوّة المؤثرة أم الضغط؟

**5.** وضعت كميّةً قليلةً من الماء في علبة جالون معدنيّة. رفعت العلبة عن النار ووُضع عليها الغطاء. بعد ذلك بقليل، تنهار العلبة مطويّةً على بعضها. فسّر ذلك.

**6.** عند قياس ضغط الدم ، لماذا يجب وضع الغلاف على مستوى القلب؟

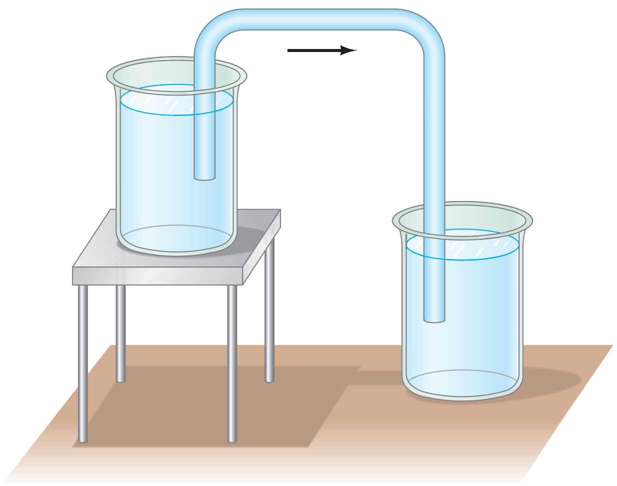
**7.** مكعبٌ من الجليد يطفو على سطح كأسٍ من الماء مملوءةً حتى حافتها. ماذا يمكنك القول عن كثافة الجليد؟ عندما ينصهر الجليد، هل سينسكب الماء خارجًا؟ فسّر ذلك.

**8.** هل سيطفو مكعبٌ من الجليد على سطح كأسٍ من الكحول؟ فسّر السبب في حال كان الحلّ بالإيجاب أو النفي.

**9.** إذا وضعت علبة مشروبٍ **غازيٍّ (كولا)** في الماء، فإنّها ستنغمر، ولكن علبة (دايت كولا) سوف تطفو (حاول ذلك!) اشرح السبب .

**10.** لماذا لا تغرق السفن المصنوعة من الحديد؟

**11.** فسّر كيف يمكن للأنبوب (الشكل 10-45)، المعروف بـ (سيفون) أن ينقل السائل من وعاء إلى آخر رغم أنّ على السائل الارتفاع في جزءٍ من رحلته. (لاحظ أنّ الأنبوب يجب أن يكون مملوءًا بالسائل في البداية).



**الشكل 10-45** (السؤال 11). السّيفون.

**12.** مركبٌ معبأٌ بالرمل بارتفاع زائد يقترب من جسرٍ منخفض على نهر بحيث لا يستطيع المرور تحته. هل نزيل كمية من الرمل، أم نضيف إلى حمولة المركب؟ [ مساعدة: استعمل مبدأ أرخميدس].

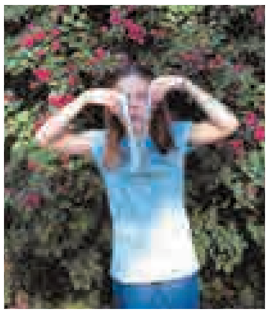
**13.** هل سيكون لبالون فارغ الوزن الظاهريّ نفسه على ميزانٍ مثل وزن بالون مملوءٍ بالهواء؟ علّل.

**14.** فسّر السبب في ملء بالونات الهيليوم المستخدمة في قياس الظروف الجويّة على ارتفاعاتٍ عاليةٍ عادةً إلى %10-%20 من حجمها الأقصى.

15. قاربٌ خشبيٌّ صغيرٌ يطفو في بركة سباحة، تمّ وضع علامةٍ تشير إلى مستوى الماء عند حافّة البركة. خذ الأوضاع التالية وفسّر هل سيرتفع مستوى الماء، أم سينخفض، أم أنّه يبقى ثابتًا: (أ) أُزيل القارب من الماء. (ب) أُخذت من القارب مرساةٌ حديديّةٌ ووُضعت على الشاطىء. (ج) أُخذت المرساة من القارب وأُلقيت في الماء.

16. لماذا تطفو على نحوٍ أعلى في ماءٍ مالحٍ مقارنةً مع ماءٍ عادي؟

17. إذا دَلَّيت قطعتين من الورق عموديًّا وعلى بعد بضعة إنشات(الشكل 10-46) ونفخت بينهما، فكيف - حسب اعتقادك- ستتحرّك الورقتان؟ حاول ذلك وفسّر.



الشكل **10-46**
(السؤال 17).

18. لماذا ينتفخ غطاء الشاحنة نحو الخارج إذا كانت تسير بسرعةٍ كبيرة؟
[ تنويه، واقية الرياح تحرف الهواء نحو الأعلى وتدفع خطوط الجريان أقرب لبعضها].

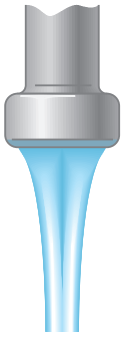
19. تُقذف السقوف الخشبيَّةُ للمنازل بعيدًا خلال الأعاصير. فسّر ذلك باستعمال مبدأ برنولي.

