الفيزياء

كتاب الطالب

المستوى الثاني عشر

PHYSICS
STUDENT BOOK

GRADE
12

الفصل الدراسي الثاني - الجزء الأول
SECOND SEMESTER - PART 1
2020 - 2021

(نسخة تجريبية - Trial version)

© وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويخضع للاستثناء التشريعي المسموح به قانونًا ولأحكام التراخيص ذات الصلة.

لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول على الإذن المكتوب من وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر.

تمّ إعداد الكتاب بالتّعاون مع شركة تكنولاب.

التأليف: فريق من الخبراء بقيادة الدكتور توم سو وبالتّعاون مع شركة باسكو العلميّة.

التّرجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

الطبعة التجريبية 2021-2020 م

النشيد الوطني

قَسَـمًا بِمَـنْ رَفَـعَ السَّـمَاءْ قَسَـمًا بِمَـنْ نَشَـرَ الضِّـيَاءْ
قَطَـرٌ سَتَبْـقَى حُـرَّةً تَسْمُـو بِـرُوحِ الأَوْفِـيَـاءْ
سِـيرُوا عَـلَى نَـهْـجِ الأُلَـى وَعَـلَى ضِيَـاءِ الأَنْبِـيَاءْ
قَطَـرٌ بِقَـلْـبِي سِـيرَةٌ عِـزٌّ وَأَمْجَـادُ الإِبَـاءْ
قَطَـرُ الرِّجَـالِ الأَوَّلِـين حُمَـاتُنَـا يَـوْمَ النِّـدَاءْ
وَحَمَـائِـمٌ يَـوْمَ السَّـلاَمْ جَـوَارِحٌ يَـوْمَ الفِـدَاءْ

المراجعة والتّدقيق العلميّ والتّربويّ

إدارة تقييم الطلبة

خبرات تربويّة وأكاديميّة من المدارس

الإشراف العلميّ والتربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

يعدّ كتاب الطّالب مصدرًا مثيرًا لاهتمام الطلّاب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعارف والمهارات الّتي يحتاجها الطلّاب للنّجاح في تنمية المهارات الحياتيّة وبعض المهارات في الموادّ الأخرى.

وبما أنّنا نهدف إلى أن يكون طلّابنا مميّزين، نودّ منهم أن يتّسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن فريق.
- امتلاك الفضول العلميّ عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التّفكير بشكلٍ ناقدٍ وبنّاء.
- الثّقة بقدرتهم على اتّباع طريقة الاستقصاء العلميّ، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التّقارير، وإنتاج الرّسوم البيانيّة، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزّملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التّمرّس في التّفكير الإبداعيّ.
- التّمسّك باحترام المبادئ الأخلاقيّة والقيم الإنسانيّة.

يتجسّد في المنهج الجديد العديد من التّوجّهات مثل:

- تطوير المنهج لجميع المستويات الدّراسيّة بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلميّة الّتي تتوافق مع أعمار الطّلاب، والّتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدّراسيّة لتتوافق مع الإطار العامّ للمنهج الوطنيّ القطريّ بغية ضمان حصول الطّلّاب على المعارف والمهارات العلميّة وتطوير المواقف (وهو يُعرف بالكفايات) ما يجعل أداء الطّلّاب يصل إلى الحدّ الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محوريّة جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلميّ، ما أسّس للتّنوّع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطّالب.
- توزّع المعرفة والأفكار العلميّة المخصّصة لكلّ عام دراسيٍّ ضمن وحدات بطريقة متسلسلة مصمّمة لتحقيق التّنوّع والتّطوّر.

- تعدّد الدّروس في كلّ وحدة، بحيث يعالج كلّ درس موضوعًا جديدًا، منطلقًا ممّا تمّ اكتسابه في الدّروس السّابقة.
- إتاحة الفرصة للطّلّاب، في كلِّ درسٍ، للتّحقّق الذّاتيّ من معارفهم ولممارسة قدرتهم على حلّ المشكلات.
- احتواء كلّ وحدة على تقويم للدّرس وتقويم للوحدة، وهو ما يمكّن الطّلّاب والأهل والمدرّسين من تتبّع التّعلّم والأداء.

العلوم مجموعة من المعارف الّتي تشمل الحقائق والأشكال والنّظريّات والأفكار. ولكنَّ العالِم الجيّد يفهم أنّ «طريقة العمل» في العلوم أكثر أهمّيّة من المعرفة الّتي تحتويها.

سوف يساعد هذا الكتاب الطُّلّاب على تقدير جميع هذه الأبعاد واعتمادها ليصبحوا علماء ناجحين وليواجهوا مجموعة واسعة من التّحدّيات في حياتهم المهنيّة المستقبليّة.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التّعليمي الوطني لدولة قطر

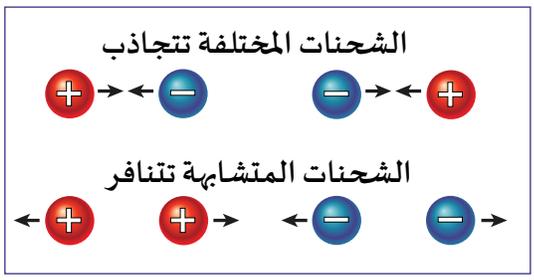
- الاستقصاء والبحث
- التّعاون والمشاركة
- التّواصل
- التّفكير الإبداعيّ والناقد
- حلّ المشكلات
- الكفاية العددية
- الكفاية اللغويّة

ماذا ستتعلّم من هذا الكتاب

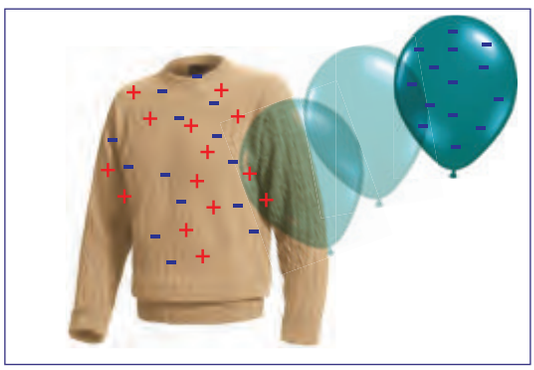
تسمح الدراسات والأبحاث العلميّة في المجالات الفيزيائيّة المختلفة بفهم الظواهر العلمية وتطوير الإختراعات الحيوية. تعدّ الكهرباء أهمّ هذه المجالات نظرًا للحاجة إليها في جميع الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا اليوميّة من الأجهزة الشخصيّة إلى الآلات العملاقة. وقد أثمرت جهود العلماء إلى رفع درجة الوقاية من المخاطر المرتبطة بهذا المجال. يركّز العلماء على دراسة مجالٍ فيزيائيّ معيّن للتمكّن من تحقيق تأثيرٍ ايجابي في حياة البشر. كذلك، تعدّ دراسة ديناميكيّة الموائع أحد هذه المجالات المهمّة. كمثالٍ على أهميّتها، تسمح الأبحاث العلميّة المرتبطة بالموائع أن يتمتّع البشر باستخدامٍ آمنٍ لجميع وسائل النقل المتاحة في العالم.

تتناول الوحدة الثالثة من الفصل الدّراسي الثاني المجال الكهربائي والجهد الكهربائي. سوف ندرس قانون كولوم التي لحساب القوّة الكهروستاتيكيّة بين أي جسمين مشحونين بشحنة كهربائيّة. سوف نعرّف بعدها الجهد الكهربائي لشحنة نقطيّة ونقرأ خطوط تساوي الجهد لنحدّد خصائصه.

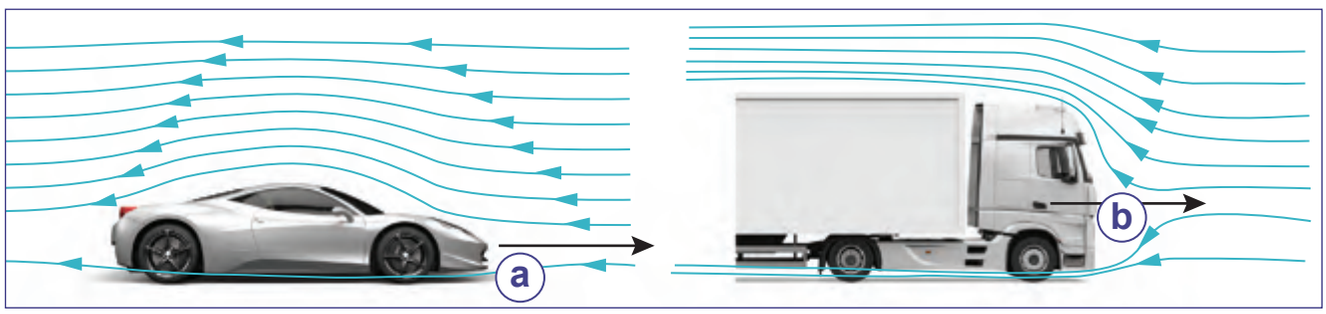
أخيرًا، سوف نتعرّف أسباب تشكّل المجال الكهربائي المنتظم وتأثيره في الأجسام المشحونة وسوف نقارن المجال الكهربائي بمجال الجاذبيّة.



تجاذب الشحنات وتنافرها.



يؤدي الدّلك إلى انتقال الشحنات السالبة إلى البالون.



خطوط انسياب الهواء حول سيارة (a) وحول شاحنة (b)

تركّز الوحدة الرابعة من هذا الفصل على تأثير تغيّرات الضغط في كثير من خصائص الموائع مثل معدّل التّدفّق والكثافة. سوف نتعرّف فيها معادلة برنولي التي تربط بين الضغط والكثافة والسرعة ونرسم خطوط تدفّق المائع المتحرّك على العديد من الأجسام مثل الطائرات والسيّارات. سوف ندرس أيضًا قانون الغاز المثالي مع بعض تطبيقاته في الحياة اليوميّة.

بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحيّة

مفاهيم مهمّة وبيانات وأمثلة على كل فكرة جديدة معروضة من خلال الإيضاحات المُفصَّلة والشروحات

أسئلة للمناقشة

كيف تطفو بالونات الهواء الساخن؟

أسئلة المناقشة تزوّد طلّاب الصفّ بفرصة مناقشة المفاهيم والمعلومات.

شريط الأفكار المهمّة

المجال الكهربائي داخل الموصلات الستاتيكية يكون صفرًا.

تحديد النقاط الرّئيسة وتذكُّرها.

العلاقات والمعادلات

مُثِّلت علاقات الكمّيّات الفيزيائيّة من خلال المُتغيّرات ووحدات قياسها بشكل واضح.

1-3 قانون كولوم

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

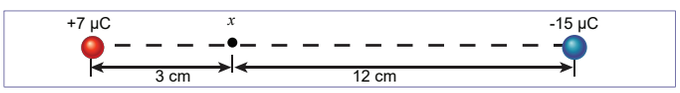
F	القوة الكهروستاتيكية (N)
k	ثابت كولوم 9×10^9 (Nm^2/C^2)
q_1	شحنة الجسم 1 (C)
q_2	شحنة الجسم 2 (C)
r	المسافة بين الجسمين (m)

الأمثلة

تُظهر الأمثلة جميع خطوات الحلّ والتفسير للحصول على حسابات صحيحة.

مثال 7

إذا كانت المسافة بين شحنة موجبة وأخرى سالبة 15 cm كما في **الشكل 3-20**، احسب شدة المجال الكهربائي عند النقطة x نتيجة للشحنتين.



الشكل 3-20 احسب المجال الكهربائي عند النقطة x.

العلم والعلماء

تمّ تطوير معارفنا العلميّة على مدى أكثر من ثلاثة آلاف عام. تُطلعُنا هذه المقالات على إلهام الإنسان وتبصُّرِه في التعامُل مع العلم والتكنولوجيا.

ضوء على العلماء

شارل أوجستين دي كولوم: 1736-1806

صيغ قانون كولوم بقلم عالم الفيزياء الفرنسي تشارلز أوغستين دي كولوم. وُلد كولوم في أنجوليم بفرنسا في العام 1736، وانتقلت عائلته إلى باريس عندما كان صغيرًا جدًا. هناك دخل Collège des Quatre-Nations (كلية الأمم الأربعة) ودرس فيها الرياضيات.

التحق شارل دي كولوم بالمدرسة العسكرية، وهي مدرسة الهندسة الملكية بميزير وتخرّج فيها في العام 1761. وبصفة مهندس عسكري، خدم كولوم في جزر

الفيزياء

الأنشطة والمراجعة والتّقويم

الأنشطة

التدرُّب العملي من خلال المُختبر والمشاريع البحثيّة وسواهما من الأنشطة التي تُرسّخ معاني الأفكار الجديدة وتطوُّر العمل المخبري.

الوحدة 4: سلوك الموائع

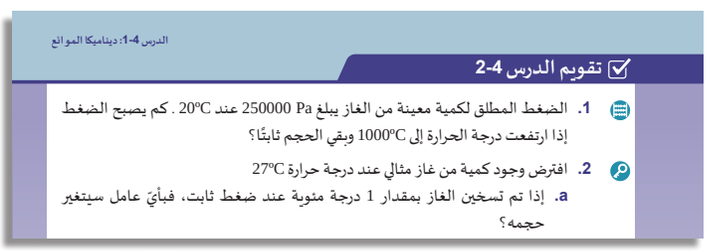
نشاط 4-1 أمثلة على تأثير برنولي

سؤال الاستقصاء	ملاحظة تأثير برنولي في أمثلة مختلفة.
الموادّ المطلوبة	ورق، ماصّات، علبتا مشروب غازي، قمع، كرة تنس طاولة (بينج بونج).

خطوات النشاط 1

تقويم الدّرس

يتميّز كل درس بعرض يحتوي على الأسئلة التي تُغطّي جميع المفاهيم والمعلومات في هذا الدرس.


الدرس 4-1: ديناميكا الموائع

تقويم الدرس 4-2

1. الضغط المطلق لكمية معينة من الغاز يبلغ 250000 Pa عند 20°C . كم يصبح الضغط إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 1000°C وبقي الحجم ثابتًا؟
2. افترض وجود كمية من غاز مثالي عند درجة حرارة 27°C
   a. إذا تم تسخين الغاز بمقدار 1 درجة مئوية عند ضغط ثابت، فبأيّ عامل سيتغير حجمه؟

مراجعة الوحدة

ملخّص قصير عند نهاية كل وحدة، وهو مرجع سريع للأفكار والمُصطلحات الرئيسية.

الوحدة 4

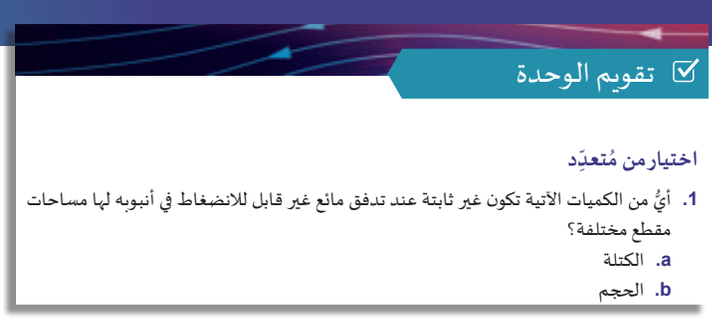
مراجعة الوحدة

الدرس 4-1: ديناميكا الموائع

- الموائع هو الاسم الذي يطلق على حالات المادة التي تتدفق. وهذا يشمل السوائل والغازات والبلازا
- الغازات هي موائع قابلة للانضغاط ، لأن ذرات الغاز أو جزيئاته تتقارب عند تعرّضها للضغط.

تقويم الوحدة

زوّدت كل وحدة بمجموعة من الأسئلة ذات الخيارات المتعددة كعينة تحضّر الطالب لاختبار نموذجي.

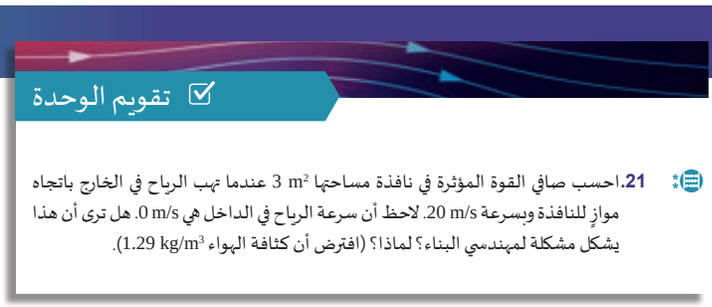

تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدِّد

1. أيُّ من الكميات الآتية تكون غير ثابتة عند تدفق مائع غير قابل للانضغاط في أنبوبه لها مساحات مقطع مختلفة؟
   a. الكتلة
   b. الحجم

تقويم الوحدة

أسئلة الإجابة القصيرة وأسئلة الإجابة المطوّلة بُنيتا على مُستويات ثلاثة من الصعوبة في نهاية كل وحدة.


تقويم الوحدة

21. احسب صافي القوة المؤثرة في نافذة مساحتها 3 m^2 عندما تهب الرياح في الخارج باتجاه موازٍ للنافذة وبسرعة 20 m/s. لاحظ أن سرعة الرياح في الداخل هي 0 m/s. هل ترى أن هذا يشكل مشكلة لمهندسي البناء؟ لماذا؟ (افترض أن كثافة الهواء 1.29 kg/m^3).

مخطّط المادّة

الوحدة 3 المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

يلتصق البالون المدلوك بقطعة من القماش على الحائط. يلتصق شعرك أيضًا بالمشط إذا سرّحته في يومٍ جافّ. وتشعر بـ "الصعقة" عندما تلمس مقبض باب بعد المشي على السجادة حافي القدمين. لماذا؟ هذه كلها أمثلة على الكهروستاتيكية (الكهرباء الساكنة).

للمجالات الكربائيّة تطبيقات عديدة سمحت لنا بتطوير عدد كبير من الأجهزة المفيدة، مثل طابعات الليزر وطابعات الحبر النفاث ومرسّبات الدّخان. في مجال الطبّ أيضًا يمكن أن يساعد تطبيق مجال كهربائي على موقع جرح في شفائه. كما يتم استخدام المجالات الكهربائية لتحفيز العضلات وتخفيف الألم العضلي.

الوحدة 4 سلوك الموائع

عندما تغلق جزءًا من فوهة خرطوم ماء بالإبهام، فإن الماء يخرج من الجزء المفتوح بشكل أسرع! ويؤدي إغلاق فوهة الخرطوم جزئيًا إلى زيادة الضغط في الخرطوم. يحدث التأثير المماثل لهذا في الجسم عندما يضخّ القلب الدّم. يسمح الضغط الناتج عن عمليّة الضخّ بدفع الدّم من الشرايين (المساحة الأكبر) إلى الشعيرات الدمويّة (المساحة الأصغر) ليستطيع المرور عبرها.

تعمل القوى في الموائع من خلال الضغط.

سنرى في هذه الوحدة أن قوانين حفظ الطاقة وقوانين نيوتن لها أشكال جديدة في الموائع.

جدول المحتويات

الوحدة 3 **المجال الكهربائي والجهد الكهربائي 2**

الدرس 3-1 قانون كولوم 4

الدرس 3-2 المجال الكهربائي والجهد الكهربائي 14

الدرس 3-3 المجال الكهربائي المنتظم 32

الوحدة 4 **سلوك الموائع 48**

الدرس 4-1 ديناميكا الموائع 50

الدرس 4-2 الغاز المثالي 64

الوحدة 3

المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

Electric Fields and Potential

في هذه الوحدة

الدرس 3-1: قانون كولوم P1205

الدرس 3-2: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي P1206

الدرس 3-3: المجال الكهربائي المنتظم

الوحدة 3

مقدّمة الوحدة

عندما يوضع بالون مدلوك بقطعة من القماش على حائط، فإنه سيلتصق بالحائط. عندما تسرّح شعرك بمشط في يوم جاف، فإن شعرك سيلتصق بالمشط. اذا كنت تمشى على سجّادة ولمست المقبض المعدني للباب، فقد تحس بصدمة كهربائية. هذه كلها أمثلة على الكهروستاتيكية (الكهرباء الساكنة)، والتي تنتج عن تراكم الشحنات الكهربائية على الجسم.