20. يُنصح الأطفال بتجنّب الوقوف قريبًا من قطارٍ يتحرّك بسرعةٍ، لأنّهم قد يُسحبون لأسفل القطار. هل هذا ممكن؟ فسّر.

21. كوبٌ طويلٌ من سيتروفوم مليءٌ بالماء. فُتح ثقبانِ قرب قاعدة الكوب وبدأ الماء بالاندفاع إلى الخارج. إذا أُسقط الكوب سقوطًا حرًّا، فهل سيستمرّ الماء بالتدفق من الثقبين؟ فسّر.

22. لماذا تقلع الطائرات عادةً في الهواء؟

23. لماذا يصبح تيّار الماء من الصنبور ضيّقًا كلّما نزل إلى الأسفل (الشكل 10-47)؟



الشكل **10-47**
(السؤال 23 والمسألة 82).
الماء ينزل من الصنبور.

24. إذا تحرّكت سفينتان في مسارين متوازيين، وقريبتين من بعضهما بعضًا، فإنّ خطر اصطدامهما وارد. لماذا؟

## مســائــل

### 10-2 الكثافة والثقل النوعي

**1.** (I) إذا كان حجم حجرٍ ضخمٍ من الجرانيت $10^8 m^3$(الشكل 10-48) تقريبًا، فما كتلتهُ بالتقريب؟

الشكل **10-48** المسألة 1.

**2.** (I) ما الكتلة التقريبيّة للهواء في غرفة المعيشة $4.8\,m \times 3.8\,m \times 2.8\,m$؟

**3.** (I) إذا حاولت تهريب سبائك من الذهب، بأن تملأ حقيبة الظهر، التي أبعادها $60\,cm \times 28\,cm \times 18\,cm$ فكم ستكون كتلتها؟

**4.** (I) ضع كتلتك وحاول تخمين حجمك. [تنويه: بما أنّك تستطيع السباحة على سطح الماء مباشرة أو تحته في بركة السباحة، فإنّ لديك فكرةً جيّدةً عن كثافة جسمك].

**5.**(II) زجاجةٌ كتلتها 35.00 g فارغةٌ و 98.44 g عندما تُملأ بالماء. وعند ملئها بسائل آخر تصبح كتلتها 88.78 g. فما الثقل النوعيُّ لهذا السائل الآخر؟

**6.** (II) إذا أُضيفت 5 لتراتٍ من محلولٍ مانع التجمّد (الثقل النوعيُّ = 0.80) إلى 4 لتراتٍ من الماء لعمل 9.0 L من المزيج، فما الثقل النوعيُّ للمزيج؟

### 10-3 إلى 10-6. الضغط، قاعدة باسكال

**7.** (I) خمّن الضغط المؤثّر في الأرض من: (أ) رجل كرسيٍّ مدبّبةٌ واحدة إذا كانت كتلة الكرسي (60 kg) على أربعة أرجل ومساحتها $0.020\,cm^2$ . (ب) فيلٌ كتلته 1500-kg يقف على رِجْلٍ واحدة (مساحتها $800\,cm^2$).

**8.** (I) ما الفرق في ضغط الدّم (mm-Hg) بين أعلى الرأس وأخمص القدم لرجلٍ طوله 1.60-m يقف رأسيًّا؟

**9.** (I) (أ) احسب القوّة الكليّة للجوّ التي تؤثّر في سطح طاولةٍ أبعادها $1.60\times2.9\,m$. (ب) ما القوّة الكليّة التي تؤثّر من الأسفل في السطح الكلّيّ للطاولة؟

**10.** (II) في السينما، يخدع طرزان ملاحقيه بالاختباء تحت سطح الماء لعدّة دقائق، في حين يتنفّس بواسطة قشّةٍ طويلةٍ رفيعة. افرض أقصى فرقٍ في الضغط تستطيع رئتاه تحمّله وما تزال تتنفّس هو -85mm-Hg، احسب أعمق مستوًى يستطيع الوصول إليه.

**11.** (II) الضغط المُقيس في كلّ دولابٍ من دواليب السيارة الأربعة هو 240 kPa. إذا كان كلّ دولابٍ يترك أثرًا مساحته $220\,cm^2$، فخمّن كتلة السيارة.

**12.** (II) أكبر ضغطٍ مَقيسٍ في رافعةٍ هيدروليكيّة 17.0 atm. ما أكبر كتلة سيارة يستطيع رفعها إذا كان قطر عمود الرفع 28.0 cm؟

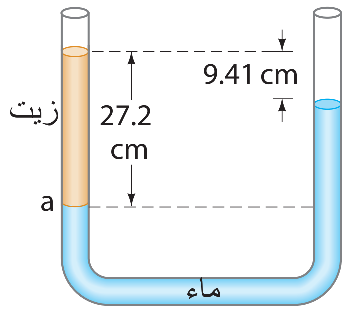
**13.** (II) ما ارتفاع مستوى السائل في بارومتر كحوليٍّ عند ضغطٍ جوّيٍّ عياري؟

**14.** (II) (أ) ما القوّة الكليّة والضغط المطلق على قاعدة بركة سباحة أبعادها 22.0 m، 8.5 m وعمقها 2.0 m؟ (ب) ماذا سيكون الضغط على جانب البركة قرب قعرها؟

**15.** (II) ماذا سيكون ارتفاع الغلاف الجوّيُّ الأرضيُّ لو كانت كثافته منتظمةً وتساوي نصف قيمتها الحاليّة عند سطح البحر؟

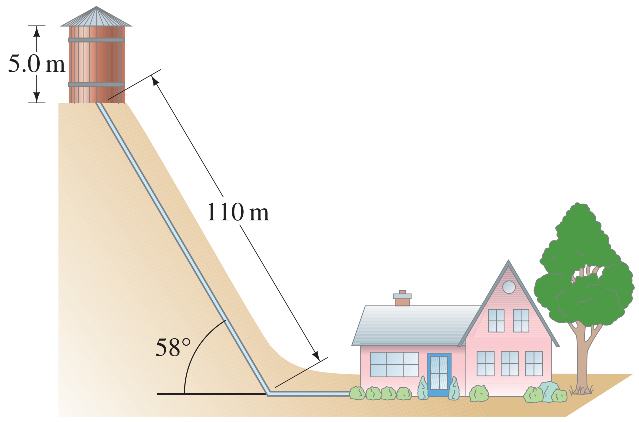
**16.** (II) صُبَّ ماءٌ ثمّ زيت (لا يمتزجان) في أنبوبٍ بشكل حرف U مفتوحٌ عند النهايتين، فاتزنا كما في (الشكل 10-49). فما كثافة الزيت؟

[ تنويه: الضغطان عند النقطتين أ ، ب متساويان، لماذا؟].




الشكل **49-10**
(المسألة 16)

**17.** (II) بيتٌ عند أسفل جبلٍ يُزوّد بالماء من خزّانٍ مملوء، ارتفاعه 5.0 m، ويتصل بالبيت بواسطة أنبوبٍ طوله 110 m ويميل بزاوية 58° مع الأفق (الشكل 10-50). (أ) حدّد ضغط الماء المَقيس عند البيت. (ب) إلى أيّ ارتفاعٍ سوف يصل الماء إذا انطلق رأسيًّا من كسر في الأنبوب أمام البيت؟




الشكل **50-10** (المسألة 17).

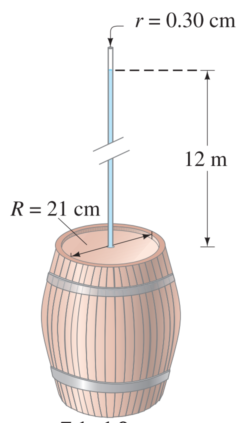
**18.** (II) احسب أقلّ ضغطٍ مَقيس يلزم في أنبوب ماءٍ يصل إلى بنايةٍ إذا كان الماء سيصل إلى الصنبور في الطابق الثاني عشر على ارتفاع 38m فوق الأنبوب.

**19.** (II) مانوميتر زئبقي مفتوح الطرف يستعمل لقياس الضغط في خزّان أكسجين. عندما يكون الضغط الجوّيُّ 1040 m bar، ماذا يكون الضغط المطلق (بـ Pa) في الخزّان إذا كان ارتفاع الزئبق في الأنبوب المفتوح (أ) 28.0 cm أعلى (ب) 4.2 cm أقلّ، من الزئبق في الأنبوب الموصول بالخزّان؟

**20.** (II) في أثناء استنتاج قاعدته،بيّن باسكال كيف يتمّ ضرب القوّة في ضغط المائع. وضع أنبوبًا طويلًا نحيفًا نصف قطره r=0.3 cm عموديًّا في برميل عصير عنب نصف قطره R=21 cm، (الشكل10-51)، فوجد أنّه عندما يتمّ ملء البرميل بالماء، ويملأ الأنبوب إلى ارتفاع 12 m، فإنّ البرميل ينفجر. احسب:

(أ) كتلة الماء في الأنبوب.

(ب) القوّة المحصّلة الناتجة من الماء في البرميل على الغطاء قُبيل أن يتقطع.




الشكل **51-10**
(المسألة 20).

***21.** (III) خمّن كثافة الماء على عمق 6.0 km في البحر (انظر الجدول 9-1 البند 9-5 المتعلق بـ"المعامل الجرمي"). بأيّ نسبةٍ تختلف عن الكثافة عند السطح؟

## 10-7 الطفو وقاعدة أرخميس

**22.** (I) وجد جيولوجيٌّ أنّ صخرة قمرية كتلتها 9.28 kg لها كتلةٌ ظاهريّة 6.18 kg عندما تُغمر في الماء. ما كثافة الصخرة؟

**23.** (I) ما نسبة ما ينغمر من قطعة ألمنيوم ستنغمر عند وضعها لتطفو في الزئبق؟

**24.** (II) رافعةٌ ترفع القشرة الفولاذيّة لسفينة وكتلتها 18,000-kg من الماء. احسب كلًّا من: (أ) الشدّ في كيبل الرافعة عندما تكون القشرة في الماء. (ب) الشدّ عندما تكون القشرة خارج الماء بصورةٍ كاملة.