تولّد الأجسام المشحونة مجالًا كهربائيًا ينتشر حولها ويؤثر بقوة في الجسيمات المشحونة الأخرى وفي الأجسام المشحونة القريبة. سمحت لنا دراسة الجسيمات المشحونة والمجالات الكهربائية بتطوير عدد كبير من الأجهزة المفيدة، مثل طابعات الليزر وطابعات الحبر النفاث ومرسّبات الدخان.

تطبّق المجالات الكهربائية في مجال الأحياء والطب، حيث يمكن أن يساعد تطبيق مجال كهربائي على موقع جرح في شفائه. يتم استخدام المجالات الكهربائية أيضًا لتحفيز العضلات وتخفيف الألم العضلي.

الأنشطة والتجارب

1-3 الكهرباء الساكنة على شريط شفاف

2-3 رسم خريطة لمجال كهربائي

الدرس 1-3
قانون كولوم
Coulomb's Law

كرة البلازما، والتي تُعرف أيضًا بكرة تسلا، هي عبارة عن قبّة ترسل اشعة ضوئية ملوّنة كما في **الشكل 3-1**. تتكوَّن كرة تسلا من ملف تسلا في وسطها وهو مليء بالغازات النبيلة، مثل النيون والأرجون والزينون والكريبتون. ينتج الملف فرق جهد متردد عالٍ بين الملف والقبّة.

الشكل 3-1 كرة بلازما.

يُنتِج فرق الجهد العالي في كرة البلازما موجات راديو. تعمل موجات الراديو الناتجة على تأيين الغازات النبيلة ما يسمح لإلكتروناتها بأن تصبح حرة. ينتج عن حركة هذه الإلكترونات حُزَم ملونة من الأضواء داخل الكرة. يعتمد لون الضوء الناتج على كثافة كل من الغازات داخل الكرة. تتبع هذه الحُزَمُ الضوئيةُ الطريقَ الأسهل للوصول إلى الأرض، وذلك عندما تقوم بلمس الكرة. وهذا يفسر مرور الضوء وكأنه يتدفَّق إلى اصابعك.

مخرجات التّعلُّم

P1206.1 يذكر نص قانون كولوم المتعلق بالقوة (القوى) بين جسمين نقطيين مشحونين أو أكثر في الهواء ويطبقه، ويستخدم المعادلة:

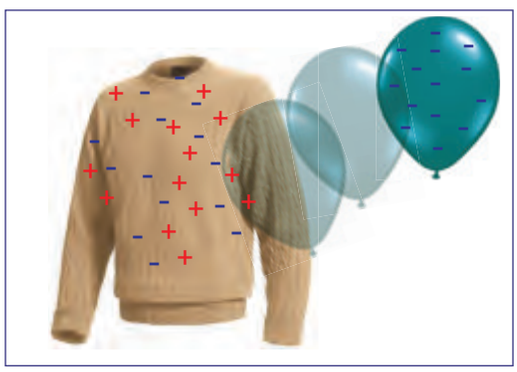
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

المفردات

Electrostatics	الكهرباء الساكنة
Electric charge	الشحنة الكهربائية
Electrically neutral	متعادل كهربائيًا
Electric force	قوة كهربائية
Electrostatic induction	الحث الكهربائي الساكن
Electroscope	الكشّاف الكهربائي
Coulomb’s Law	قانون كولوم

الكهرباء الساكنة

الكهرباء الساكنة هي تراكم الشحنة الكهربائية على سطح مادة عازلة. تنتج الكهرباء الساكنة عن فائض ضئيل للغاية من شحنة كهربائية موجبة أو سالبة، مع التذكير بأن كل مادة تحتوي على شحنات كهربائية. نحن لا نشعر في الغالب بالكهرباء الساكنة لأن الشحنات الموجبة والسالبة لا ينفصل بعضها عن بعض إلّا نادرًا. حتى القرن الثامن عشر، ظلت الكهرباء الساكنة مجهولة السبب. في العام 1750، اقترح بنجامين فرانكلين تجربة لإثبات فرضيته بأن الكهرباء الساكنة والبرق مرتبطان. في غضون السنوات القليلة التالية أثبت فرانكلين وآخرون أنه يمكن إنتاج الشرر الكهربائي من السُّحُب. البرق ليس سوى كهرباء ساكنة على نطاق واسع جدًا. تُسمّى فيزياء البرق والشحنات الساكنة **الكهرباء الساكنة Electrostatics**.

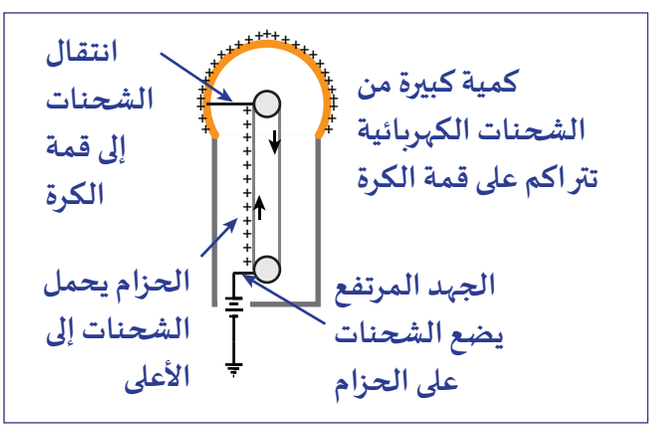


الشكل 3-2 يؤدي الدّلك إلى انتقال الشحنات السالبة إلى البالون.

عندما تقوم بدلك بالون بسترة صوفية، فسوف يجذب البالون شعرك اذا قربته من رأسك. أثناء الدلك بالسترة تنقل بعض الشحنات السالبة إلى البالون. البالون لديه الآن كمية من الشحنة السالبة والسترة لديها شحنة موجبة متساوية في المقدار (**الشكل 3-2**).

كمية الكهرباء الساكنة التي يمكنك جمعها على البالون تكون قليلة نسبيًا. لإنتاج شحنة ساكنة كبيرة، يمكن استخدام مولّد فان دي جراف. يؤدي وضع مصدر طاقة عالي الجهد داخل مولد فان دي جراف إلى توليد شحنة كهربائية على حزام عازل متحرك (**الشكل 3-3**). عندما يصل الحزام إلى القمة، يتم نقل الشحنة بوساطة موصل إلى السطح الخارجي لكرة معدنية موصلة. يمكن لجهد كرة فان دي جراف أن يصل إلى ملايين الفولتات. إلا أن الصدمة الكهربائية للجهد العالي لمولّد فان دي جراف لا تملك تيارًا كهربائيًا يكفي ليسبّب الأذى لمن يلمسه.

تشعر بـ"الصعقة" عندما تلمس مقبض باب بعد المشي على السجادة حافي القدمين. لماذا؟

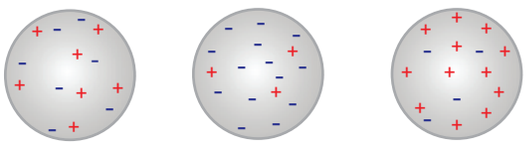


الشكل 3-3 كيفية عمل مولد دي جراف.

مراجعة حول الشحنات الكهربائية

لدينا نوعان من **الشحنات الكهربائية Electric charge**: الأولى تُسمّى الشحنة الموجبة (+) والثانية تُسمّى السالبة (-). وحدة قياس الشحنات هي الكولوم (C). ذرات كل المواد تحتوي على شحنات لأنها جزء مهمّ من مكونات الذرة. الإلكترونات تملك شحنة سالبة أمّا البروتونات فتملك شحنة موجبة ولها المقدار نفسه. تُعدّ معظم المواد **متعادلة كهربائيًّا Electrically neutral** لأن محصلة شحنتها الكهربائية تساوي صفر، لأن عدد الإلكترونات في الذرة يساوي عدد البروتونات.

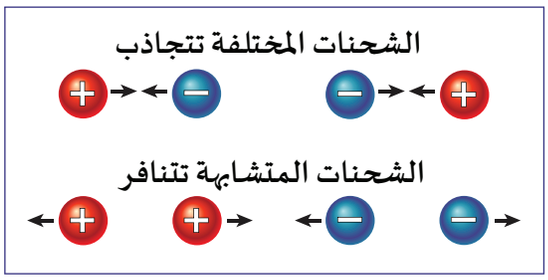
	الشحنة	الكتلة
بروتون	$+1.602\times10^{-19}\,C$	$1.673\times10^{-27}\,kg$
نيوترون	0	$1.675\times10^{-27}\,kg$
إلكترون	$-1.602\times10^{-19}\,C$	$9.11\times10^{-31}\,kg$



الشكل 4-3 بعض خصائص الشحنات الكهربائية.

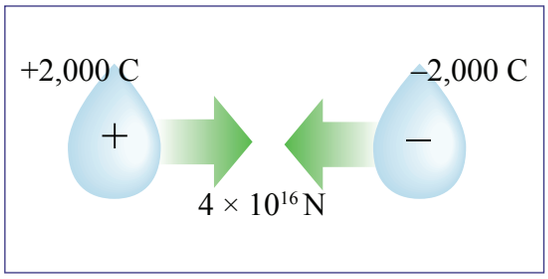
محصلة الشحنة الكهربائية هي الفرق بين الشحنة الكلية الموجبة والشحنة الكلية السالبة، **الشكل 4-3** يوضح الشحنة الكلية السالبة والموجبة والمتعادلة كهربائيًا.

الشحنة الموجبة تتنافر مع الشحنة الموجبة وتتجاذب مع الشحنة السالبة، أمّا الشحنة السالبة فتتنافر مع الشحنة السالبة وتتجاذب مع الشحنة الموجبة. الجسم المتعادل كهربائيًا لا يتأثر بقوى كهربائية مع الشحنات الموجبة والسالبة (**الشكل 5-3**).



الشكل 5-3 تجاذب الشحنات وتنافرها.

- **القوة الكهربائية Electric force** بين الشحنات قوية للغاية.
- القوة الكهربائية تجعل الذرات والجزيئات متماسكة.
- تبلغ القوى الكهربائية من الشّدة ما يجعل فصل الشحنات السالبة عن الموجبة خارج الذرة أمرًا نادرًا. لذلك يصعب قياس هذه القوى بشكل مباشر.



الشكل 6-3 القوة بين الشحنات في قطرة ماء.

هناك ما يقرب 2,000 C من الشحنات السالبة والشحنات الموجبة من الإلكترونات والبروتونات الموجودة في قطرة ماء واحدة (**الشكل 6-3**). وإذا كان بإمكانك وضع نقطتين من الماء يفصل بينهما متر واحد فإنَّ قوة الجذب الكهربائية بينهما تساوي $4\times10^{16}\,N$.

قانون كولوم

توجد قوة كهروستاتيكية بين أي جسمين مشحونين بشحنة كهربائية. الوصف الكمي للقوة الكهروستاتيكية يُسمّى **قانون كولوم Coulomb's Law** وهو الذي يُعطى في **المعادلة 3-1**. ينص قانون كولوم على أن القوّة الكهروستاتيكية بين شحنتين كهربائيّتين تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما. في الفراغ يكون ثابت كولوم:

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

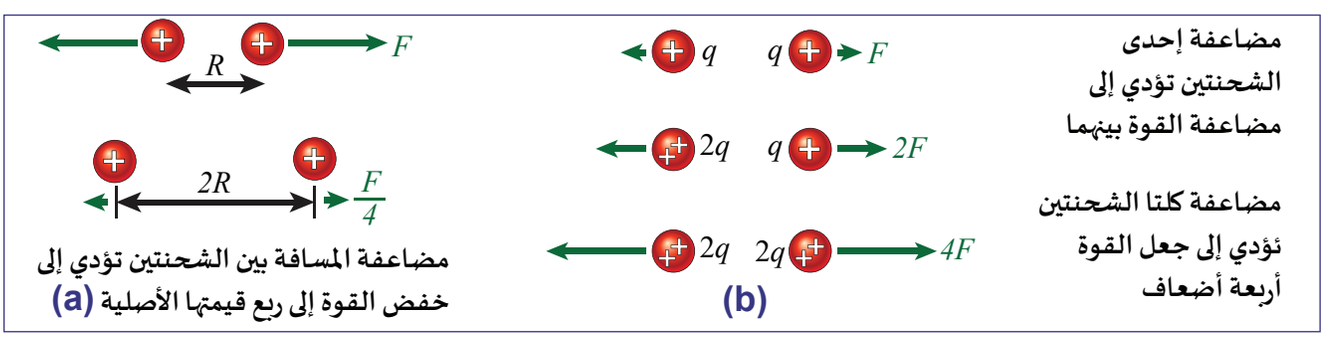
1-3 قانون كولوم

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

F	القوة الكهروستاتيكية (N)
k	ثابت كولوم 9×10^9 (Nm^2/C^2)
q_1	شحنة الجسم 1 (C)
q_2	شحنة الجسم 2 (C)
r	المسافة بين الجسمين (m)

القوة الكهروستاتيكية تعرف أيضًا بالقوة الكهربائية.

تخضع القوة الكهربائية لقانون التربيع العكسي، مثل قوة الجاذبية. إذا تمت زيادة المسافة بين جسمين مشحونين إلى ضعفي قيمتها الأصلية، فإنَّ القوة الكهربائية تنخفض إلى ربع قيمتها الأصلية. (**الشكل3-7 (a)**).



الشكل 3-7 تأثير الشحنة (a) والمسافة (b).

تعتمد القوة الكهربائية بين جسمين مشحونين على حاصل ضرب مقدار الشحنتين. إذا تضاعفت الشحنة q_1، تتضاعف القوة الكهربائية. وإذا تضاعفت الشحنة q_2 أيضًا، فإن القوة تتضاعف مرة أخرى وتصبح أربعة أضعاف قيمتها الأولى (**الشكل3-7 (b)**). إذا كانت شحنة أحد الجسمين صفرًا، فإنَّ q_1 أو q_2 تكون صفرًا، وتكون القوة في **المعادلة (3-1)** صفرًا.

ثابت كولوم، k، في **المعادلة 3-1** يعتمد على الأبعاد الهندسية للكرة، وعلى خصائص المادة التي تمر بها القوى. تحدد خصائص المواد بالسماحية الكهربائية، ε، والتي تختلف بين مادة وأخرى (**المعادلة 2-3**).

2-3 ثابت كولوم

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon}$$

k	ثابت كولوم (Nm^2/C^2)
ε	السماحية الكهربائية (F/m)

ابحث واشرح سبب اختلاف السماحية الكهربائية بين مادة وأخرى.

السماحية الكهربائية

السماحية الكهربائية لوسط معيّن هي حاصل ضرب السماحية النسبية للوسط بسماحية الوسط الحر (الفراغ) وقيمتها $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m . السماحية النسبية تسمى أيضًا بثابت عزل الوسط. يشتمل **الجدول 3-1** على ثابت العزل لبعض المواد .

السماحية النسبية		
$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$	ε	السماحية الكهربائية (F/m)
	ε_r	السماحية النسبية
	ε_0	سماحية الفراغ (8.85×10^{-12} F/m)

الجدول 3-1 السماحية النسبية لبعض المواد.

الفراغ	$\varepsilon_r = 1.000$
الهواء الجاف	$\varepsilon_r = 1.006$
الورق	$\varepsilon_r = 2.5\text{-}3.5$
التفلون	$\varepsilon_r = 2.0$
الجرافيت	$\varepsilon_r = 12$
الماء	$\varepsilon_r = \sim 80$

مثال 1

مقدار القوة الكهربائية في الفراغ بين شحنتين كهربائيتين هو 10 N. كم سيصبح مقدار هذه القوة إذا وضعت الشحنتين في مادة الجرافيت وتضاعفت المسافة بينهما؟ علمًا بأن السماحية النسبية للجرافيت هي 12.

المطلوب: مقدار القوة F_2 بين الشحنتين.

المُعطى: مقدار القوة بين الشحنتين في الفراغ $F_1 = 10$ N

السماحية الكهربائية للجرافيت $12\ \varepsilon_o$

المسافة بين الشحنتين $r_2 = 2r$

العلاقات:

$$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$$

الحل: نعلم أن مقدار القوة بين الشحنتين هو 10 N

$$F_1 = \frac{k q_1 q_2}{r^2} = 10 \text{ N}$$

ولحساب مقدار القوة في الجرافيت:

$$F_2 = \frac{1}{12}\frac{k q_1 q_2}{(2r^2)} = \frac{1}{12\times 4}\frac{k q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{48}\frac{k q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{48}\times F_1 = \frac{10}{48}$$

$$F_2 = 0.208 \text{ N}$$

مثال 2

شحنتان 1+ µC و 1- µC المسافة بينهما 1 cm في الفراغ. ما قيمة واتجاه القوة بينهما؟

المطلوب: القوة F

المُعطى: r = 1 cm

العلاقات: $F = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$

الحل: المسافة بين الشحنتين

1 cm = 0.01 m

باستخدام قانون كولوم، نحصل على:

$$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(10^{-6})(-10^{-6})}{(0.01)^2} = \boxed{-90\ \text{N}}$$

الإشارة السالبة في الإجابة تعني أن القوة بين الشحنتين هي قوة تجاذب.

مثال 3

كرتان مشحونتان، تقع إحداهما على مسافة r من الأخرى في الفراغ، وتتأثر كلتاهما بقوة تنافر مقدارها 90 N. كم يجب أن تكون المسافة بينهما بحيث تنخفض قوة التنافر إلى 10 N؟

المطلوب: المسافة بين الجسمين

المُعطى: $F_1 = 90\ \text{N};$

$F_2 = 10\ \text{N};$

العلاقات: $F \alpha \frac{1}{r^2}$

الحل: تتناسب قوة التنافر تناسبًا عكسيًا مع مربع المسافة بين الشحنتين. القوة ستتناقص بمعدل :1/9

$$F_2 = 90\ \text{N} \propto \frac{1}{r_2^2} \quad \text{و} \quad F_1 = 90\ \text{N} \propto \frac{1}{r_1^2}$$

$$\frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{90}{10} = 9 \longrightarrow \frac{r_2}{r_1} = 3 \quad \text{ما يعني أن:}$$

لكي تنخفض القوة إلى تسع قيمتها الأصلية فإنَّ المسافة بين الشحنتين يجب أن تزداد الى ثلاثة أمثال قيمتها الأصلية.

مثال 4

وضعت شحنتين كهربيتين موجبتين $q_1 = 2\ \mu C$ و $q_2 = 8\ \mu C$ على خط مستقيم وعلى مسافة 3 cm بينهما. ووضعت شحنة كهربائية ثالثة q على الخط نفسه بينهما بحيث تكون محصلة القوة الكهربائية عليها صفرًا. احسب المسافة بين q و q_1.

المطلوب: المسافة بين q و q_1 ، $x = ?$

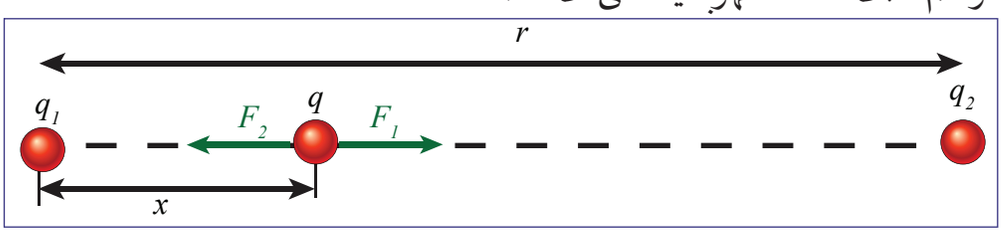
المُعطى: الشحنة ; $q_1 = 2\ \mu C$

الشحنة ; $q_2 = 8\ \mu C$

المسافة بين الشحنتين q_1 و q_2: $r = 3\ cm$

العلاقات: $$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$$

الحل: نرسم الشحنات الكهربائية على الخط.



نسمي المسافة بين الشحنتين q_1 و q ، x

القوة التي تتأثر بها الشحنة q نتيجة للشحنة q_1

$$F_1 = \frac{k q q_1}{x^2}$$

القوة التي تتأثر بها الشحنة q نتيجة للشحنة q_2

$$F_2 = \frac{k q q_2}{(r-x)^2}$$

تكون محصلة القوة على q صفرًا عندما تكون $F_1 = F_2$

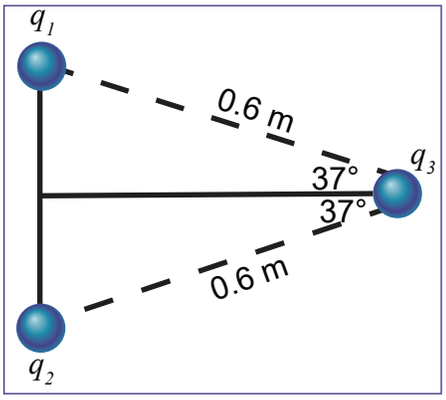
$$F_1 = F_2 \Rightarrow \frac{\cancel{k} q q_1}{x^2} = \frac{\cancel{k} q q_2}{(r-x)^2} \Rightarrow \frac{2}{x^2} = \frac{8}{(r-x)^2}$$

$$2(r-x)^2 = 8x^2 \Rightarrow \sqrt{(r-x)^2} = \sqrt{4x^2}$$

$$r - x = 2x \Rightarrow x = \frac{r}{3} = 1\ cm$$

مثال 5

توضع ثلاث شحنات كهربائية كما في **الشكل 3-8** وقِيَمُها $q_1 = -3.5\ \mu C$ و $q_2 = -3.5\ \mu C$ و $q_3 = -5\ \mu C$. احسب مقدار القوة الكهربائية التي تؤثر في الشحنة q_3.



الشكل 3-8 ترتيب الشحنات.

المطلوب: مقدار القوة الكهربائية على الشحنة q_3.

المُعطى: مقدار الشحنة: $q_1 = -3.5\ \mu C$

مقدار الشحنة: $q_2 = -3.5\ \mu C$

مقدار الشحنة: $q_3 = -5\ \mu C$

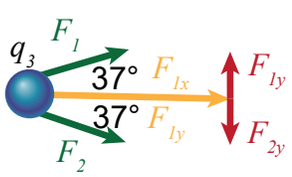
المسافة بين الشحنتين q_1 و q: $r = 0.6\ m$

المسافة بين الشحنتين q_2 و q: $r = 0.6\ m$

العلاقات:
$$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$$

الحل: نحسب أولًا مقدار القوة التي تؤثر في q_3 نتيجة للشحنة q_1. وبما أن q_1 و q_2 لهما المقدار نفسه، فإن القوتان على الشحنة لـ q_3 نتيجة للشحنتين q_1 و q_2 لهما المقدار نفسه.

$$F_1 = \frac{k q_1 q_3}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(3.5\times10^{-6})(5\times10^{-6})}{(0.6)^2} = 0.438\ N$$



لاحظ أننا لم نستخدم الإشارات السالبة للشحنات لأننا حسبنا مقدار كل من القوتين. الإشاراتان السالبتان لأي شحنتين تدل على أن القوة بينهما قوة تنافر. يمكن رسم اتجاه محصلة القوتين المؤثرتين في الشحنة q_3 كما هو موضح في الشكل المجاور. للحصول على المحصلة، علينا معرفة مركبتيها x و y ثم جمعهما.

$$F = F_{1x} + F_{2x} + F_{1y} - F_{2y}$$

F_{1y} و F_{2y} متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه، فيكون جمعهما صفرًا. F_{1x} و F_{2x} متساويتن أيضا في المقدار ولكن لهما الاتجاه نفسه. فيكون مقدار المحصلة:

$$F = 2F_{1x} = 2(0.438)\cos 37° = \boxed{0.7\ N}$$

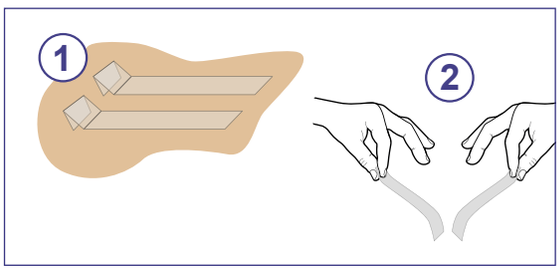
نشاط 3-1 الكهرباء الساكنة على شريط شفّاف

سؤال الاستقصاء	كيف يمكنك أن تتحقّق من وجود نوعين من الشحنات؟
الموادّ المطلوبة	شريط لاصق شفّاف.

خطوات التجربة

الجزء 1: شحن الشريط

1. خذ قطعتين من شريط لاصق شفّاف طوله 4 cm تقريبًا. اطوِ طرفي كل من القطعتين لكي تمسك بهما كمقبض، كما في **الشكل 3-9**.



الشكل 3-9 ترتيب الشريطين.

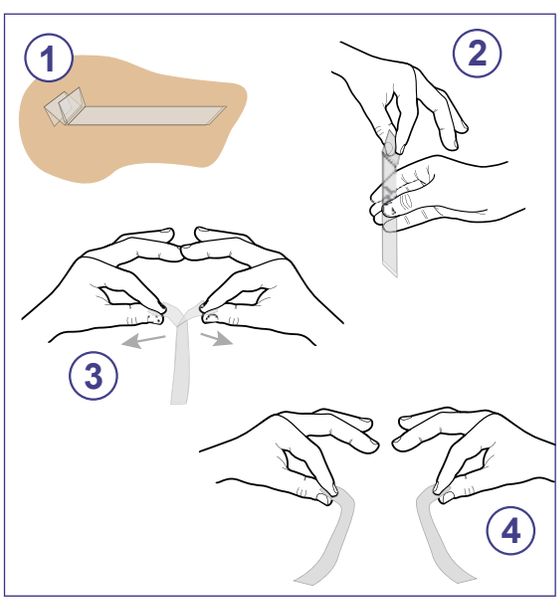
2. الصق قطعتي الشريط جنبًا إلى جنب على طاولة من دون أن تلمس إحداهما الأخرى. امسك بمقبضي الشريطين وارفعهما معًا بسرعة إلى الأعلى.
3. قرّب الشريطين أحدهما من الآخَر من دون أن تدعهما يتلامسان.

الأسئلة

a. ماذا يحدث عندما تقرّب أحد الشريطين من الآخَر (من دون أن يتلامسا)؟
b. ما الذي يمكنك استنتاجه عن أوجه التشابه أو الاختلاف بين الشحنات الكهربائية على الشريطين؟

الجزء 2: شحن الشريط بطريقة أخرى

1. خذ قطعتين من الشريط اللاصق الشفّاف. هذه المرة، الصق أحد الشريطين على الطاولة، ثم الصق الشريط الآخر فوقه. كما هو مبين في **الشكل 3-10**.
2. استخدم المقبض لسحب الشريطين معًا من على الطاولة. أدلك الشريط بأصابعك لإزالة أية شحنة موجودة.
3. افصل أحد الشريطين عن الآخر بوساطة المقبضين.



الشكل 3-10 (الجزء الثاني).

الأسئلة

ماذا يحدث عندما تقرّب أحد الشريطين من الآخر (من دون أن يتلامسا)؟

تقويم الدرس 3-1

1. a. ما أوجه الشبه بين قانون كولوم وقانون الجاذبية لنيوتن؟
   b. ما أوجه الاختلاف بين قانون كولوم وقانون الجاذبية لنيوتن؟

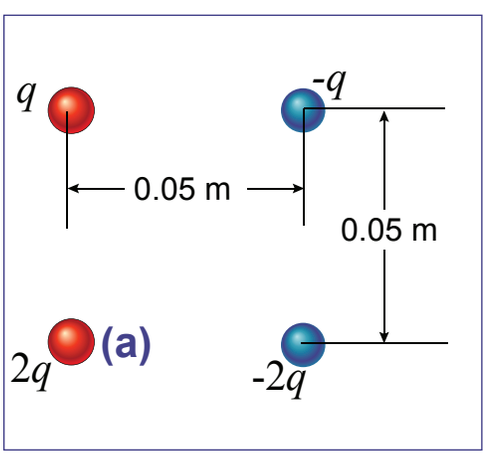
2. يوجد جسمان مشحونان يفصل بينهما متر واحد. احسب مقدار القوة الكهربائية بينهما واتجاهها إذا كانت القيم كما يلي:
   a. +1 C و +1 C
   b. +1 C و -1 C
   c. -1 C و -1 C

3. إذا كانت المسافة بين شحنتين كهربائيتين متماثلتين 1 m وقوة التنافر الكهربائية بينهما 1 N، فكم يكون مقدار كل من الشحنتين؟

4. شحنتان، إحداهما موجبة والأخرى سالبة تفصل بينهما مسافة 25 cm وتتأثر كل منهما بقوة جذب مقدارها 5 N. ما هو مقدار القوة الكهربائية واتجاهها التي تؤثر في كل منهما عندما تصبح المسافة بينهما 50 cm؟

5. إذا كانت المسافة بين شحنتين كهربائيتين $q_1 = 3.5\ \mu C$ و $q_2 = -1.5\ \mu C$ في الفراغ هي 0.12 m، فكم يكون مقدار القوة الكهربائية بينهما؟

6. وُضِعَت أربع شحنات عند رؤوس مربع طول ضلعه 0.05 m كما في الشكل حيث $q = 1 \times 10^{-7}\ C$. احسب محصلة القوة الكهربائية على الشحنة 2q عند الزاوية (a) السفلية إلى اليسار.



7. وُضِعَت شحنتان $+1 \times 10^{-7}\ C$ و $+3 \times 10^{-7}\ C$ في مادة التفلون البلاستيكي، على مسافة 0.1 m من بعضهما البعض. احسب القوة الكهربائية بين الشحنتين (ملاحظة: استخدم الجدول 3-1)

8. تمت زيادة المسافة بين شحنتين كهربائيتين +q و -q من r إلى 3r. بأي معامل يجب تغيير قيمة كل من الشحنتين بحيث تبقى القوة الكهربائية بينهما هي ذاتها؟

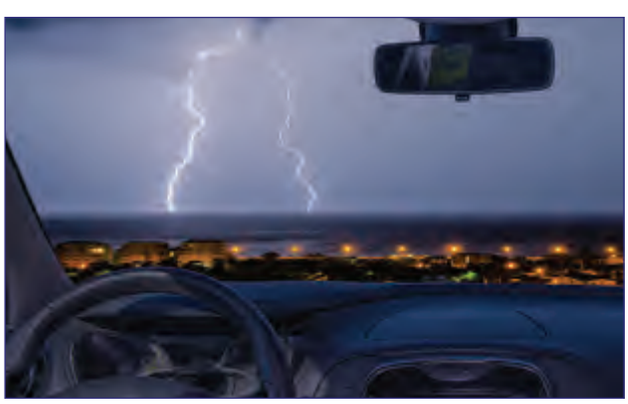
الدرس 2-3

المجال الكهربائي والجهد الكهربائي
Electric Field and Electric Potential

المفردات

Electric field	المجال الكهربائي
Electric field lines	خطوط المجال الكهربائي
Electric potential energy	طاقة الوضع الكهربائية
Electric potential	الجهد الكهربائي
Electric potential difference	فرق الجهد الكهربائي
Electron Volt	إلكترون فولت
Equipotential lines	خطوط تساوي الجهد

إذا كنت في سيارة أثناء عاصفة كهربائية، فما الذي يجب أن تفعله؟ على افتراض أن للسيارة جسمًا معدنيًا، فإن أكثر الأماكن أمنًا هو داخل السيارة! السبب الذي جعل داخل السيارة المعدنية مكانًا آمنًا هو طبيعة المجالات الكهربائية والموصلات. جسم السيارة المعدني يُعدّ موصلًا جيّدًا للكهرباء يحمي مَن بِداخِلِها من المجالات الكهربائية الخارجية، بما في ذلك المجالات التي يسبّبها البرق.



الشكل 3-11 أكثر الأماكن أمنًا أثناء العاصفة الرعدية هو داخل السيارة.

مخرجات التّعلُّم

P1205.2 يعرّف الإلكترون فولت بأنه الشغل المبذول على إلكترون عند تسريعه بواسطة فرق جهد مقداره 1 فولت. ويتذكر أن: $1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$

P1205.3 يحل مسائل حسابية تتعلق بطاقة الوضع الكهربائية وفرق الجهد الكهربائي.

P1206.2 يعرّف شدة المجال الكهربائي الناتج من جسيمات مشحونة كقوة كهروستاتيكية لكل وحدة شحنة، ويستخدم المعادلة: $E = \frac{kQ}{r^2}$

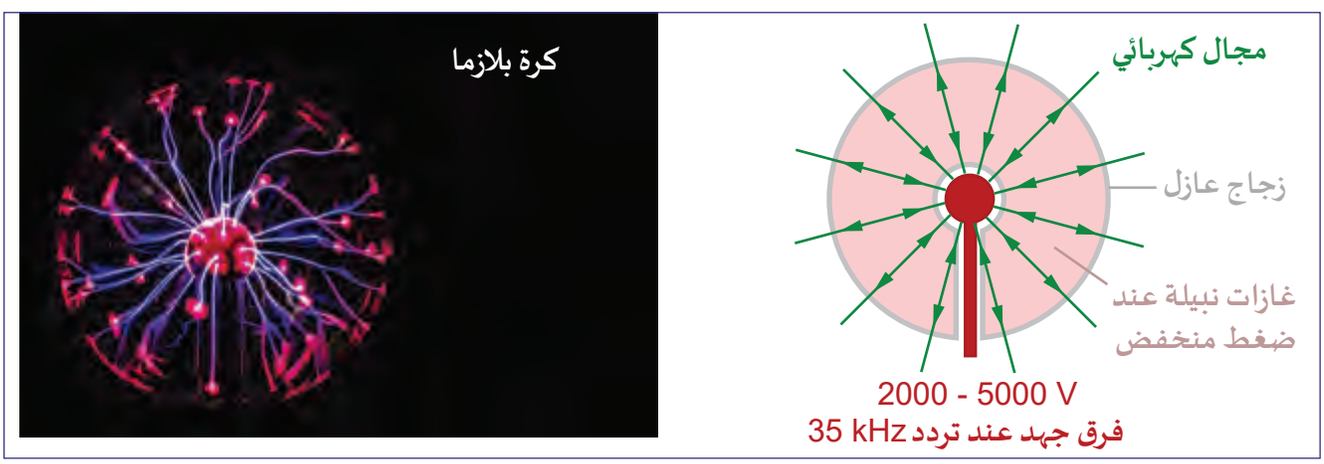
P1206.3 يعرّف الجهد الكهربائي عند نقطة والناتج من جسيمات مشحونة من خلال المعادلة: $V = \frac{kQ}{r}$

تصور الكهرباء

كيف يمكننا ملاحظة الكمّيات غير المرئية، مثل المجال الكهربائي؟

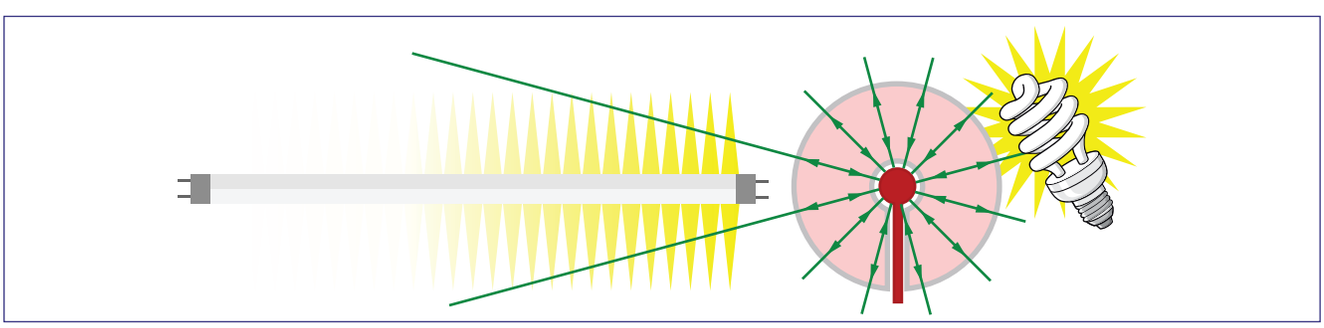
يمكن لبعض الحيوانات، مثل الأسماك الكهربائية وأسماك القرش استشعار الكهرباء مباشرة.

لا يستطيع البشر «رؤية» الكهرباء مباشرة. لذا، يجب استخدام آلية ما لجعل الكهرباء مرئية. كرة البلازما هي أداة ممتازة لرؤية المجالات الكهربائية. تُصنع كرة البلازما من زجاج عازل، وتحتوي على مزيج من الغازات النبيلة، مثل النيون والأرجون عند ضغط منخفض (**الشكل 3-12**).



الشكل 3-12 مُكوّنات كرة البلازما.

عند مركز كرة البلازما ملف كهربائي عالي الجهد ينتج فرق جهد متردد يتراوح بين 2,000 V و 5,000 V تردده 35 kHz. يُنتِجُ ذلك مجالًا كهربائيًا يتجه شعاعيًا من المركز إلى الخارج. تتردد دورات المجال من الموجب إلى السالب 35,000 مرة في الثانية. تتأيَّن بعض الذرات في كل دورة وينطلق الضوء منها عندما تصطدم الإلكترونات بالأرجون وتتسبّب في إصدار إلكترونات ضوئية. مقارنة بالجهد العالي داخل الكرة، فإن الهواء الموجود خارج كرة البلازما يتصل بالأرض. لذلك، تشكل البلازما أقواسًا من المركز إلى الحافة. يؤدّي لمس كرة البلازما إلى اتصال أفضل بالأرض فينتقل القوس إلى موضع إصبعك.



الشكل 3-13 المجال الكهربائي المنطلق إلى خارج زجاج كرة البلازما.

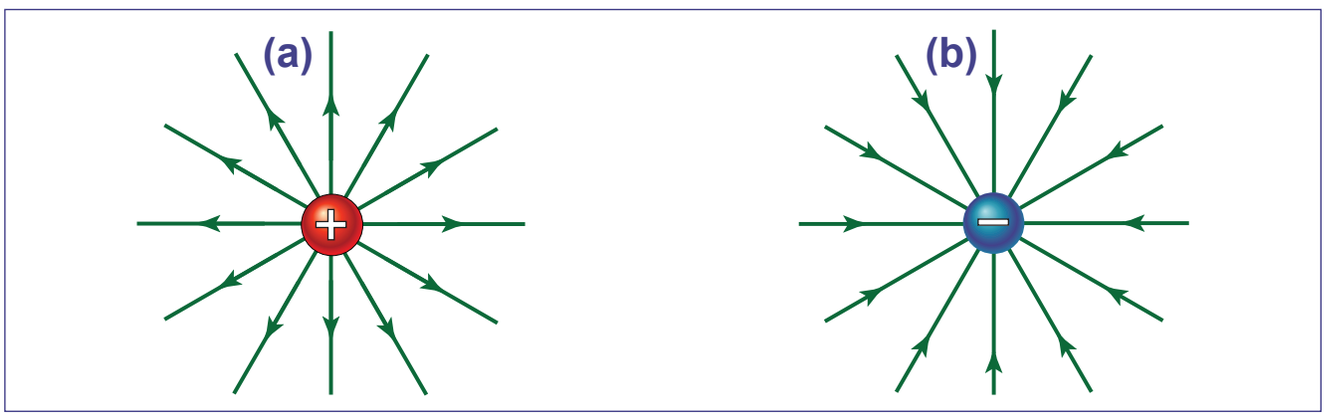
يتجه المجال الكهربائي الناتج عن كرة البلازما إلى ما هو أبعد من الزجاج الذي يحتوي على النيون والأرجون. إذا وضعت مصباح الفلورسنت المدمج بالقرب من كرة البلازما فإن المصباح سوف يضيء. ويضيء أيضًا أنبوب الفلورسنت الطولي عند طرفه الأقرب إلى كرة البلازما. أمّا الضوء الموجود عند أجزاء الأنبوب الأبعد عن الكرة فيخفت لأن المجال الكهربائي يكون أضعف.

المجال الكهربائي

لا تنتقل القوة بين شحنتين على الفور. بدلًا من ذلك، تنشئ كل شحنة مجالًا كهربائيًا حولها في الفراغ. يُعَرَّف **المجال الكهربائي Electric field** بأنّه الخاصية الكهربائية عند أي نقطة في الفضاء تُمَكِّنُها من التأثير بقوة في أي شحنة كهربائية توضع عند تلك النقطة. يمكنك أن تتصوَّر أن المجال الكهربائي يعمل كمنَظِّم للطاقة الكهربائية التي توزّع القوى الكهربائية بين الشحنات.