**25.** (II) بالونٌ كرويٌّ، نصف قطره 7.35 m مليءٌ بالهيليوم. كم كتلة الحمولة التي يستطيع البالون رفعها، بفرض أنّ كتلة البالون 930 kg؟ اهمل قوّة الطفوّ على جسم الحمولة.

**26.** (II) شخصٌ كتلته 78-kg، وكتلته الظاهريّة 54 kg (بسبب الطفو) عند وقوفه في الماء الذي يصل إلى وركيه. خمّن كتلة كلٍّ من ساقيه. افرض أنّ الجسم له SG=1.00.

**27.** (II) ما الهُوية المحتملة لفلز إذا كانت الكتلة الظاهريّة لعيّنةٍ منه 63.5g في الهواء، وكتلة ظاهريّة في الماء 55.4g؟ (انظر الجدول 10-1)

**28.** (II) احسب الكتلة الحقيقيّة (في الفراغ) لقطعة من الألمنيوم كتلتها الظاهرية في الهواء 2.0000 kg .

**29.** (II) حجرة أبحاث تحت سطح البحر كرويّة الشكل، قطرها الخارجيُّ 5.20 m . كتلة الحجرة وهي مملوءة 74,400 kg وتتدلّى إلى قعر البحر بواسطة كيبل. احسب:(أ) قوّة الطفو على الحجرة. (ب) الشدّ في الكيبل.

**30.** (II) غطّاسٌ يزيح 65.0 L وكتلته الكليّة 68.0 kg. (أ) ما قوّة الطفوّ على الغطّاس في ماء البحر؟ (ب) هل سينغمر الغطّاس أم يطفو؟

**31.** (II) لا يُستعمل مبدأ أرخميدس فقط لحساب الثقل النوعيّ لصلب باستعمال سائلٍ معروفٍ (مثال 10-8)، بل يمكن عمل العكس أيضًا. (أ) كمثال، كرة ألمنيوم كتلتها 3.4.0 kg لها كتلةٌ ظاهريّة 2.10 kg عند غمرها في سائلٍ معيّن: احسب كثافة السائل. (ب) اشتق صيغةً لحساب كثافة سائلٍ باستعمال هذه الطريقة.

**32.** (II) تطفو قطعةٌ من الخشب كتلتها 0.48 kg في الماء، ولكنّها تنغمر في الكحول (SG=0.79)؛ حيث كتلتها الظاهريّة فيه 0.047 kg. احسب SG للخشب.

**33.** (II) الثقل النوعيّ للجليد 0.917، ولماء البحر 1.025. ما نسبة الجزء الظاهر فوق سطح البحر لجبلٍ من الجليد؟

**34.** (II) تطفو قطعةٌ من الخشب كتلتها (SG=0.5) 5.25 kg في الماء. ما أقلّ كتلةٍ من الرصاص تعلّق بالخشب بواسطة خيطٍ لتجعلها تنغمر؟

## 10-8 إلى 10-10 جريان المائع؛ معادلة برنولي.

**35.** (I) باستعمال البيانات في (المثال 10-11)، احسب السرعة المتوسّطة لجريان الدّم في الشرايين الرئيسة في الجسم، مساحتها الكلية $2.0\ cm^2$.

**36.** (I) أنبوب شفط هواء نصف قطره 15-cm يُستعمل لتجديد الهواء في غرفةٍ أبعادها 9.2 m × 5.0 m × 4.5 m كلّ 16 دقيقةً. ما سرعة الهواء في الأنبوب؟

**37.** (I) بيّن أنّ معادلة برنولي تؤول إلى المعادلة الهيدروستاتيكيّة لتغيّر الضغط مع العمق (معادلة 10-3 ب) عندما لا يكون هناك جريان ($v_1 = v_2 = 0$).

**38.** (I) ما سرعة اندفاع الماء من ثقبٍ عند قاعدة خزانٍ واسعٍ جدًّا وعمقه 4.6 m مملوءٌ بالماء؟ (أهمل اللزوجة).

**39.** (II) خرطوم مياه قطره الداخلي $\frac{5}{8}$-inch يستعمل لتعبئة بركةٍ دائريةٍ قطرها 6.1 m. إذا كانت سرعة انطلاق الماء من الخرطوم 0.40 m/s، فما الزمن اللازم لتعبئة البركة حتى عمق 1.2 m؟

**40.** (II) ما الضغط المقيس في مصدر تزويد الماء الضروريّ لكي يضخّ خرطوم الإطفائيّة الماء إلى ارتفاع 15 m؟

**41.** (II) أنبوب ماء أفقيٌّ قطره 6.0-cm يضيق القطر تدريجيًّا إلى 4.0 cm. عندما يجري الماء عبر هذا الأنبوب، يكون الضغط المَقيس عند نهايتيه 32.0 kPa و 24.0 kPa على الترتيب، ما معدّل الجريان الحجميّ للماء؟