يمكن تمثيل المجال الكهربائي بمخططات تشبه تلك المستخدمة للمجال المغناطيسي. **خطوط المجال الكهربائي Electric field lines** تمثل القوى المؤثرة في وحدة شحنة موجبة اختبارية في كل الاتجاهات.

- يتجه المجال الكهربائي بعيدًا عن الشحنات الموجبة (**الشكل 3-14 (a)**).
- يتجه المجال الكهربائي نحو الشحنات السالبة (**الشكل 3-14 (b)**).
- تكون الخطوط متقاربة عندما يكون المجال أقوى ومتباعدة عندما يكون المجال أضعف.



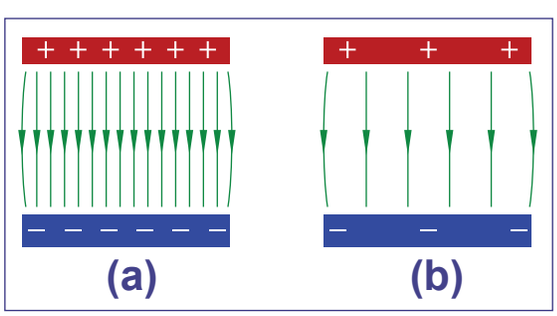
الشكل 3-14 اتجاه المجال الكهربائي يكون بعيدًا عن شحنة موجبة كما في (a) ونحو شحنة سالبة كما في (b).

اتجاه خطوط المجال الكهربائي هو اتجاه القوة على شحنة اختبار.

شحنة الاختبار هي شحنة موجبة وهمية نستخدمها لوصف القوة عند نقطة معينة. لاحظ أن الشحنة الموجبة الحقيقية تنشىء مجالًا كهربائيًا خاصًا بها، وهذا من شأنه أن يغير مقدار المجال الذي نختبره!

اتجاه المجال الكهربائي يكون نحو الشحنة السالبة وبعيدًا عن الشحنة الموجبة .

عندما نرسم خطوط المجال الكهربائي، فإن المسافة بين الخطوط تدل على مدى قوة هذا المجال. يظهر **الشكل 3-15 (a)** مثالًا على خطوط مجال كهربائي منتظم قوي، أمّا **الشكل 3-15 (b)** فيظهر مثالًا على خطوط مجال كهربائي منتظم ضعيف.

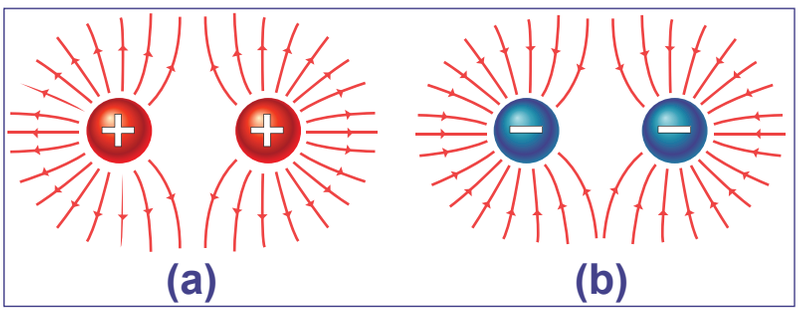


الشكل 3-15 مجال كهربائي قوي (a) وضعيف (b).

المجال الكهربائي بين شحنتين متشابهتين

نتصوَّر المجال الكهربائي حول شحنتين نقطيتين، فنلاحظ أن المجال الكهربائي E الناتج عند أي موقع من الفراغ هو القوة المؤثرة في شحنة اختبار موجبة تخيلية عند هذا الموقع. سيحدث التنافر بين شحنة الاختبار الموجبة وكلتا الشحنتين إذا كانتا موجبتين.

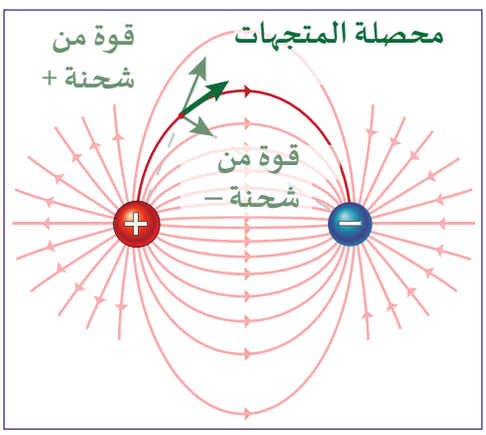
التنافر بين الشحنات الموجبة يجعل خطوط المجال الكهربائي تتجه بعيدًا عن الشحنة كما في **الشكل 3-16 (a)**. الشحنة الموجبة الاختبارية تنجذب إلى كلتا الشحنتين السالبتين، فيكون اتجاه خطوط المجال الكهربائي نحو الشحنتين السالبتين كما في **الشكل 3-16 (b)**.



الشكل 3-16 خطوط المجال الكهربائي لشحنتين موجبتين (a) ولشحنتين سالبتين (b).

المجال الكهربائي لشحنة موجبة وشحنة سالبة

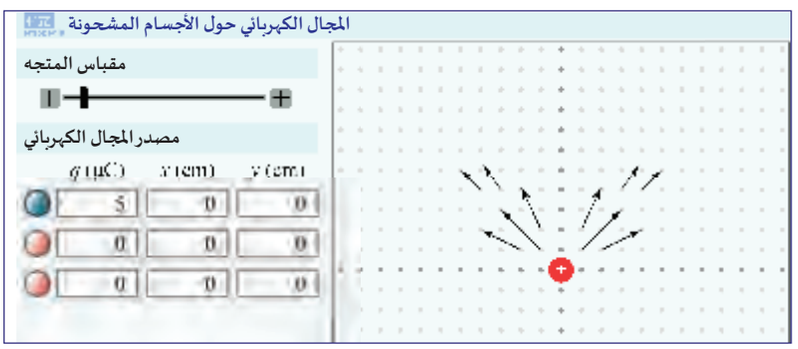
محصلة القوى على شحنة اختبار عند أي موقع هو المجموع الاتجاهي لمحصلة القوى الفردية الناتجة عن كل شحنة في النظام. يكون اتجاه خطوط المجال، بين شحنة موجبة وشحنة سالبة، من الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة. وتكون محصلة المجال الكهربائي عند أية نقطة من الفراغ هي حاصل جمع متجهَيْ مجالَي الشحنتين السالبة والموجبة كما هو موضَّح في **الشكل 3-17**.



الشكل 3-17 المجال الكهربائي لشحنتين، إحداهما موجبة والأخرى سالبة.

المجال الكهربائي حول الاجسام المشحونة

باستخدام المحاكاة، كيف يتغيّر المجال الكهربائي عندما تتضاعف المسافة بين الشحنتين؟ وكيف يتغيّر هذا المجال إذا أصبحت المسافة ثلاثة أضعاف قيمتها الأصلية؟ (**الشكل 3-18**)



الشكل 3-18 المجال الكهربائي حول الأجسام المشحونة.

حساب شدّة المجال الكهربائي

المجال الكهربائي هو مجال متجه يحدد مقدار القوة الكهربائية واتجاهها على أية شحنة في الفراغ. يتم الحصول على شدة المجال الكهربائي من خلال **المعادلة 3-3**.

3-3	المجال الكهربائي		
	$E = \frac{F}{q}$	E	شدّة المجال الكهربائي (N/C)
		F	القوة الكهربائية (N)
		q	الشحنة الكهربائية (C)

تنص **المعادلة 3-3** على أن شدة المجال الكهربائي، E، عند نقطة في الفراغ هي القوة الكهربائية التي تؤثر في وحدة شحنة موجبة وتُحسب بقسمة القوة الكهربائية F على الشحنة q. عند تلك النقطة. وحدة قياس المجال الكهربائي E هي نيوتن لكل كولوم (N/C). هذا يعني أنه، إذا كانت شدة المجال الكهربائي عند نقطة معينة في الفراغ تساوي 1 N/C، فإنَّ شحنة 1 C الموضوعة عند هذه النقطة ستتعرّض لقوة مقدارها 1 N. أما الشحنة التي يبلغ مقدارها 0.5 C فتتعرض لقوة مقدارها 0.5 N.

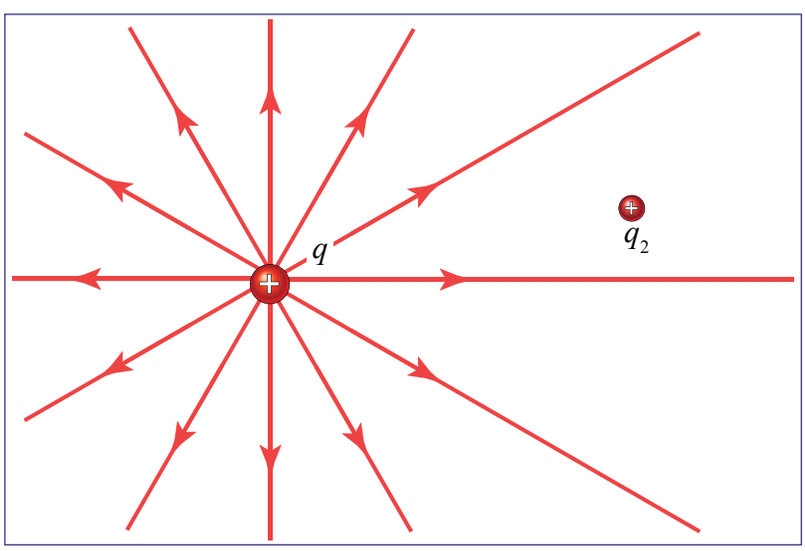
إستنتاج شدّة المجال الكهربائي لشحنة نقطية

كيف يمكننا حساب شدّة المجال الكهربائي عند نقطة بالقرب من شحنة نقطية q (**الشكل 3-19**)؟ افترض أن لدينا شحنة اختبارية تخيلية q_2 تقع على مسافة r. وفقًا لقانون كولوم، فإنَّ القوة الكهروستاتيكية بين الشحنتين ستكون: $F = \frac{k q q_2}{r^2}$

وحيث إنَّ المجال الكهربائي $E = \frac{F}{q_2}$ فإن

$$E = \frac{F}{q_2} \Rightarrow \frac{\frac{k q q_2}{r^2}}{q_2}$$

وبذلك، يمكن أن نستنتج المعادلة التالية **4-3**



الشكل 3-19 ما مقدار المجال الكهربائي عند موقع الشحنة q_2؟

4-3	شدة المجال الكهربائي لمصدر نقطي		
	$E = \frac{k q}{r^2}$	E	شدّة المجال الكهربائي (N/C)
		k	ثابت كولوم 9×10^9 (Nm^2/C^2)
		q	الشحنة الكهربائية (C)
		r	المسافة بين الشحنتين (m)

مثال 6

a. احسب شدة المجال الكهربائي E واتجاهه عند نقطة تبعد 4 mm من شحنة نقطية 2 nC.

b. ما القوة الكهربائية الناتجة على شحنة 0.025µc- موجودة عند النقطة المذكورة في الفرع (a).

المطلوب:

a. شدة المجال الكهربائي E

b. القوة الكهربائية F

المُعطى:

$q = 2\ nC;$

$q_2 = -0.025\ \mu C;$

$r = 4\ mm;$

العلاقات:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

$$E = \frac{F_e}{q_2}$$

الحل:

a. $2\ nC = 2 \times 10^{-9}\ C,$

$4\ mm = 4 \times 10^{-3}\ m$

$$E = \frac{k_e q}{r^2} = \frac{\left(9\times10^{9}\right)\left(2\times10^{-9}\right)}{\left(4\times10^{-3}\right)^2} = \boxed{11.25\times10^{5}\ N/C}$$

وحيث إنَّ الشحنة موجبة، فإن المجال الكهربائي يتجه بعيدًا عنها.

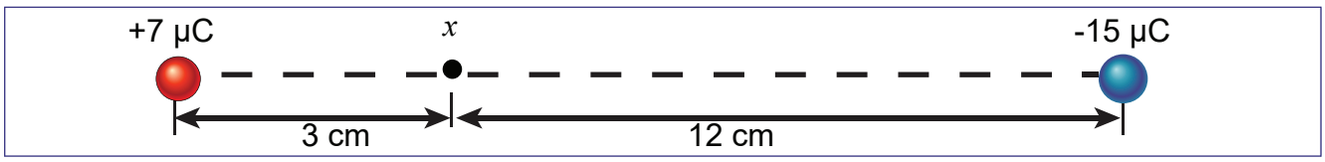
b. $-0.025\ \mu C = -0.025\times10^{-6}\ C,$

$$F_e = Eq_2 = \left(11.25\times10^{5}\right)\left(0.25\times10^{-6}\right) = \boxed{0.28\ N}$$

وحيث أ إنَّ q_2 هي شحنة سالبة، فإن اتجاه القوة عليها يكون بعكس اتجاه المجال الكهربائي الناتج من q.

مثال 7

إذا كانت المسافة بين شحنة موجبة وأخرى سالبة 15 cm كما في **الشكل 3-20**، احسب شدة المجال الكهربائي عند النقطة x نتيجة للشحنتين.



الشكل 3-20 احسب المجال الكهربائي عند النقطة x.

المطلوب: شدّة المجال الكهربائي E

المُعطى:

$q_1 = +7\ \mu C$

$q_2 = -15\ \mu C$

$r_1 = 3\ cm$

$r_2 = 12\ cm$

العلاقات:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

الحل:

علينا أوّلًا حساب شدّة المجال الكهربائي عند النقطة x لكل من q_1 و q_2 على انفراد، وبعدها نحسب حاصل جمعهما. المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة q_1 يتجه نحو اليمين، بعيدًا عن الشحنة لأنها موجبة.

$$E_1 = \frac{kq_1}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(7\times10^{-6})}{(0.03)^2} = 7\times10^7\ \text{N/C}$$

كذلك، فإن شدّة المجال الكهربائي عند النقطة x والناتج عن الشحنة q_2 يتجه نحو اليمين لأنها شحنة سالبة، ومقداره:

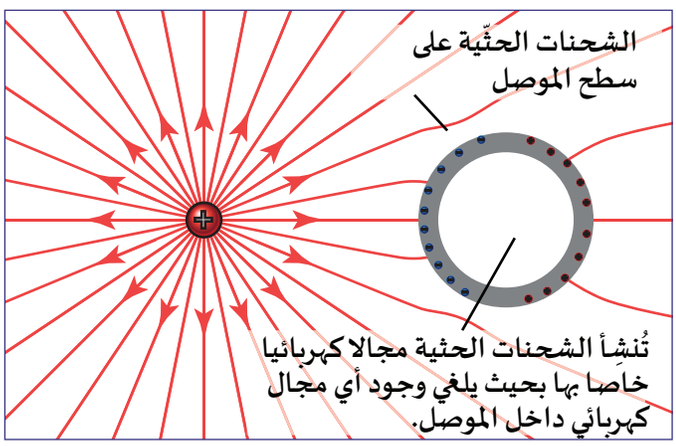
$$E_2 = \frac{kq_2}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(15\times10^{-6})}{(0.12)^2} = 9.4\times10^6\ \text{N/C}$$

ولأن المجالين لهما الاتجاه نفسه، فتكون المحصلة جمعهما.

$$E_T = E_1 + E_2 = \boxed{7.9\times10^7\ \text{N/C}}$$

قفص فارادي كَوَاق

تتواجد المجالات الكهربائية ذات الشدة القليلة من حولنا. فكل سلك كهربائي في منزلك يُنشِأ مجالا كهربائيا عندما يُستخدم للإضاءة. أجهزة الهاتف الجوّال والأجهزة اللاسلكية وأجهزة الراديو تتأثر بهذه المجالات الكهربائية. مكالمات الهاتف الجوال والكهرباء الساكنة تَنتُجُ جُزئِيًّا من مجالات كهربائية ظرفية.



الشكل 3-21 استخدام الموصل كدرع للمجال الكهربائي.

الموصل الكهربائي، كالمواد المعدنية هو مادة تشتمل على شحنات حرة تتحرك بسهولة. افترض مادة موصلة موضوعة في مجال كهربائي كالذي في **الشكل 3-21**. تتأثر الشحنات الحرة بسرعة بالمجال الكهربائي وتعيد ترتيب أماكنها بحيث يصبح المجال الكهربائي داخل الموصل صفرًا.

يصبح المجال الكهربائي داخل الموصل المستقر صفرا لأن الشحنات الحرة فيه تتوقف عن الحركة فقط عندما ينعدم وجود أي قوة كهربائية تؤثر فيها.

عندما تصبح القوة الكهربائية داخل المادة الموصلة صفرا، تكون شحناته التي أعادت ترتيب مواقعها قد أنشأت مجالا كهربائيا يعاكس ويعادل المجال الكهربائي الخارجي، وهو ما يسمى التدريع (الحماية) الكهربائي.

المجال الكهربائي داخل الموصلات الستاتيكية يكون صفرًا.

في حالة اشتثنائية، لا يكون المجال الكهربائي داخل المادة الموصلة صفرا، وذلك عند مرور تيار كهربائي بداخلة، ولا يكون الموصل في هذه الحالة استاتيكيًا (مستقرًا)

وقاية أسلاك الحاسوب

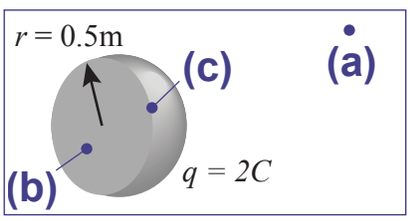
يمكن لإشارات شبكات الحاسوب أن تتأثر سلبيًّا بالمجالات الكهربائية. لمنع ذلك، تُغلَّف كافة أسلاك الحواسيب بمادة معدنية موصلة من الخارج لحماية الأسلاك الداخلية. تعمل هذه المادة كدرع ضد تأثيرات المجالات الكهربائية الإضافية (**الشكل 3-22**)

الشكل 3-22 حماية سلك الحاسوب باستخدام درع معدني.

اخترع مايكل فارادي قفص فارادي في العام 1836. صُنِعَ قفص فارادي من مادة موصلة تستخدم لحماية كل ما بداخل القفص من أي تأثير للكهرباء أو المجالات الكهربائية الخارجية. فعند تعرض قفص فارادي للبرق، يبقى أي إنسان بداخلة بمأمن من أي خطر.

مثال 8

احسب شدة المجال الكهربائي في الأماكن الموضحة في الشكل حول كرة كرة موصلة مشحونة وحولها، إذا كان نصف قطر الكرة r = 0.5 m والشحنة الكلّية عليها 2C .



a. عند مسافة 10 cm من مركز الكرة.

b. داخل الكرة.

c. عند سطح الكرة.

المطلوب: شدة المجال الكهربائي.

المُعطى: $r = 0.5\ \text{m}$ ، $q_1 = +2\ \text{C}$

العلاقات:

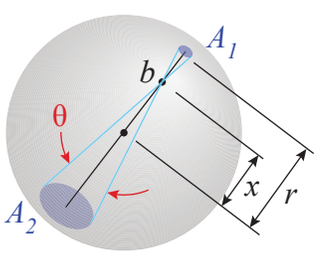
$$E = \frac{kq}{r^2}$$

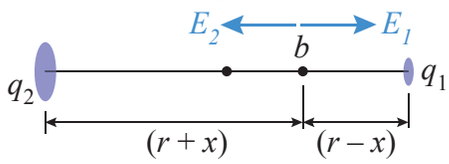
الحل: لأن الكرة مصنوعة من مادة موصلة، فإن الشحنة ستتنافر مع بعضها البعض بحيث تصل إلى السطح وتتوزع علية بشكل متساوٍ.

a. لأن الشحنة تتوزع بالتساوي على سطحها، فإن شدة المجال الكهربائي خارج الكرة تساوي شدة المجال الناتج عن شحنة منفردة عند مركزها تحمل كل الشحنة التي على سطحها.

$$E_1 = \frac{kq_1}{r} = \frac{(9 \times 10^9)(2)}{(0.5)^2} = 7.2 \times 10^{10}\ \text{N/C}$$

b. بالنسبة لنقطة b داخل الكرة، نرسم مخروطين بزاوية θ حول الخط الذي يمر في النقطة b وفي مركز الكرة. شدة المجال الكهربائي عند النقطة b هي التي تنتج من الشحنتين q_1 و q_2 واللتين هما حاصل ضرب كثافة الشحنة السطحية بالمساحتين A_1 و A_2 على السطح كما في الشكل أدناه.





$$A_1 = \theta(r-x)^2 \qquad q_1 = \rho A_1 = \rho\theta(r-x)^2$$

$$A_2 = \theta(r+x)^2 \qquad q_2 = \rho A_2 = \rho\theta(r+x)^2$$

$$E_b = E_1 + E_2 = \frac{kq_1}{(r-x)^2} - \frac{kq_2}{(r+x)^2}$$

$$E_b = \frac{k\rho\theta(r-x)^2}{(r-x)^2} - \frac{k\rho\theta(r+x)^2}{(r+x)^2}$$

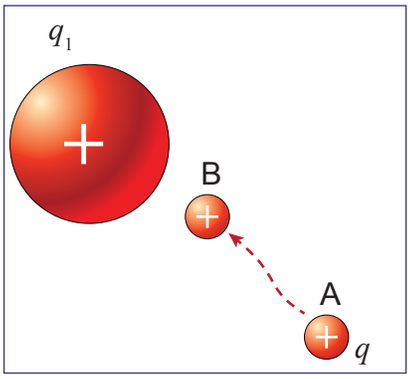
$$\boxed{E_b = k\rho\theta - k\rho\theta = 0}$$

توضح الحسابات أعلاه أن شدة المجال الكهربائي عند أي نقطة b داخل الكرة يجب أن تكون صفرًا.

c. تكون شدة المجال الكهربائي غير متصلة عند سطح الكرة الموصلة المشحونة، فهي تتغير فجأة من صفر داخل الكرة إلى شدة ناتجة على سطحها نتيجة لشحنة منفردة 2C عند مركزها. في الموصل الحقيقي تنتقل شدة المجال من الصفر إلى قيمته عند السطح الخارجي خلال عمق صغير جدًا يسمى « عمق الجلد»

طاقة الوضع الكهربائية

لنفرض أن شحنة q تتحرك من النقطة A إلى B بالقرب من شحنة أخرى q_1 (**الشكل 3-23**). ستتعرض الشحنة q لقوة تنافر من الشحنة q_1 بافتراض أنهما موجبتان. لنقل الشحنة q من الموقع A إلى الموقع B نحتاج إلى **طاقة وضع كهربائية Electric potential energy** لبذل شغل ضد قوة التنافر حيث يُخَزّن هذا الشغل كطاقة وضع كهربائية داخل الشحنة q بسبب وجودها بالقرب من شحنة أخرى.



الشكل 3-23 تحريك شحنة من النقطة A إلى النقطة B.

الجهد الكهربائي

الجهد الكهربائي هو طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنات. يوصف الجهد الكهربائي **بالمعادلة 3-5**. وحدة قياس الجهد الكهربائي هي جول لكل كولوم (J/C) ، وهي الفولت لأن كل 1 فولت يساوي 1 جول لكل كولوم (1 V = 1 J/C).

5-3	الجهد الكهربائي	V	الجهد الكهربائي (V أو J/C)
	$V = \frac{E_P}{q}$	E_p	طاقة الوضع الكهربائية (J)
		q	الشحنة الكهربائية (C)

فرق الجهد الكهربائي

تحتوي المسائل الحقيقية في الغالب على تغيرات في الطاقة وفرق الجهد الكهربائي. عندما تتحرك شحنة من النقطة A إلى B (كما هو موضح في **الشكل 3-23**) ، يتغير الجهد الكهربائي للشحنة لأن طاقة الوضع الكهربائية للشحنة تتغير. يُسمّى الاختلاف في الجهد الكهربائي من النقطة A إلى B «فرق الجهد الكهربائي»، ويمكن كتابته ΔV

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta E_P}{q}$$

الإلكترون فولت هي وحدة لقياس الطاقة

عند مناقشة طاقة الوضع الكهربائية للجسيمات الذرية، فإن الجول هي وحدة كبيرة جدًا. والوحدة الأكثر ملاءمة لتمثيل طاقة الجسيمات الصغيرة هي الإلكترون فولت (eV). الإكترون فولت الواحد هو الطاقة المكتسبة أو المفقودة بفعل إلكترون واحد يتحرك عند فرق جهد قدره 1 V، فيكون

$1\ eV = 1.6\times10^{-19}\ J$

$E_p = qV$

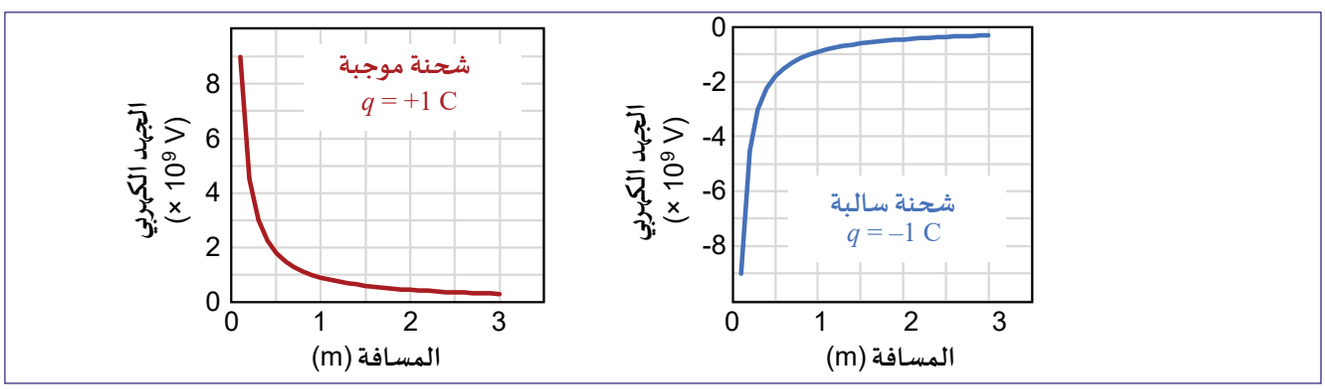
$1\ eV = (1.6 \times 10^{-19}\ C) \times (1\ V) = 1.6 \times 10^{-19}\ J$

الجهد الكهربائي لشحنة نقطية

الجهد الكهربائي لشحنة نقطية موجبة يتناقص مع ازدياد المسافة عن الشحنة وفقًا **للمعادلة 6-3**

6-3	الجهد الكهربائي لمصدر كهربائي نقطي		
	$V = \frac{kq}{r}$	V	جهد كهربائي (V)
		k	ثابت كولوم 9×10^9 (Nm^2/C^2)
		q	الشحنة الكهربائية (C)
		r	المسافة بين الشحنة والنقطة (m)

يكون الجهد الكهربائي موجبًا بالقرب من شحنة موجبة وسالبًا بالقرب من شحنة سالبة، لأن القوة الكهربائية تكون موجبة أو سالبة بناءً على كون الشحنات متشابهة أو متعاكسة. يوضّح **الشكل 24-3** جهد نقطتين كهربائيتين 1C+ و 1C- بدلالة المسافة. نلاحظ أنَّ الجهد ينخفض بشكل سريع مع ازدياد المسافة.



الشكل 24-3 الجهد الكهربائي لشحنتين 1 C+ و 1 C-.

مثال 9

احسب الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد 1m عن شحنة 1 C. قارن إجابتك مع جهد بطارية 9 V.

المطلوب: الجهد الكهربائي ;V

المُعطى: المسافة r = 1 m الشحنة q = 1 C

العلاقات: $V = \frac{kq}{r}$

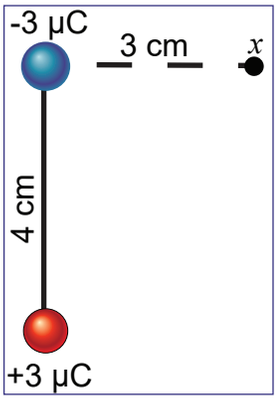
الحل:

$$V = \frac{kq}{r} = \frac{(9 \times 10^9)(1\ m)}{1\ m} = \boxed{9 \times 10^9\ V}$$

نلاحظ أن 9 مليار فولت أكثر بكثير من 9 V، لأن الشحنة 1 C كبيرة جدًّا.

مثال 10

احسب الجهد الكهربائي عند النقطة x الناتج عن الشحنتين الموضحتين في الشكل 3-25.



الشكل 3-25

المطلوب: الجهد الكهربائي V

المُعطى: $q_1 = -3\mu C$ ، $q_2 = +3\mu C$

العلاقات: $V = \frac{kq}{r}$

الحل:

تذكّر، عند حساب الجهد الكهربائي، بأنه كمية قياسية، وبالتالي لا نعتني بالاتجاهات. الجهد الكهربائي لمجموعة من الشحنات هو جمع الجهود المنفردة لكل منها على حدة. فالجهد عند النقطة x، والناتج عن q_1 هو:

$$V_1 = \frac{kq_1}{r} = \frac{(9\times10^9)(-3\times10^{-6})}{0.03} = -9\times10^5 \text{ V}$$

ولحساب الجهد الكهربائي عند النقطة x والناتج عن الشحنة q_2، علينا حساب المسافة بين x و q_2. باستخدام نظرية بيثاغورس نحصل على:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(0.03)^2 + (0.04)^2} = 0.05 \text{ m}$$

الجهد الكهربائي عند x ، والناتج عن q_2 هو:

$$V_2 = \frac{kq_2}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(3\times10^{-6})}{0.05} = 5.4\times10^5 \text{ V}$$

فيكون الجهد الكهربائي الكلي حاصل جمع الجهدين الكهربائيين:

$$V_T = V_1 + V_2 = -9\times10^5 + 5.4\times10^5 = \boxed{-3.6\times10^5 \text{ V}}$$

التغير في طاقة الوضع الكهربائية

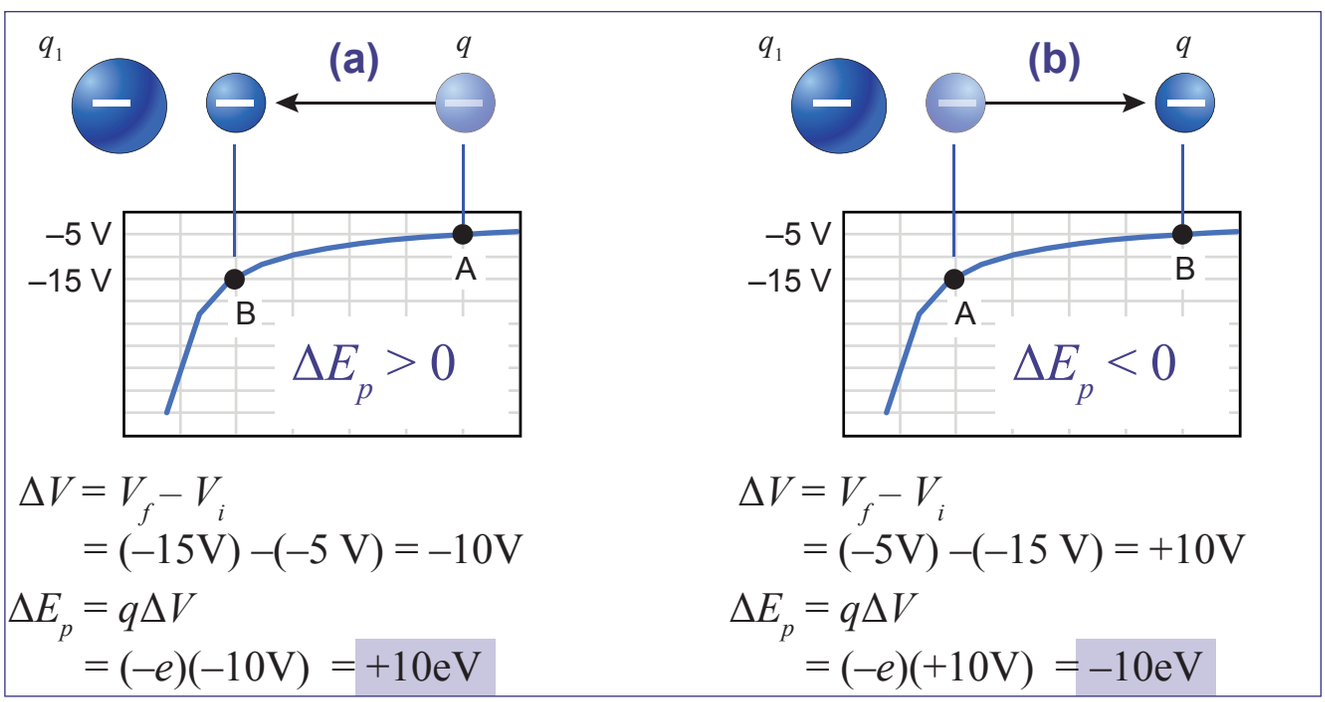
يمكننا استخدام **المعادلة 5-3** لحساب التغير في طاقة الوضع الكهربائية (ΔE_p) لشحنة تتحرك في مجال كهربائي حيث يكون التغير في الجهد الكهربائي (ΔV) **المعادلة 7-3**.

7-3	تغير طاقة الوضع الكهربائية		
	$\Delta E_P = q\Delta V$	ΔE_P	التغير في طاقة الوضع الكهربائية (J)
		ΔV	التغير في الجهد الكهربائي (V)
		q	الشحنة الكهربائية (C)

يتناول عدد من مسائل الفيزياء التغيرات في الجهد الكهربائي بوحدة (V) والتغييرات الناتجة في طاقة الوضع الكهربائية بوحدة (J).

a. تكون ΔE_p موجبة عندما تكتسب الشحنة المتحركة طاقة وضع كهربائية. على سبيل المثال، عندما يتحرك إلكترون باتجاه شحنة سالبة، فإنه يكتسب طاقة وضع كهربائية لأنه يفقد الطاقة الحركية بالتباطؤ (**الشكل 3-26 a**).

b. تكون ΔE_p سالبة عندما يتم تحويل طاقة الوضع الكهربائية إلى أشكال أخرى من الطاقة عندما تتحرك الشحنة. على سبيل المثال ، يفقد الإلكترون ذو الشحنة السالبة من طاقة وضعه الكهربائية ويكتسب طاقة حركية عندما يبتعد عن شحنة أخرى سالبة (**الشكل 3-26 b**).



الشكل 3-26 التغير الموجب والتغيّر السالب لطاقة الوضع الكهربائية.

على مثال طاقة الوضع التجاذبية، يكون الجهد الكهربائي صفرًا عند اللانهاية. ولأننا نهتم فعليًا بفرق الجهد الكهربائي، فإنَّ بإمكاننا اختيار الجهد الصفري في أي موقع مناسب آخر، مثل الطرف السالب للبطارية، أو "الأرض" وهو الجهد الكهربائي المرجعي لسطح الأرض.

مثال 11

تحتاج المصابيح الأمامية ذات القدرة 30 W إلى بطارية سيارة 12 V. احسب عدد الإلكترونات التي تمر عبر المصابيح الأمامية في كل ثانية.

المطلوب: عدد الإلكترونات n

المُعطى: القدرة P = 30 W الجهد الكهربائي V =12 V

العلاقات:

$$V = \frac{E_P}{q}$$

الحل: إنَّ 30 W من القدرة تعني أن المصباح يستهلك 30 J من الطاقة كل ثانية. ولأن البطارية تفقد الطاقة، فإن طاقة الوضع الكهربائية هي 30 J–. لحساب عدد من الإلكترونات، فإنَّ علينا أولًا حساب الشحنة. باستخدام العلاقة الآتية:

$$V = \frac{E_P}{q} \Rightarrow q = \frac{E_P}{V}$$

$$q = \frac{-30}{12} = -2.5\ C$$

ولحساب عدد الإلكترونات نقسم الشحنة q على شحنة الإلكترون الواحد

$$n = \frac{-2.5}{-1.6\times10^{-19}} = \boxed{1.56\times10^{19}\ \text{electrons}}$$

مثال 12

احسب الجهد الكهربائي على بعد 0.5×10^{-10} m من بروتون. شحنة البروتون هي 1.6×10^{-19} C

المطلوب: الجهد الكهربائي ;V

المُعطى: المسافة $r = 0.5 \times 10^{-10}$ m

الشحنة $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C

العلاقات:

$$V = \frac{kq}{r}$$

الحل: لحساب الجهد الكهربائي نستخدم المعادلة الأتية.

$$V = \frac{kq}{r} = \frac{\left(9\times10^{9}\right)\left(1.6\times10^{-19}\right)}{0.5\times10^{-10}} = \boxed{28.8\ \text{V}}$$

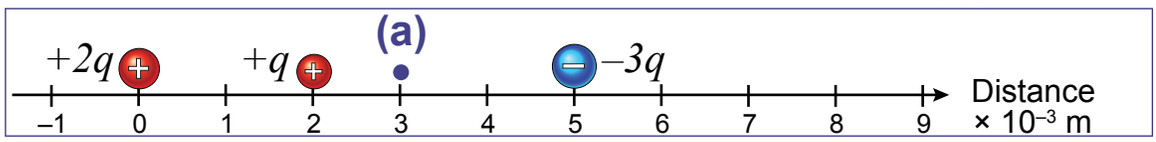
خصائص الجهد الكهربائي

الجهد الكهربائي كمية قياسية لها الخاصيتين التاليتين:

1. الجهد الكهربائي الناتج عن مجموعة من الشحنات هو الجمع الجبري لجهود الشحنات، كل على حدة.
2. فرق الجهد الكهربائي بين نقطة وأخرى لا يعتمد على المسار المتّبع بين هاتين النقطتين.

مثال 13

احسب الجهد الكهربائي عند النقطة (a) إذا كانت $q = 5 \times 10^{-10}$ C.



المطلوب: الجهد الكهربائي V

المُعطى: المواقع 0, 2, 5 mm والشحنات (×10^{-10} C) 2, 1, -3.

العلاقات:

$$V = \frac{kq}{r}$$

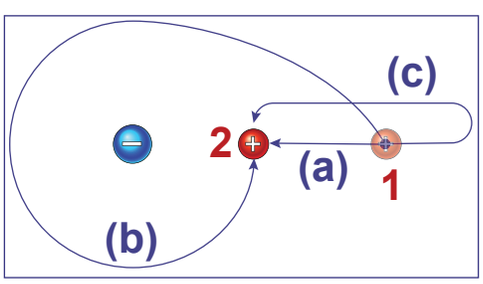
الحل:

$$V = k\left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3}\right)$$

$$= 9 \times 10^9\left(\frac{1 \times 10^{-9}}{0.003} + \frac{5 \times 10^{-10}}{0.001} + \frac{-1.5 \times 10^{-9}}{.002}\right) = 750 \text{ V}$$

مثال 14

يمكن لشحنة موجبة أن تسلك ثلاثة مسارات مختلفة بين الموقعين 1 و 2. أي المسارات يحقق أكبر فرق في طاقة الجهد بين الموقعين؟ وأيها يحقق أقل فرق؟



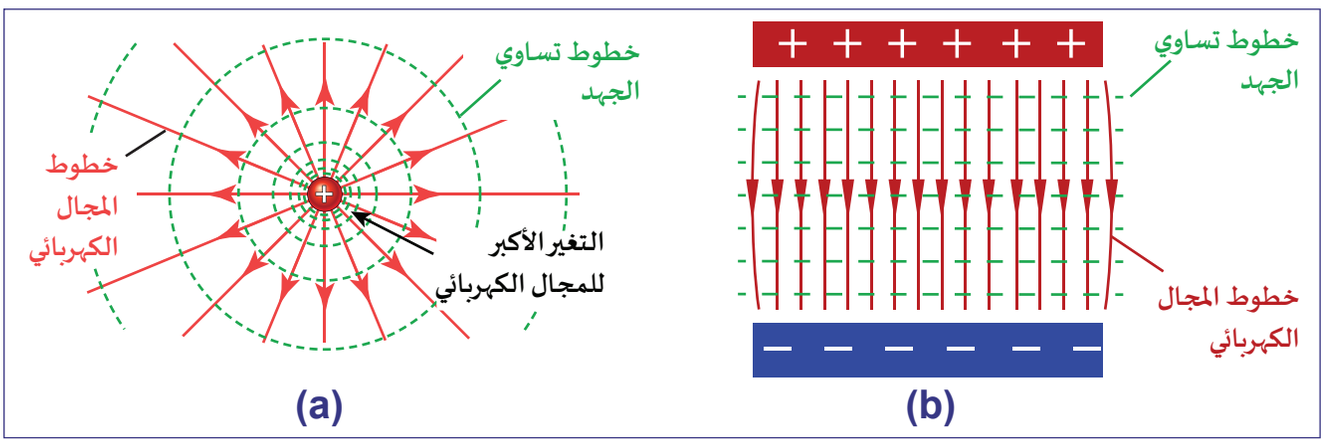
الحل:

الفرق في طاقة الوضع الكهربائية على المسارات الثلاثة هو ذاته، فهو لا يعتمد على المسار المُتّبَع بين أي نقطتين.