**42.** (II) ما معدّل الجريان الحجميّ للماء من صنبور قطره 1.85 - cm إذا كان الفرق في الارتفاع 15.0 m؟

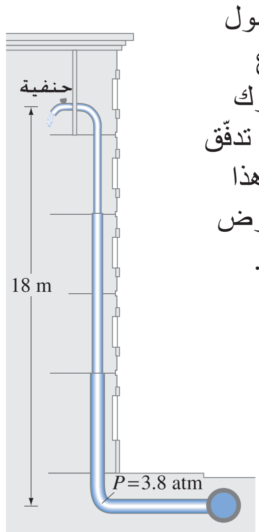
**43.** (II) إذا كانت الرياح تهبّ فوق بيتٍ بسرعة 35 m/s، فما القوّة المحصّلة على السقف إذا كانت مساحته $240\ m^2$ وهو مستوٍ؟

**44.** (II) ما قوّة الرفع (بالنيوتن) بسبب مبدأ برنولي على جناح طائرة مساحته $78\ m^2$ إذا كان الهواء يهبّ فوق الجناح وتحته بسرعة 260 m/s و 150 m/s، على الترتيب؟

**45.** (II) خمّن ضغط الهواء داخل إعصار من الفئة الخامسة إذا كانت سرعة الرياح 300 km/h. (الشكل 10-52).

الشكل **10-52** (المسألة 45)

**46.** (II) يتدفق ماءٌ بضغط مَقيس 3.8 atm في مستوى الشارع إلى بنايةٍ بسرعة 0.60m/s خلال أنبوب قطره 5.0 cm. يضيق الأنبوب إلى 2.6 cm عند الوصول إلى الطابق العلويّ، على ارتفاع 18، (الشكل 10-53)حيث تُرك الصنبور مفتوحًا. احسب سرعة تدفّق الماء والضغط المَقيس في مثل هذا الأنبوب عند الطابق العلويّ. افرض عدم وجود تفرعاتٍ في الأنبوب، واهمل اللزوجة.




الشكل **10-53**
(المسألة 46)

**47.** (III) (أ) بيّن أنّ سرعة الجريان كما يقيسها مقياس فنتوري (انظر الشكل 10-30) تُعطى بالعلاقة

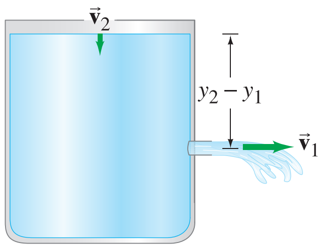
$$v_1 = A_2\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

(ب) أنبوب فنتوري يقيس تدفّق الماء. قطره 3.0 cm، يقلّ إلى حنجرة قطرها 1.0 cm. إذا كان الفرق في الضغط 18 mm-Hg، فما سرعة الماء؟

**48.** (III) في (الشكل 10-54)، خذ بالحسبان سرعة الماء عند السطح العلويّ للخزّان، وبيّن أنّ السرعة للمائع عند خروجه من الفتحة السفلية هي

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{(1 - A_1^2/A_2^2)}}$$

حيث $h = y_2 - y_1$ و $A_1$ و $A_2$ هما مساحة الفتحة عند السطح العلويّ والسفليّ على الترتيب. افرض أنّ $A_1 \ll A_2$ بحيث يبقى الجريان انسيابيًّا ومستقرًّا.




الشكل **10-54**
(المسألتان 48، و 49)

**49.** (III) افرض أنّ الفتحة في الخزّان المبيّن في الشكل 10-54 على ارتفاع $h_1$ فوق القاعدة، وسطح الماء على ارتفاع $h_2$ فوق القاعدة أيضًا. ويستند الخزّان إلى أرضٍ مستوية (أ) عند أيّ بُعدٍ أفقيٍّ من قاعدة الخزان سوف يصطدم الماء بالأرض؟ (ب) عند أيّ ارتفاع $h_1'$ يمكن عمل فتحةٍ بحيث يسقط الماء في المكان الأول نفسه. (اعتبر $v_2 \approx 0$).

## *10-11 اللزوجة.

***50.** (II) يتكوّن مقياس اللزوجة من أسطوانتين متحدتين في المحور قطراهما 10.20 cm و10.60 cm. يملأ مائع ما الحيّز بينهما إلى ارتفاع 12.0 cm. الأسطوانة الخارجيّة ثابتة، في حين تدور الداخليّة 62 rev/min تحت تأثير عزم 0.024 m.N. احسب لزوجة ذلك السائل.

## *10-12 الجريان في الأنابيب؛ معادلة بوسيلي

***51.** (I) يشعر بستاني أنّه استغرق وقتًا طويلًا في ريِّ البستان بخرطومٍ قطره $\frac{3}{8}$-in. بأيّ نسبةٍ سوف ينخفض الزمن اللازم لِريّ البستان إذا استعمل خرطومًا قطره $\frac{5}{8}$-in ؟ افرض عدم تغيّر أيّ شيءٍ آخر.

***52.** (II) زيت محركات (افرض SAE 10، جدول 10-3) يمرّ عبر أنبوب قطره 1.80 - mm في محرّك نموذجٍ أوّلي. طول الأنبوب 5.5 cm. ما الفرق في الضغط اللازم لمعدّل جريان 5.6 mL/min؟

***53.** (II) ماذا يجب أن يكون فرق الضغط بين طرفي أنبوبٍ طوله 1.9 - km وقطره 29 cm لينقل زيتًا$(\rho = 950\ kg/m^3, \eta = 0.20\ Pa\cdot s)$ بمعدّل $450\ cm^3/s$؟

***54.** (II) ما القطر المطلوب لقناة شفط هواء طولها 21.0 - m إذا كان الهواء يتجدّد كلّ 10 min في صالة أبعادها $9.0\ m \times 12.0\ m \times 4.0\ m$؟ افرض أنّ المضخّة تؤثّر بضغط مقيس $0.71 \times 10^{-3}$ atm.