خطوط تساوي الجهد

افضل تعبير مرئي للجهد الكهربائي يكون برسم خطوط يكون لنقاطها الجهد نفسه، وتُسمّى خطوط تساوي الجهد. أمّا الشحنة النقطية فتنخفض قيمة جهدها مع ازدياد المسافة عنها، أي إنّه يتناسب طرديًا مع $\frac{1}{r}$. ولذلك تكون الخطوط ذات الجهد المتساوي عبارة عن دوائر متحدة المركز كما هو موضَّح في **الشكل 3-27a**.

لاحظ، أنه بالرغم من اختلاف اتجاه المجال الكهربائي حول الشحنة النقطية فإنَّ اتجاهه عند أية نقطة يكون دائمًا متعامدًا مع دوائر خطوط تساوي الجهد.



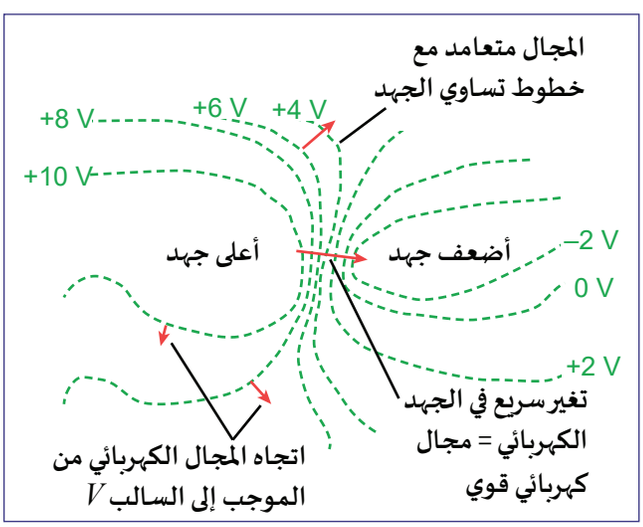
الشكل 3-27 خطوط تساوي الجهد لشحنة نقطية (a) ، وخطوط تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم (b).

الشكل 3-27 (b) يوضح أن خطوط تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم تكون متوازية ولها التباعد ذاته فيما بينها.

قراءة خطوط تساوي الجهد

إذا أُعطيت رسمًا تخطيطيًّا لخطوط تساوي الجهد (**الشكل 3-28**)، يمكنك استنتاج خصائص الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي باستخدام بعض القواعد البسيطة:

- اتجاه المجال الكهربائي يكون دائمًا عموديًا على خطوط تساوي الجهد.
- يكون اتجاه خطوط المجال الكهربائي من الجهد الكهربائي الموجب ونحو الجهد الكهربائي السالب.



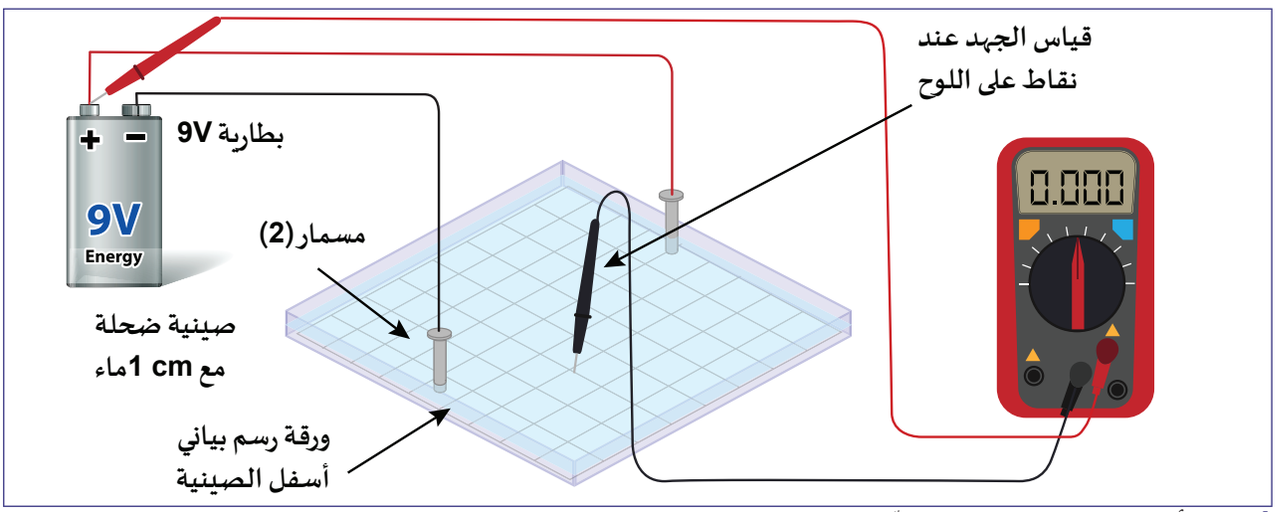
الشكل 3-28 خطوط تساوي الجهد.

- المواقع التي تكون فيها خطوط تساوي الجهد "كثيفة" تمثل منطقة مجال كهربائي قوي.

نشاط 2-3 رسم خريطة لمجال كهربائي

سؤال الاستقصاء	كيف يبدو المجال الكهربائي حول مسمار مشحون؟
الموادّ المطلوبة	مسماران، ملقط تمساح عدد 2، بطارية 9 V، ورقتان للرسم البياني، صحن زجاجي أو بلاستيكي شفّاف، فولتميتر

خطوات التجربة

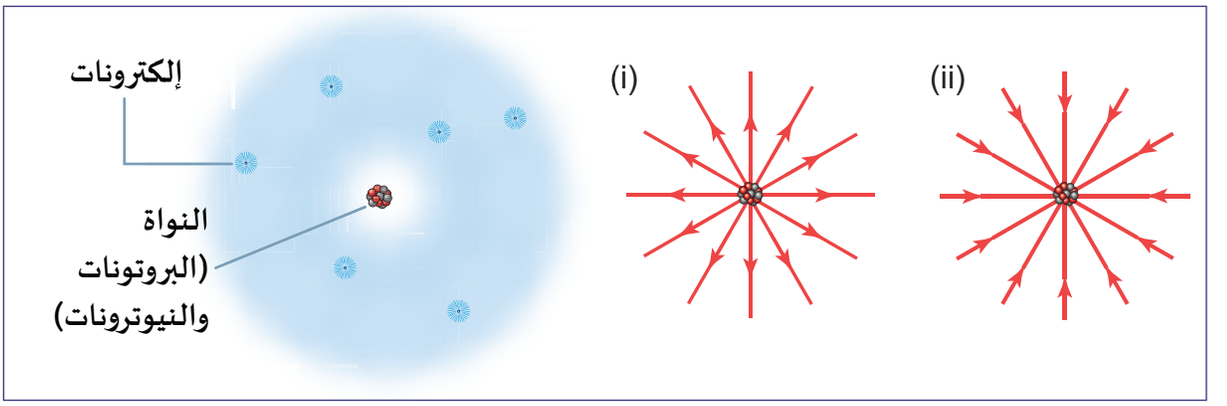


1. املأ صينية بلاستيكية شفّافة بالماء بعمق 1 cm.
2. ضع ورقة رسم بياني أسفل الصينية وورقة ثانية بجانبها.
3. ثبّت مسمارين عند طرفي الصينية وثبّتها بشريط لاصق.
4. قم بتوصيل بطارية 9 V بالمسمارين باستخدام أسلاك توصيل فم التمساح.
5. قم بتوصيل الطرف الموجب للفولتميتر بالطرف الموجب للبطارية.
6. دع الطرف السالب للفولتميتر يلمس نقاط الماء في الصينية. ستجد أن أربع قطرات من الماء أو أكثر لها الجهد نفسه، 1 V مثلًا.
7. ضع علامة عند موقع جميع القطرات التي لها الجهد نفسه على ورقة الرسم البياني الثانية الموجودة إلى جانب الصينية.
8. كرر الخطوة 6 لـ 2 V، 3 V، ... 8 V.

الأسئلة

a. قم بتوصيل القطرات المرسومة للحصول على الخطوط ذات الجهد المتساوي.
b. خطوط المجال الكهربائي متعامدة مع الخطوط ذات الجهد المتساوي. ارسم خطوط المجال الكهربائي.
c. أين تكون خطوط المجال الكهربائي أكثر كثافة؟ ما هي الأهمية التي تكتسبها كثافة خطوط المجال الكهربائي ؟

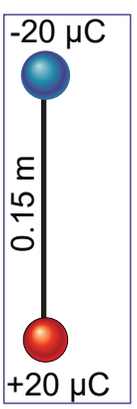
تقويم الدرس 3-2



1. تتألف الذرة من نواة تحتوي على شحنات موجبة (البروتونات) محاطة بسحابة من الإلكترونات ذات الشحنة السالبة.
   a. أيٌّ من الرسمين (i) أم (ii) هو المجال الكهربائي للنواة؟
   b. أي من الرسمين يمثل اتجاه القوة المؤثرة في الإلكترونات؟
   c. هل اخترت الرسم ذاته في السؤالين الماضيين؟ لماذا؟

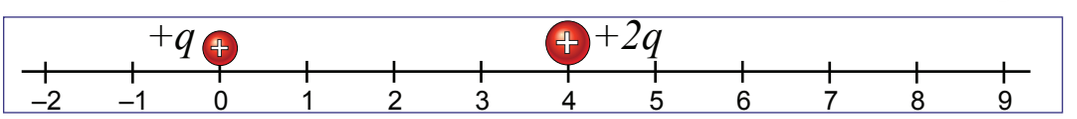
2. نفخ طالب بالونًا مطّاطيًّا وربطه بخيط وعلّقه بسقف الغرفة، ثم دلكه بصوف سترة. لنفرض أن تريليون إلكترون (10^{12} e^-) انتقل من السترة إلى البالون؛ ولنفرض أيضًا أن هذه الإلكترونات تمركزت في مركز البالون. احسب المجال الكهربائي للبالون على بعد متر واحد من مركزه.

3. المسافة بين الشحنتين في الشكل المجاور هي 0.15 m.



   a. احسب شدة واتجاه المجال الكهربائي عند نقطة الوسط بين الشحنتين، (أي عند، مسافة 0.075 m من كل شحنة)
   b. احسب مقدار واتجاه القوة الكهربائية التي تؤثر على إلكترون وُضِع عند نقطة الوسط بين الشحنتين.

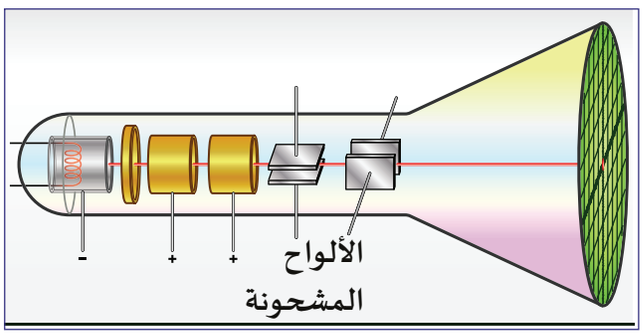
4. وُضِعت شحنتان كهربائيتان على مسافة 0.4 m من بعضهما البعض كما في الشكل أدناه.



   a. عند أي نقطة تكون محصلة المجال الكهربائي للشحنتين صفرًا؟
   b. إذا استعضنا عن الشحنة +2q بشحنة أخرى –2q ، فعند أي نقطة يصبح المجال الكهربائي صفرًا؟
   c. احسب الجهد الكهربائي في الحالتين a و b.

الدرس 3-3
المجال الكهربائي المنتظم
Uniform Electric Field

أنبوبة أشعة المهبط (الكاثود) (CRT) هي أنبوبة مفرّغة من الهواء تحتوي على قاذف إلكترونات. تُسرَّع الإلكترونات في الأنبوبة وتُوجَّه باستخدام ألواح مشحونة (**الشكل 3-29**). تُوجَّه هذه الإلكترونات نحو الفوسفور الفلورسنتي على الشاشة حيث تنشأ الصُّوَر نتيجة ذلك، ويحدِّد لونُ الفوسفور اللونَ الساقط على الشاشة.



الشكل 3-29 أنبوبة أشعة المهبط (الكاثود) (CRT).

أستُخدمت أنبوبة أشعة المهبط على نطاق واسع في أجهزة التلفاز والشاشات وأجهزة راسم الاهتزازات. وبالرغم من عدم استخدام أيٍّ من التطبيقات المذكورة سابقًا لأنابيب أشعة المهبط الآن، إلا أنها لا تزال تُستخدم في الإضاءة وأنابيب الأشعة السينية والتسخين التجاري والصناعي.

مخرجات التّعلُّم

P1205.1 يتذكر ويطبق العلاقة ($E = \frac{V}{d}$) لحساب شدة المجال الكهربائي المنتظم بين لوحين متوازيين ومشحونين، ويحسب القوى المؤثرة في شحنات موضوعة في مجال كهربائي منتظم، ويصف تأثير المجال الكهربائي المنتظم في حركة جسيمات مشحونة.

P1206.4 يذكر أوجه التشابه والاختلاف بين المجال الكهربائي ومجال الجاذبية.

المفردات

المجال الكهربائي المنتظم	Uniform electric field

الجسيمات في مجال كهربائي منتظم

تخيّل جُسَيْمًا سالب الشحنة كالإلكترون يتحرك في مجال كهربائي منتظم. الإلكترون ينحرف نحو اللوح ذي الشحنة الموجبة.

يسبب المجال الكهربائي الأقوى زيادة في الانحراف، لأن القوة الكهروستاتيكية تتناسب طرديًّا مع المجال الكهربائي.

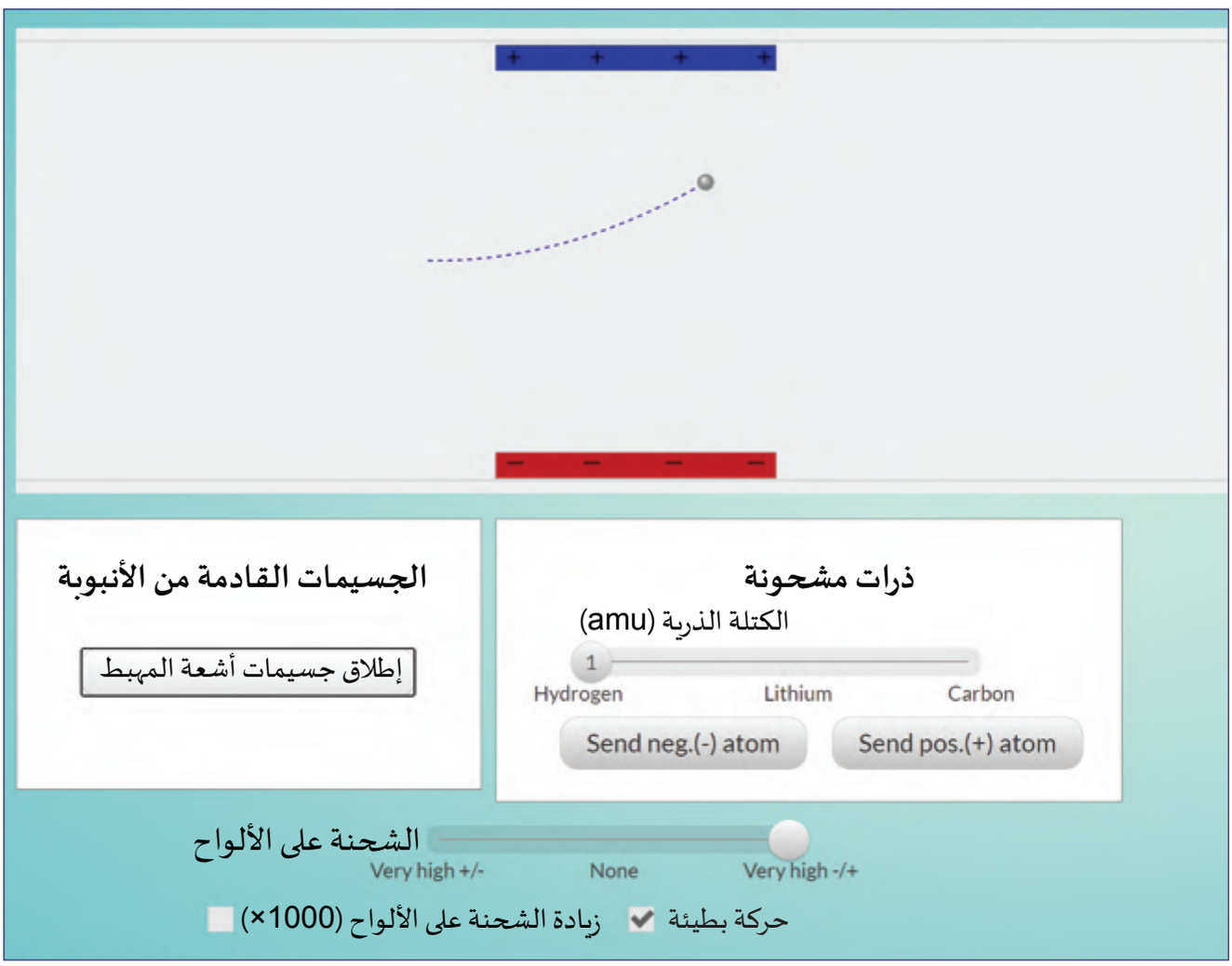
$$F_e = Eq$$

تتناسب القوة الكهروستاتيكية طرديًّا مع شحنة الجسيمات أيضًا. استخدم المحاكاة وأجب عن الأسئلة المعطاة.

لماذا لا تنحرف الذرات المشحونة عند عدم وجود شحنات على اللوحين؟

لماذا تسبب زيادة الشحنة على اللوحين المزيد من انحراف الذرات المشحونة؟

أية ذرة تنحرف أكثر؟ ولماذا؟

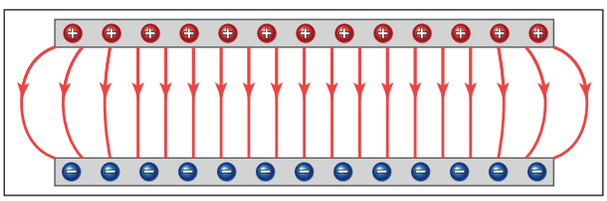


الشكل 3-30 محاكاة لاستكشاف الجسيمات المشحونة في مجال كهربائي منتظم.

المجال الكهربائي المنتظم

تكون خطوط المجال الكهربائي لشحنة نقطية في الاتجاه الشعاعي (نصف قطري)، وتتناقص شدّته بزيادة نصف القطر. ولأن شدة المجال تتغير، فإنَّ المجال الكهربائي لشحنة نقطية يكون غير منتظم.

يتشكّل **المجال الكهربائي المنتظم Uniform electric field** ذو الشدة والإتجاه الثابتين في الفراغ الناشىء بين لوحين متوازيين وكبيرين ومشحونين بشحنتين مختلفتين (**الشكل 3-31**). لا تختلف شدة المجال الكهربائي في الوسط بين اللوحين، وتكون خطوط المجال:



الشكل 3-31 المجال الكهربائي بين لوحين فلزّيين مشحونين.

- متوازية.
- على مسافات متساوية من بعضها البعض.

وإذا كانت المسافة بين اللوحين صغيرة مقارنة بأبعادها، فإن المجال الكهربائي يكون منتظمًا تقريبًا في منطقة الوسط بينهما. يُستخدم اللوحان المتوازيان المشحونان لإنشاء مجالات كهربائية منتظمة كما هو الحال عند تركيز حزمة الإلكترونات في أنبوبة أشعة المهبط.

إذا كانت المسافة الفاصلة بين اللوحين d ، وفرق الجهد الكهربائي بينهما V ، فإن شدة المجال الكهربائي يمكن حسابها باستخدام **المعادلة 3-8**.

8-3	المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين		
	$E = \frac{V}{d}$	E	شدّة المجال الكهربائي (N/C) أو (V/m)
		V	الجهد كهربائي (V أو J/C)
		d	المسافة بين اللوحين (m)

مثال 15

احسب شدة المجال الكهربائي الناتج بين لوحين مشحونين تفصل بينهما مسافة 6 mm، وفرق الجهد بينهما يساوي 300 V.

المطلوب: شدة المجال الكهربائي E،

المُعطى: الفرق في الجهد V = 300 V؛ المسافة الفاصلة بين اللوحين d = 6 mm؛

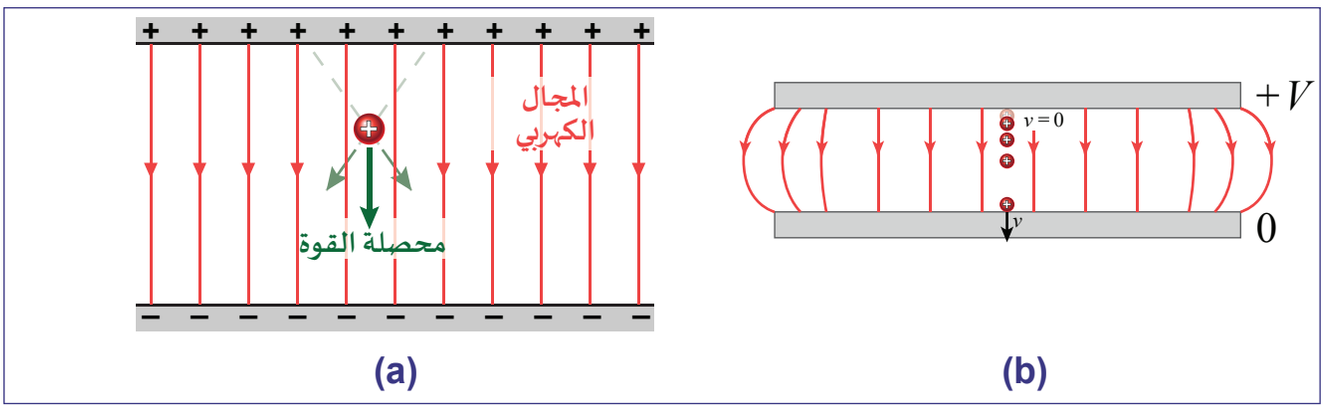
العلاقات: $E = \frac{V}{d}$

الحل: لحساب شدة المجال الكهربائي، سنستخدم المعادلة المعطاة:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{300}{6 \times 10^{-3}} = \boxed{50{,}000 \text{ V/m}}$$

القوة المؤثرة في جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم

تتعرض الجسيمات المشحونة لقوة عندما تكون في مجال كهربائي. ولا توجد أيَّة مركبات أفقية لهذه القوة في الفراغ بين اللوحين المتوازيين اللانهائيين كما في (**الشكل 3-32a**)، فتكون محصلة القوة رأسية فقط، لأن المجال الكهربائي بين اللوحين المتوازيين رأسيّ أيضًا ويتجه من اللوح الموجب إلى اللوح السالب، ويكون المجال الكهربائي ثابت الشدة في الفراغ بين اللوحين.



الشكل 3-32 (a) المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين مشحونين. (b) سرعة الجسيم المشحون بين لوحين متوازيين.

القوة الكهروستاتيكية التي تتعرض لها الشحنة تساوي Fe = Eq. ولأن المجال الكهربائي ثابت، فإنَّ القوة تكون ثابتة أيضًا.

نعلم من القانون الثاني لنيوتن للحركة أن القوة الثابتة تسبب تسارعًا ثابتًا، فإذا أُطلق جسيم موجب الشحنة بالقرب من اللوح الموجب الشحنة، فكم تبلغ سرعة حركته عندما يصل إلى اللوح ذي الشحنة السالبة (**الشكل 3-32 (b)**)؟

يمكن استخدام مبدأ حفظ الطاقة لإيجاد السرعة النهائية للجسيم المشحون: في البداية يكون للجسيم المشحون طاقة وضع كهربائية موجبة $E_p = qV$، ولكنه لا يملك طاقة حركية (لأنه بدأ الحركة من السكون). في نهاية حركته، سيكون له طاقة حركية $E_k = \frac{1}{2}mv^2$، ولا يمتلك طاقة وضع كهربائية (لأنَّنا اخترنا أن يكون الجهد المرجعي عند اللوح السالب صفرًا). وبمساواة معادلة الطاقتين الابتدائية والنهائية نحصل على السرعة النهائية للجسيم المشحون.

لماذا اخترنا أن يكون الجهد المرجعيّ صفرًا؟

ما هي أهمية الجهد المرجعيّ؟

الطاقة الابتدائية: $E_k = 0 \quad E_p = qV$

الطاقة النهائية: $E_p = 0 \quad E_k = \frac{1}{2}mv^2$

من مبدأ حفظ الطاقة: $E_{tot} = qV = \frac{1}{2}mv^2$

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

مثال 16

وُضع لوحان متوازيان مشحونان بشحنتين مختلفتين تفصل بينهما مسافة 5 cm. أُنشئ مجال كهربائي منتظم بين اللوحين المتوازيين، شدته 4.5×10^5 N/C.

a. احسب محصلة القوة التي يتعرض لها إلكترون موضوع داخل المجال الكهربائي المنتظم.

b. ما هي السرعة النهائية والطاقة الحركية للإلكترون؟

المطلوب:

a. محصلة القوة، F؛

b. السرعة النهائية بين اللوحين v؛ الطاقة الحركية الكلية، E_k = ؟؛

المُعطى:

المجال الكهربائي $E = 4.5 \times 10^5$ N/C؛

المسافة بين اللوحين $d = 5$ cm؛

العلاقات:

$F_e = Eq$،

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \; ; \; E_k = \frac{1}{2}mv^2 \; ; \; E = \frac{V}{d} \; ;$$

الحل:

a. لحساب محصلة القوة، سنستخدم المعادلة الأولى السابقة. فالإلكترون موجود داخل المجال الكهربائي، وشحنة الإلكترون هي -1.6×10^{-19} C.

$$F_e = Eq = (4.5 \times 10^5) \times (-1.6 \times 10^{-19}) = -7.2 \times 10^{-14} \text{ N}$$

الإشارة السالبة تعني أن اتجاه القوة بعكس اتجاه المجال الكهربائي، فالإلكترون يتنافر مع اللوح السالب بدلًا من أن ينجذب إليه.

b. لحساب السرعة النهائية، نحتاج إلى حساب فرق الجهد بين اللوحين أولًا، ويمكن أن يتم ذلك بوساطة:

$$V = Ed = (4.5 \times 10^5) \times (5 \times 10^{-2}) = 22{,}500 \text{ V}.$$

ولأنّ الإلكترون ينتقل من اللوح السالب إلى اللوح الموجب، فإننا نرى أن فرق الجهد سالب أيضًا. ويمكن أن يُستخدم فرق الجهد هذا لحساب السرعة النهائية والطاقة الحركية.

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(-1.6\times10^{-19}\right)\left(-22{,}500\right)}{9.1\times10^{-31}}} = \boxed{8.9\times10^{7} \text{ m/s}}$$

وحساب الطاقة الحركية يعطينا:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\left(9.1\times10^{-31}\right)\left(8.9\times10^{7} \text{ m/s}\right)^2 = \boxed{3.6\times10^{-15} \text{ J}}$$

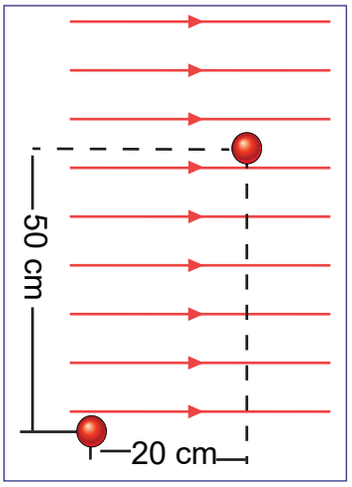
مثال 17

شدة المجال الكهربائي المنتظم في **الشكل 3-33** تبلغ 250 V/m.

تتحرك شحنة كهربائية مقدارها 12 µC مسافة 20 cm في اتجاه المجال ومسافة 50 cm إلى أعلى.

a. احسب التغير الناتج في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة.

b. احسب التغير في الجهد الكهربائي بين النقطتين.



الشكل 3-33

المطلوب:

a. التغير في طاقة الوضع الكهربائية.

b. التغير في الجهد الكهربائي.

المُعطى:

شدة المجال الكهربائي: 250 V/m

الشحنة الكهربائية $q = 12\ \mu C$

المسافة الأفقية: $d_1 = 20\ cm$

المسافة الرأسية إلى أعلى: $d_2 = 50\ cm$

العلاقات:

$$\Delta E_P = -Eq\Delta d$$

$$\Delta V = \Delta E_p/q$$

الحل:

a. التغير في الجهد الكهربائي يعتمد فقط على المسافة المقطوعة بشكل موازٍ لاتجاه المجال الكهربائي. فالمسافة المقطوعة بشكل عمودي للمجال ليس لها أي تأثير في هذه الحالة. تَذَكّر أن التغير في طاقة الوضع الكهربائية يساوي سالب الشغل المبذول بواسطة القوة.

$W = Fd$ و $F = Eq$

لذلك:

$$\Delta E_p = -Eq\Delta d = -(250)(12\times10^{-6})(0.2) = \boxed{-6 \times 10^{-4}\ J.}$$

b. حساب فرق الجهد:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q} = \frac{-6\times10^{-4}}{12\times10^{-6}} = \boxed{-50\ V}$$

مقارنة المجال الكهربائي بمجال الجاذبية

درس العلماء أوجه التشابه بين الجاذبية والكهرباء لما يقرب من 300 سنة. وعند المقارنة بين قانون نيوتن للجاذبية وقانون كولوم، أمكن ملاحظة كثير من أوجه التشابه بين القانونين.

ومع ذلك، فإنَّنا نلاحظ بعض الاختلافات بينهما أيضًا. تلخص القائمة أدناه أوجه التشابه والاختلاف بين المجال الكهربائي ومجال الجاذبية.

- يُنتج مجال الجاذبية قوة بين الأجسام نتيجة لكتلها، أما المجال الكهربائي فينتج قوة بين الأجسام نتيجة لشحنتها.
- أثناء حساب قوة الجاذبية يكون ثابت التناسب المستخدم $G = 6.673 \times 10^{-11}\ N\ m^2/kg^2$، و G هو ثابت الجذب العام وينطبق على جميع الأوساط والمواد. أما عند حساب القوة الكهربائية، فيكون ثابت التناسب المستخدم هو k_e، ويكون وفقًا للوسط الذي يوجد فيه هذا المجال.
- كل من قوة الجاذبية والقوة الكهربائية تتبع قانون التربيع العكسي.
- نظرًا لوجود نوعين من الشحنات الكهربائية، فقد يكون هناك قوة كهربائية تجاذبية أو تنافرية. أما قوة التجاذب الكتلي فتكون قوة تجاذبية دائمًا.
- كل من مجال الجاذبية والمجال الكهربائي هو كمية متجهة.
- تتناسب الطاقة المخزّنة في المجال عكسياً مع البعد (عن الكتلة أو عن الشحنة) لكل من نوعَي المجالات.
- يكون الجهد الكهربائي نتيجة للمجال الكهربائي ويكون جهد الجاذبية نتيجة لمجال الجاذبية، وكل منهما هو كمية عددية.
- يكون جهد الجاذبية دائمًا أقل من صفر. أما إشارة الجهد الكهربائي فتكون وفقًا للشحنات الموجودة.

طابعة الليزر

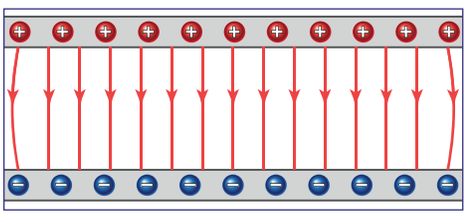
تَستخدِم طابعات الليزر مبدأ الكهروستاتيكية في عملها (**الشكل 3-34**). تُزَوّدُ الأسطوانه داخل الطابعة بشحنة موجبة. تبدا الأسطوانة بالدوران وتقوم حزمة من أشعة الليزر بتفريغ الأجزاء المطلوب طباعتها. يتم رش الحبر المشحون بشحنة موجبة على الأسطوانة حيث يلتصق بالأجزاء ذات الشحنة السالبة فقط، فينشأ مجال كهربائي عمودي على الورقة. تدور الورقة المشحونة سلبيّا تحت الأسطوانة وتجذب مسحوق الحبر المشحون بالشحنة الموجبة.

الشكل 3-34 طابعة الليزر.

تقويم الدرس 3-3

1. كيف يمكن تعريف شدة المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين ومشحونين بشحنتين مختلفتين؟
   - **a.** له القيمة نفسها في أيّ مكان بين اللوحين.
   - **b.** يتناقص من اللوح الموجب إلى اللوح السالب.
   - **c.** يكون عند الأطراف أكبر من الوسط.
   - **d.** يكون عند الأطراف أصغر من الوسط.

2. يبين الشكل المجاور مكثفًا كهربائيًا ذا لوحين مشحونين ومتوازيين، ويكون اللوح الموجب (الأعلى) والسالب (الأسفل). ارسم عدة خطوط تساوي الجهد في المنطقة بين اللوحين على طول المجال الكهربائي بينهما. أشر إلى الخط الذي له أعلى جهد كهربائي.



3. لإنشاء مجال كهربائي منتظم بين لوحين متوازيين يحملان شحنتين متساويتي المقدار ومتعاكستين، افترض أن فرق الجهد بين اللوحين 6 V. فكم يجب أن تكون المسافة الفاصلة بينهما للحصول على مجال كهربائي شدته 50 N/C؟ (علمًا بأن الوسط بين اللوحين هو الفراغ).

4. احسب شدة المجال الكهربائي بين لوحين موصلين ومتوازيين تفصل بينهما مسافة 1.5 cm، وفرق الجهد بينهما يساوي 1.5×10^4 V.

5. تفصل بين لوحين موصلين ومتوازيين مسافة 4 cm، وشدة المجال الكهربائي بين اللوحين 7.5×10^4 V/m.
   - **a.** احسب فرق الجهد بين اللوحين.
   - **b.** إذا افترضنا أن جهد اللوح ذي الجهد المنخفض هو 0 V، فما هو جهد نقطة تبعد 1 cm عن هذا اللوح و 3 cm عن اللوح الآخر؟

6. جد سرعة إلكترون، طاقته الحركية 100 eV.

ضوء على العلماء

شارل أوجستين دي كولوم: 1736-1806

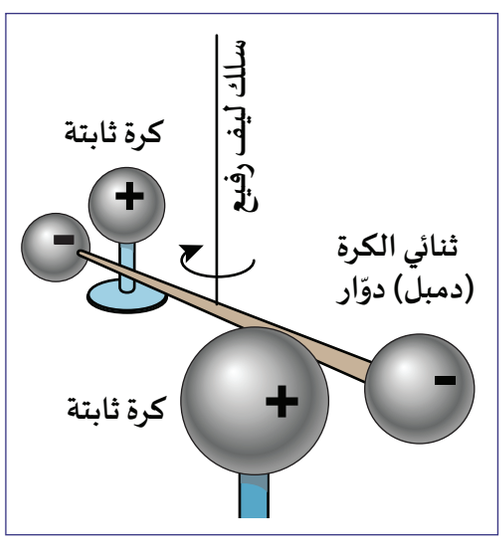
الشكل 3-35 تشارلز أوغستين دي كولوم.

صيغ قانون كولوم بقلم عالم الفيزياء الفرنسي تشارلز أوغستين دي كولوم. وُلد كولوم في أنجوليم بفرنسا في العام 1736، وانتقلت عائلته إلى باريس عندما كان صغيرًا جدًا. هناك دخل Collège des Quatre-Nations (كلية الأمم الأربعة) ودرس فيها الرياضيات.

التحق شارل دي كولوم بالمدرسة العسكرية، وهي مدرسة الهندسة الملكية بميزير وتخرّج فيها في العام 1761. وبصفة مهندس عسكري، خدم كولوم في جزر الهند الغربية لمدة 9 سنوات، عاد بعدها إلى فرنسا في العام 1773، لكنه استمر في خدمة الحكومة حتى بداية الثورة الفرنسية.

بعد عودته إلى فرنسا، بدأ كولوم في البحث، وقدّم أول ورقة بحثية له بعنوان «المشكلات الإحصائية المطبقة على الهندسة المعمارية» إلى أكاديمية العلوم. واستخدم في الورقة حساب التفاضل والتكامل لحل المشكلات الهندسية. ومن الإسهامات الرئيسة الأخرى التي قدمها كولوم «نظرية الآلات البسيطة» في العام 1781.

في الفترة الزمنية التي امتدت بين العامين 1785 و1791، كتب كولوم سبع نشرات علمية عن الكهرباء والمغناطيسية، واستخدم ميزان الّلي لقياس القوة الكهربائية بين الشحنات (**الشكل 3-36**) وصاغ النظرية المعروفة باسم «قانون كولوم». وتكريمًا لإسهاماته في مجال القوى الكهربائية بين الشحنات، فقد سُمّيت وحدة الشحنة الكهربائية كولوم (C) على اسم شارل دي كولوم. توفي كولوم في العام 1806 في باريس.



الشكل 3-36 تجربة كولوم لقياس القوة الكهربائية.

الوحدة 3

مراجعة الوحدة

الدرس 3-1: قانون كولوم

- يكتسب الجسم **شحنة كهربائية** بسبب عدم تساوي الإلكترونات مع البروتونات.
- معظم الأجسام **متعادلة كهربائيًا** لأنها تحتوي على عدد متساوٍ من الإلكترونات والبروتونات.
- توجد **قوة كهربائية** بين الجسيمات المشحونة، فالشحنات المتشابهة تتنافر، والشحنات المختلفة تتجاذب.
- يُمكّننا **قانون كولوم** من حساب القوة الكهروستاتيكية بين جسيمين مشحونين.
- تتغير السماحية الكهربائية بين مادة وأخرى، وهي تصف كيفية تأثير نوع المادة بشدة المجال الكهربائي.

الدرس 3-2: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

- عندما يُوضع جسيم مشحون داخل **مجال كهربائي**، فإنه يتعرض لقوة كهروستاتيكية. ويمكن تمثيل المجال الكهربائي **بخطوط المجال الكهربائي** التي تتجه بعيدًا عن الشحنات الموجبة وباتجاه الشحنات السالبة.
- تُحدِّد **طاقة الوضع الكهربائية** مقدار الشغل اللازم لتحريك شحنة من نقطة إلى أخرى في مجال كهربائي.
- يعتمد **الجهد الكهربائي** على موقع النقطة داخل المجال الكهربائي فقط وليس على مقدار الشحنة عند تلك النقطة.
- عندما تنتقل شحنة من النقطة A إلى النقطة B ، تتغير طاقة وضعها الكهربائية. ويمكن حساب هذا التغير في الطاقة بمعرفة **فرق الجهد الكهربائي** بين النقطتين.
- يمكن أن يكون الجول كمية كبيرة إلى حد ما عند حساب طاقة الوضع الكهربائية. ويستخدم **الإلكترون فولت** في مثل هذه الحالات.
- تُستخدم **خطوط تساوي الجهد** لربط النقاط التي لها الجهد نفسه.

الدرس 3-3: المجال الكهربائي المنتظم

- ينتج **مجال كهربائي** منتظم بين لوحين مشحونين، وتتعرض الجسيمات المشحونة الموضوعة داخل المجال للتسارع.