***55.** (II) احسب التغيّر في الضغط لكلّ cm على امتداد الأورطة باستعمال البيانات في (المثال 10-11 والجدول 10-3).

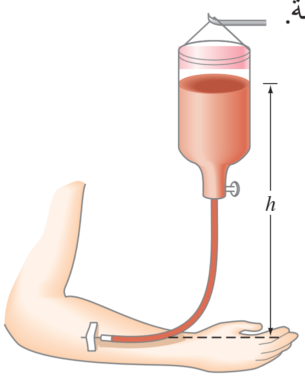
*56. (II) افرض تدرّجًا ثابتًا في الضغط. إذا انخفض جريان الدّم بنسبة 75%، فما نسبة نقص نصف القطر لوعاءٍ دمويٍّ؟

*57. (II) لا تنطبق معادلة بوسيلي إذا كانت سرعة الجريان عاليةً بحيث يبدأ الاضطراب. يبدأ الجريان الاضطرابيُّ عندما يزيد عدد رينولد على 2000، يُعرف **عدد رينولد** Re بـ

$$Re = \frac{2\bar{v}r\rho}{\eta}$$

حيث $\bar{v}$ السرعة المتوسّطة للمائع، ρ كثافة، η معامل اللزوجة، r نصف قطر الأنبوب الذي يجري فيه المائع. (أ) حدّد ما إذا كان جريان الدّم انسيابيًّا أم اضطرابيًّا في الأورطة إذا علمت أنّ السرعة المتوسّطة للدّم في الأورطة $(r = 1.2\,\text{cm})$ خلال انبساط القلب حوالي 40 cm/s. (ب) تتضاعف سرعة تدفّق الدّم خلال التمرين الرياضي، احسب عدد رينولد في هذه الحالة، واذكر ما إذا كان الجريان انسيابيًّا أم اضطرابيًّا.

58. (III) مريضٌ سيُجرى له نقلٌ للدّم. سوف ينتقل الدّم عبر أنبوبٍ من زجاجةٍ مرفوعةٍ إلى إبرةٍ مغروسةٍ في الوريد (الشكل 10-55). القطر الداخليّ للإبرة 0.40 mm وطولها 4.0 cm، ويُطلب معدّل جريان $4.0\ \text{cm}^3$ من الدّم في الدقيقة. ما ارتفاع الزجاجة $h$ فوق الإبرة؟ احصل على $\eta$ و ρ من القوائم. افرض أنّ ضغط الدّم 18 torr أعلى من الضغط الجويّ.




**الشكل 10-55**
(المسألتان 58 و 63)

### * 10-13 التوتر السطحي والظاهرة الشعرية

*59. (I) إذا كانت القوّة $F$ اللازمة لتحريك السلك في (الشكل 10-35) هي $5.1 \times 10^{-3}\,\text{N}$، فاحسب التوتّر السطحيَّ $\gamma$ للسائل. افرض $L = 0.070\,\text{m}$

*60. (I) احسب القوّة اللازمة لتحريك السلك في (الشكل 10-35) إذا غُمر في محلول صابون وطول السلك 18.2 cm.

*61. (II) إذا كان نصف قطر قاعدة رأس حشرة $3.0 \times 10^{-5}\,\text{m}$ وكتلتها 0.016 g. فهل تتوقّع أنّ الحشرة ذات الأرجل الستّ تبقى على سطح الماء؟ اذكر السبب في حال كان الحلّ بالإيجاب أو النفي.

*62. (II) يمكن تحديد التوتّر السطحيّ لسائلٍ بقياس القوّة F المطلوبة فقط لرفع حلقةٍ دائريّةٍ من البلاتين نصف قطرها r من سطح السائل. (أ) جد صيغة لـ $\gamma$ بدلالة $F$ و $r$ (ب) واحسب $\gamma$ للسائل المجرب. إذا علمنا أن قيمة $F = 8.40 \times 10^{-3}\,\text{N}$ وقيمة $r = 2.8\,\text{cm}$ عند درجة حرارة 30°C .

## مسائل عامة

63. يتمّ إدخال السوائل إلى الوريد عادةً تحت تأثير الجاذبيّة، كما هو مبيّن في (الشكل 10-55). افرض أنّ كثافة السائل $1.00\ \text{g/cm}^3$. على أيّ ارتفاع h تُوضع الزجاجة ليكون ضغط السائل (أ) 55 mm-Hg؟ (ب) $650\ \text{mm-H}_2\text{O}$؟ إذا كان ضغط الدّم 18 mm-Hg فوق الضغط الجوّيّ، فما ارتفاع الزجاجة بحيث يدخل السائل إلى الوريد فقط ؟

64. إذا أثّرت قوّة 2.4-N في مكبس إبرة الحقن تحت الجلد، وكان قطر المكبس 1.3 cm، وقطر الإبرة 0.20 mm فبأيّ قوّة: (أ) يخرج السائل من الإبرة؟ (ب) تؤثّر في المكبس لدفع السائل في الوريد حيث الضغط المَقيس 18 mm-Hg؟ الحلّ للحظةٍ قُبيل أن يبدأ السائل بالحركة.

65. استعملت مضخّة الدرّاجة لنفخ دولاب. كان الضغط المَقيس الابتدائي للدولاب 210 kPa (30 psi) ، وعند نهاية النفخ أصبح الضغط 310 kPa (45 psi). إذا كان قطر المكبس داخل أسطوانة المضخّة 3.0 cm، فما مدى القوّة التي يجب أن تؤثّر بها في المكبس من البداية حتى النهاية؟

66. خمّن الضغط على الجبال تحت طبقة الجليد في المنطقة الجنوبيّة التي يُقدّر سمكها بـ 3 km.

67. ما الفرق التقريبيُّ في ضغط الهواء الجوّيِّ بين قمّة بناية الإمْبَيَرْ ستيت في نيويورك وقاعدتها؟ طولها 380 m وتقع في مستوى سطح البحر. عبّر عن الحلّ كنسبةٍ من الضغط الجوّيّ عند مستوى سطح البحر.

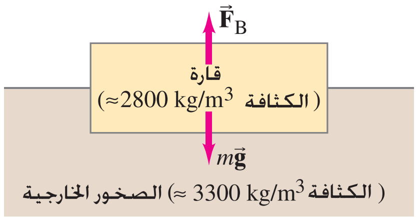
68. استُعملت رافعةٌ هيدروليكيّةٌ لرفع سيّارةٍ كتلتها 970-kg مسافة 12 cm عن الأرض، القوّة المؤثّرة 250 N (أ) ما مساحة مكبس الدخل؟ (ب) ما الشغل المبذول لرفع السيارة 12 cm؟ (ج) إذا تحرّك مكبس الدخل مسافة 13 cm كلّ ضغطة (ضربة)، فكم المسافة التي تتحرّكها السيّارة إلى الأعلى بعد كلّ ضربة؟ (د) كم عدد الضربات المطلوبة لرفع السيارة 12 cm؟ (هـ) بيّن أنّ الطاقة محفوظة.

69. تُعدّ الزرافات هندسةً عجيبةً من القلب والشرايين. احسب الفرق في الضغط (بوحدة الضغط الجوّيّ) الذي تتلاءم معه الأوعية الدمويّة في رأس الزرافة عندما تخفض رأسها من وضع الرأس في أعلى مستوًى ثمّ لمستوى الأرض عندما تخفض رأسها لتشرب. متوسّط ارتفاع الزرافة 6 m.

70. عندما تنخفض بمقدارٍ كبيرٍ في أثناء قيادة السيارة، تسمع فرقعةً في أذنيك، وهذا يعني أنّ الضغط خلف طبلة الأذن يساوي الضغط في الخارج. إذا لم يحدث ذلك، فما القوّة التقريبيّة على طبلة الأذن التي مساحتها $0.50\ \text{cm}^2$ إذا تغيّر الارتفاع بـ 950 m؟

71. تحتوي إحدى ذراعي أنبوبٍ بشكل U على ماء، في حين تحتوي الذراع الأخرى على كحول. إذا تقابل السائلان بالضبط عند قعر الأنبوب U وارتفاع الكحول 18.0 cm، فما ارتفاع الماء؟

**.72** نموذج بسيط (الشكل 10-56) يُعتبر القارة كقطعة (كثافتها $\approx 2800\ kg/m^3$) تطفو في الصخرة الخارجيّة (كثافتها $\approx 3300\ kg/m^3$). افرض أنّ سمك القارة 35 km (متوسط سمك القشرة الأرضيّة). خمّن ارتفاع القارة فوق القشرة المحيطة.




**الشكل 10-56** (المسألة 72).

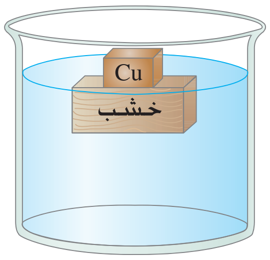
**.73** انكماش البطين الأيسر من القلب يضخ الدّم إلى الجسم. افرض أنّ مساحة السطح الداخليّ للبطين الأيسر $82\ cm^2$، وأنّ أكبر ضغطٍ في الدّم هو 120 mm-Hg. احسب القوّة التي ينتجها هذا البطين عند أكبر ضغط.

**.74** احسب، بالتقريب، الكتلة الكليّة للغلاف الجويّ الأرضيّ، باستعمال القيمة المعروفة للضغط الجويّ عند مستوى سطح البحر.

**.75** افرض أنّ الشخص يستطيع أن يخفض الضغط في رئتيه إلى 80- mm-Hg ضغط مَقيس. كم ارتفاع الماء الذي يمكن امتصاصه باستعمال الماصّة (القشة)؟

**.76** تحمل سفينةٌ ماءً إلى جزيرةٍ مقفرةٍ في البحر الكاريبي، مساحة سطحها الأفقيّ $2650\ m^2$ عند خطّ الماء (خط الغطس). وعند تفريغها، ترتفع السفينة 8.50 m في البحر. ما كميَّة الماء التي تمّ توريدها؟

**.77** وزنٌ من النحاس (Cu) وضع فوق قطعة من الخشب (كثافته $= 0.60 \times 10^3\ kg/m^3$) يطفو في الماء، كما هو مبيّن في (الشكل 10-57). ما كتلة النحاس إذا كان السطح العلويّ لقطعة الخشب في مستوى سطح الماء بالضبط ؟




**الشكل 10-57** (المسألة 77)

**.78** تُصنع طوّافةٌ من 10 جذوعٍ من الخشب مرصوصةً معًا. قطر الجذع 56 cm وطوله 6.1 m. كم شخصًا تستطيع الطوّافة حمله قبل أن تبتّل أقدامهم بالماء، بفرض أنّ الكتلة المتوسّطة للشخص 68 kg؟ لا تهمل وزن الخشب. افرض أنّ الثقل النوعيَّ للخشب 0.60.

**.79** يُضَخُّ في كلّ نبضة قلب $70\ cm^3$ تقريبًا من الدّم من القلب لمتوسّط ضغط 105 mm-Hg. احسب قدرة القلب الناتجة بالواط. بفرض 70 نبضةً في الدقيقة.

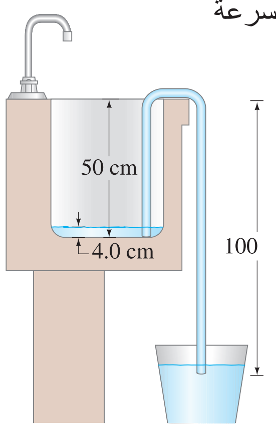
**.80** يتسارع دلو ماءٍ نحو الأعلى بمعدّل 2.4 g. ما قوَّة الطفوِّ على قطعة غرانيت كتلتها (3.0 kg) SG=2.7 مغمورة في ماء الدلو؟ هل ستطفو القطعة؟ اذكر السبب في حال كان الحلّ بالنفي أو الإيجاب.

**.81** ما مقدار الضغط في الماء إذا كانت ستخرج من صنبورٍ بسرعة 9.5 m/s؟ اهمل اللزوجة.

**.82** يقلّ قطرُ تيّار الماء من الصنبور كلّما سقط إلى الأسفل (الشكل 10-47). اشتقّ صيغةً للقطر بدلالة في y بعد الماء أسفل الصنبور، علمًا بأنّ سرعة الماء $v_0$ عند مغادرته للصنبور الذي قطره $d$.

**.83** رشّاش ماءٍ لمسطّح عشبيٍّ له أربعة رؤوس، ويُزوّد بالماء من خرطومٍ قطره 1.9 cm. يخرج الماء من الرؤوس بزاوية 35° مع الأفق، ويغطّي نصف قطر 8.0 m. (أ) ما سرعة الماء المندفع من كلّ رأس؟ (افرض أنّ مقاومة الهواء صفر) (ب) إذا كان قطر فتحة كلّ رأس 3 mm، فكم لترًا من الماء تعطي الرؤوس الأربعة في الثانية؟ (جـ) ما سرعة جريان الماء داخل الأنبوب الذي قطره 1.9 cm؟

**.84** تريد تفريغ الماء من مغسلةٍ مسدودةٍ مساحتها $0.48 m^2$ ومملوءة لارتفاع 4.0 cm. يرتفع أنبوب السيفون 50 cm فوق قطر المغسلة ثم ينخفض 100 cm إلى دلوٍ كما هو مبيّن في (الشكل 10-58).قطر أنبوب السيفون 2.0 cm. افرض أنّ الماء يدخل أنبوب السيفون بسرعةٍ تقريبيّةٍ تساوي صفرًا. احسب مايلي: (أ) سرعة الماء عند دخوله إلى الدلو. (ب) الزمن اللازم لتفريغ المغسلة بالتقريب.




**الشكل 10-58** (المسألتان 84 و85).

**.85** افرض أنّ سيفونًا ينقل الماء من وعاءٍ إلى آخرَ (منخفض) كما في (الشكل 10-58). احسب معدّل الجريان إذا كان قطر الأنبوب 1.2 cm والفرق بين مستوى الماء في الوعاءين 64 cm.

**.86** طائرةٌ كتلتها $2.0 \times 10^6\ kg$ . يجري الهواء تحت جناحيها بسرعة 95 m/s. إذا كانت مساحة الجناحين $1200\ m^2$، فما سرعة حركة الهواء فوقهما لتبقى الطائرة في الهواء؟

**.87** يُوضع دم حيوانٍ في زجاجةٍ على ارتفاع 1.70 m فوق إبرةٍ طولها 3.8 cm، وقطرها الداخلي 0.40 mm، حيث يجري الدم بمعدّل $4.1\ cm^3/min$. ما لزوجة هذا الدم؟

**.88** إذا كان ترسّب الكولسترول في شريان يغلقه بنسبة 15%، فماذا سيكون الأثر في جريان الدم؟

## إجابات التمارين

أ: القيمة نفسها. يعتمد الضغط على العمق وليس على الطول.

**ب:** أقلّ.

**جـ:** يزداد.