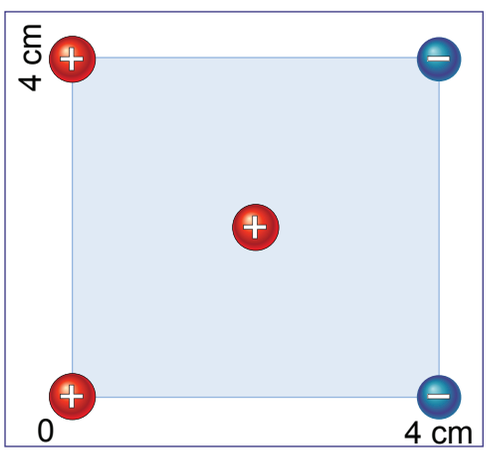
اختيار من مُتعدِّد

1. شحنتان كهربائيتان وضعتا في الفراغ على مسافة معينة من بعضهما البعض. كيف تتغير القوة بين الشحنتين إذا مُلئ الفراغ بينهما بمادة ذات سماحية كهربائية أعلى؟
   a. القوة تزداد.
   b. القوة تنخفض.
   c. تبقى القوة كما كانت.
   d. ينعكس اتجاه القوة.

2. يدلك طالب ساقين من اللافلزات، كل منهما من مادة مختلفة، بقطعتين مختلفتين من القماش. وجد الطالب أن كلاً من الساقين تجذب الأخرى، فما هو التفسير الأكثر احتمالًا؟
   a. يؤدي دلك الساقين بالقطعتين إلى وجود شحنات موجبة على ساق وشحنات سالبة على الساق الأخرى.
   b. يؤدي دلك الساقين بالقطعتين إلى وجود شحنات موجبة على كل من الساقين.
   c. يؤدي دلك الساقين بالقطعتين إلى وجود شحنات سالبة على كل من الساقين.
   d. كل من الساقين متعادلة كهربائيًا.

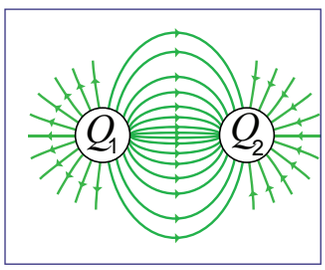
3. ما مقدار القوة الكهربائية بين شحنتين، مقدار شحنة كل منهما شحنتها $+1\ \mu C$، وتفصل بينهما مسافة $1\ cm$؟
   a. $0.009\ N$
   b. $90\ N$
   c. $9 \times 10^{9}\ N$
   d. $9 \times 10^{25}\ N$

4. وُضعت أربع شحنات متساوية على زوايا مربع كما هو مبيّن في الشكل المجاور، فماذا سيحدث لشحنة موجبة إذا وُضعت في مركز المربّع بالضبط؟



   a. ستتحرك نحو الأعلى.
   b. لن تتحرك.
   c. ستتحرك قطريًا نحو الركن السفلي.
   d. ستتحرك نحو اليمين

5. ما نوع الشحنة Q_1 و Q_2 على التوالي في الشكل المجاور؟



   a. موجبة، موجبة
   b. موجبة، سالبة
   c. سالبة، موجبة
   d. سالبة، سالبة

6. إذا تضاعفت المسافة بين شحنتين موجبتين، فماذا سيحدث للقوة الكهربائية بينهما؟
   a. لا تتغير.
   b. تنخفض إلى نصف قيمتها.
   c. تزداد إلى أربعة أمثالها.
   d. تنخفض إلى ربع قيمتها.

7. حُرّكت شحنة نقطية مقدارها 2.0 μC بين نقطتين X و Y. النقطة X جهدها + 6.0 V والنقطة Y جهدها +9.0 V.
   ما طاقة الوضع التي تكتسبها الشحنة النقطية؟
   a. 0.02 μJ
   b. 1.5 μJ
   c. 6.0 μJ
   d. 30 μJ

8. حُرّكت شحنة نقطية موجبة مقدارها 3.0 nC بسرعة ثابتة من نقطة إلى أخرى. كان الشغل المبذول على الشحنة النقطية 12 nJ ما فرق الجهد بين النقطتين؟
   a. 0 V
   b. 0.25 V
   c. 4 V
   d. 36 V

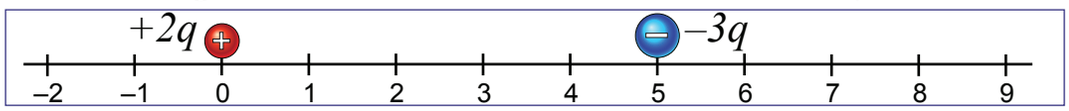
9. تم تعجيل إلكترون من السكون عبر فرق جهد 2×10^3 V. أيٍّ مما يأتي هو الطاقة الحركية للإلكترون بعد التسريع؟
   a. 8×10^{-23} J
   b. 3.2×10^{-16} eV
   c. 2×10^3 eV
   d. 2×10^3 J

الدرس 3-1: قانون كولوم

10. أذكر ثلاثة أمثلة على القوة الكهربائية في الحياة اليومية.

11.* تزداد السماحية النسبية في مادة تحتوي على شحنتين كهربائيتين من 1 إلى 2. كيف تتغير القوة الكهربائية بينهما نتيجة لذلك؟

12.** شحنتان كهربائيتان $+2q$ و $-3q$ وضعتا على خط كما هو موضح.



أثبت أنه لا يوجد نقطة على الخط بين الشحنتين تكون عندها القوة على شحنة اختبار تساوي صفر.

13. ما القوة الكهربائية التي تؤثر في جسيم مشحون بشحنة سالبة مقدارها $Q_1 = -10\ \mu C$ بوساطة جسيم آخر يحمل شحنة موجبة مقدارها $Q_2 = 20\ \mu C$، ويبعد عنه مسافة $r = 10\ cm$؟

14.* يفصل بين شحنتين q_1 مقدارها $2.0\ \mu C$ و q_2 مقدارها $4.0\ \mu C$ مسافة $r = 4.0\ cm$.

a. احسب القوة بين الشحنتين.

b. اذا كانت القوة المحسوبة في (a) هي F، كم تصبح القوة في الحالات التالية بدلالة F، ومن دون حساب:

- إذا تضاعفت r؟
- إذا تضاعفت كل من q_1 و r؟
- إذا تضاعفت كل من q_1 و q_2 و r؟

15.* يفصل بين جسمين، كتلة كل منهما $10\ g$ وشحنتاهما $+5\ \mu C$ و $-10\ \mu C$ مسافة $1\ cm$.

a. ما اتجاه القوة الكهربائية بينهما؟

b. ما مقدار القوة بينهما؟

c. ما تسارع الشحنة الموجبة؟

d. ما تسارع الشحنة السالبة؟

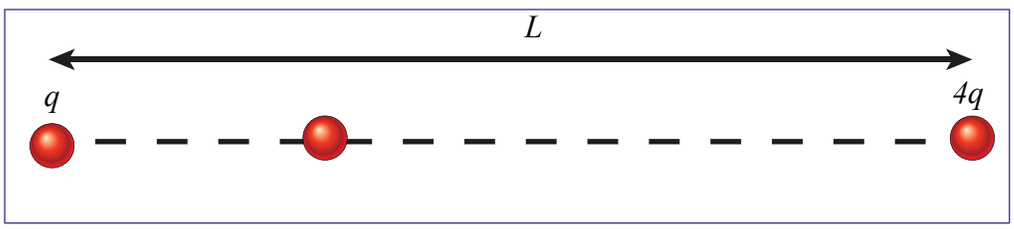
16.** جسمان مشحونان بشحنتين $+20\ \mu C$ و $-20\ \mu C$، ويفصل بينهما مسافة $5\ cm$.

a. ما مقدار القوة الكهربائية بينهما؟

b. ما مقدار الكتلة التي تتعرّض لقوّة مكافئة للقوة الكهربائية، ولكن بسبب الجاذبية بالقرب من سطح الأرض؟

17. وُضع جسيم شحنته $-100\ \mu C$ في منتصف المسافة بين جسيمين آخرين. يقع أحد الجسيمين عند النقطة $x = -5\ cm$ وشحنته $-50\ \mu C$ ؛ ويقع الآخر عند النقطة $x = +5\ cm$ وشحنته $+50\ \mu C$. ما اتجاه القوة المؤثرة في الجسيم الأوسط؟ وما هو مقدارها؟

18. وُضِعت شحنتان كهربائيتان q و 4q كما هو موضح أدناه. إذا وضعت شحنة ثالثة بينهما بحيث تكون محصلة القوة على أي من الشحنات الثلاث صفرًا، فكم يكون مقدار هذه الشحنة الثالثة؟



الدرس 3-2: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

19. تُنشىء كرة موجبة الشحنة ومعزولة، مجالًا كهربائيًا في الفضاء المحيط بها، ويكون مقداره E_1 على بعد $1\ m$ من الشحنة.

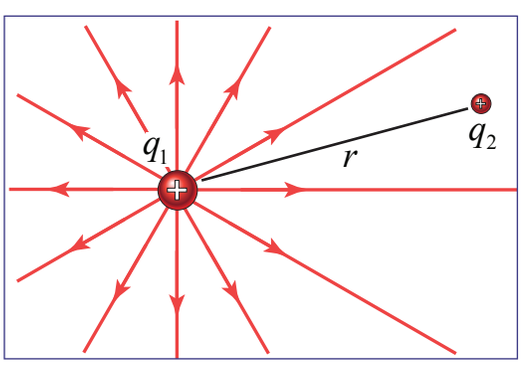
a. إذا تضاعفت المسافة إلى $2\ m$، فما معامل تغيّر E؟

b. إذا تضاعفت المسافة ثلاث مرات إلى $3\ m$، فما معامل تغيّر E؟

c. ما البعد عن الشحنة الذي يكون المجال عنده صفرًا؟

20. ارسم مخططًا للمجال الكهربائي حول جسيمين مشحونين بشحنتين موجبين متماثلتين وتفصل بينهما مسافة قصيرة.

21. ارسم مخططًا للمجال الكهربائي حول جسيمين مشحونين بشحنتين سالبتين متماثلتين وتفصل بينهما مسافة قصيرة.



22. ينتج عن شحنة q_1 المجال الكهربائي الموضح. وضعت شحنة أخرى q_2 على مسافة r من q_1 كيف سيتأثّر الجهد الكهربائي إذا:

a. تضاعفت q_1؟

b. تضاعفت q_2؟

c. تضاعفت الشحنتان؟

d. تضاعفت المسافة بين الشحنتين؟

23. بيّن أن وحدتَيْ شدة المجال الكهربائي V/m و N/C متكافئتان.

24. تتعرض شحنة مقدارها $+5\ \mu C$ موضوعة في نقطة في الفراغ لقوة كهربائية مقدارها $3 \times 10^{-5}\ N$. احسب شدة المجال الكهربائي عند تلك النقطة.

25. كرة موصلة، نصف قطرها 15 cm، مشحونة بشحنة موجبة مقدارها $4\ \mu C$، موزعة على سطحها. ما شدة المجال الكهربائي الناتج عن تلك الشحنة عند الأبعاد الآتية من مركز الكرة:

a. 0 cm

b. 5 cm

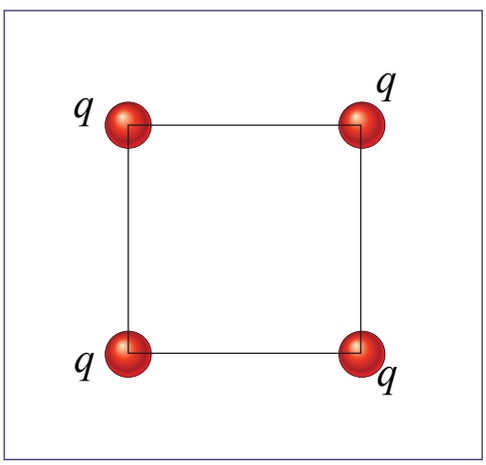
c. 15 cm

d. 20 cm

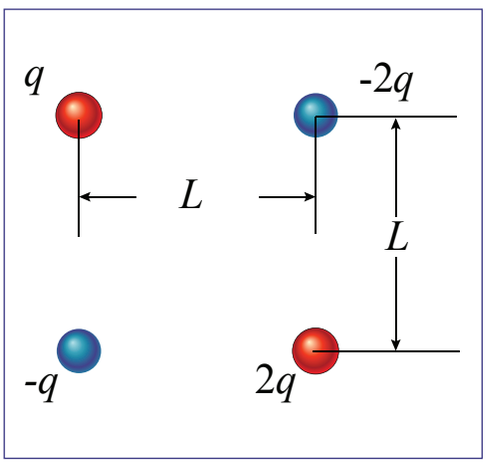
26. كتلة الإلكترون $9.1 \times 10^{-31}\ kg$ وشحنته $-1.6 \times 10^{-19}\ C$. افترض أنك تستطيع عزل إلكترون واحد في فراغ تام، ثم أنشأت مجالًا كهربائيًا لشدّ الإلكترون نحو الأعلى. ما شدة المجال الكهربائي اللازم لمعادلة وزن الإلكترون؟ (بمعنى آخر، وضع الإلكترون في حالة اتزان قوى)

27. ثلاثة جسيمات مشحونة، شحناتها موجبة ومتساوية، وضعت عند رؤوس مثلث متساوي الأضلاع. ارسم مخططًا للمجال الكهربائي الناتج عنها.

28. وضعت أربع شحنات كهربائية متماثلة كل منها q عند زوايا مربع كما هو موضح. ما شدة المجال الكهربائي عند مركز المربع؟



29. وضعت أربع شحنات كهربائية عند زوايا مربع طول ضلعه L كما هو موضح. احسب شدة المجال الكهربائي عند مركز المربع.



الدرس 3-3: المجال الكهربائي المنتظم

30. ما الفرق بين المجال الكهربائي المنتظم والمجال الكهربائي غير المنتظم؟

31. لماذا ينحني المجال الكهربائي بين اللوحين المتوازيين المشحونين بالقرب من أطرافه؟

32. صف الفرق بين القوة الكهربائية وقوة الجاذبية.

* **33.** قارن بين القوة الكهربائية التي تؤثر في إلكترون في ذرة هيدروجين وقوة الجاذبية التي تؤثر فيه.

* **34.** لوحان متوازيان وأفقيّان تفصل بينهما مسافة 15 cm. وُضع اللوح السفلي عند جهد 250 V- ووُضع اللوح العلوي عند جهد 250 V+. ووُضعت شحنة مقدارها 2- µC عند نقطة خارج اللوح السفلي وتبعد عنه 3 cm.

a. ما طاقة الوضع الكهربائية للشحنة؟

b. ما طاقة الوضع الكهربائية للشحنة إذا تحركت الشحنة رأسيًا إلى أعلى إلى أن وصلت إلى نقطة تبعد 3 cm من اللوح العلوي؟

c. ما مقدار الشغل المبذول على الشحنة؟

* **35.** ما البعد بين لوحين موصلين، شدة المجال الكهربائي بينهما 4.5×10^3 N/C، وفرق الجهد بينهما 15 kV؟

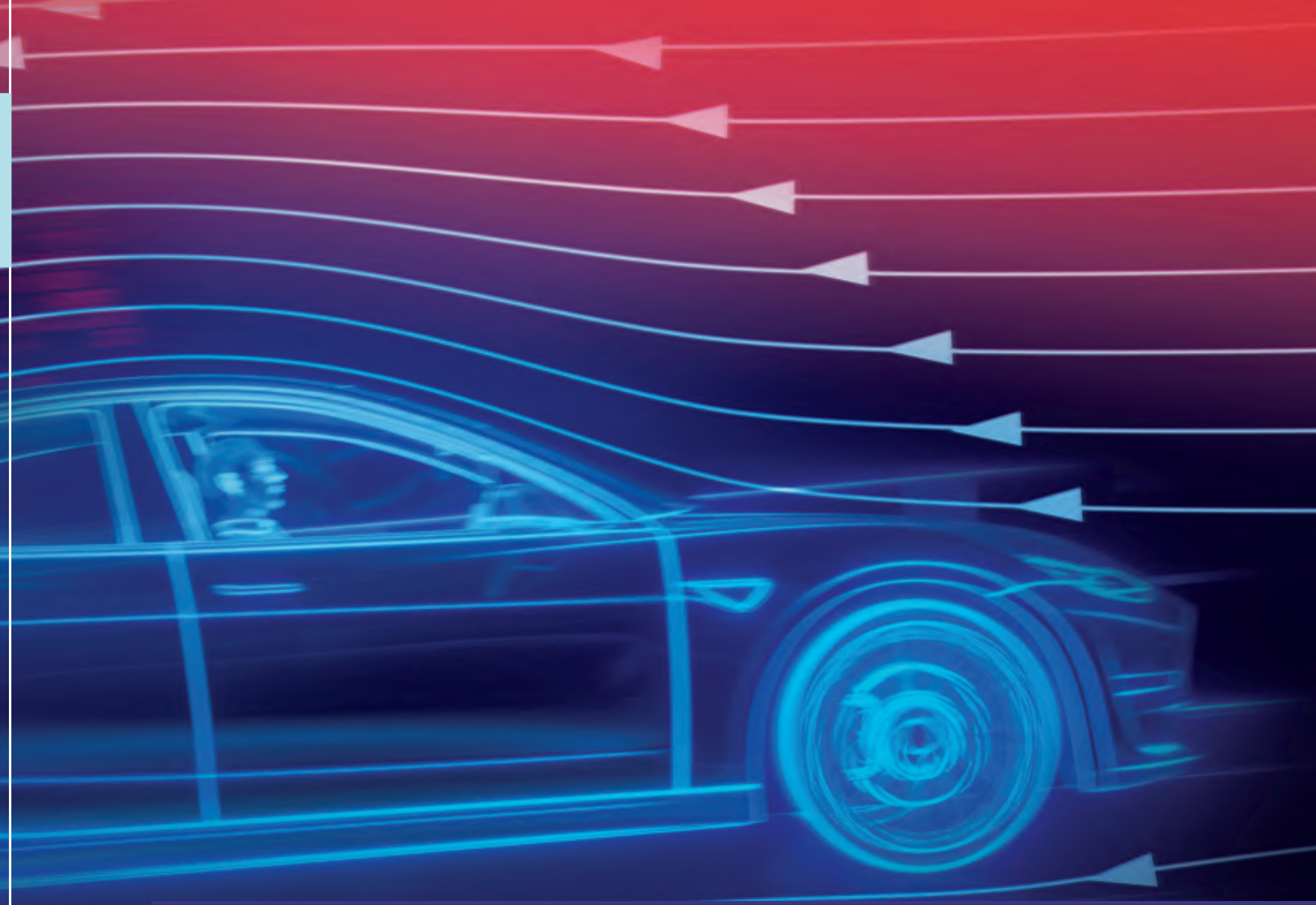
** **36.** يتعرّض إلكترون لتسارعٍ في مجال كهربائي منتظم، شدته 2×10^6 V/m.

a. ما الطاقة بوحدة keV التي تُعطى للإلكترون إذا تسارع خلال مسافة 4 cm؟

b. ما البعد الذي يجب أن يُسَرَّع إليه الإلكترون لزيادة طاقته بمقدار 50 GeV؟

مسألة للبحث

يحمل البرق طاقة كهربائية هائلة. ما الخصائص الكهربائية لصواعق البرق؟ وكيف تتشكّل؟ استخدم عمليات البحث المتقدمة لجمع المعلومات من مصادر متعددة موثوقة. ادمج هذه المعلومات في سرد علمي مترابط. وضمِّنها تقييمًا لنقاط القوة والضعف الخاصة بكل مصدر..



الوحدة 4

سلوك الموائع

Fluid Behavior

في هذه الوحدة

الدرس 4-1: ديناميكا الموائع

الدرس 4-2: الغاز المثالي

P1207
P1208

4 الوحدة

مقدّمة الوحدة

عندما تُغلق جزءًا من فوهة خرطوم ماء بالإبهام، فإن الماء يخرج من الجزء المفتوح بشكل أسرع. يؤدي إغلاق فوهة الخرطوم جزئيًا إلى زيادة الضغط في الخرطوم، ويمثّل الضغط المتزايد مزيدًا من الطاقة. التأثير المماثل لهذا يحدث أثناء تدفّق الدم في جسمك، حيث تقل المساحة مع تدفّق الدم من الشرايين (الأكبر) إلى الشعيرات الدموية (الأصغر). نحتاج إلى المزيد من الضغط لدفع الدم من خلال الشعيرات الدموية. وينشأ هذا الضغط نتيجة لضخ الدم من القلب.

تعمل القوى في الموائع من خلال الضغط. وحدة الضغط هي باسكال (N/m^2). يمكن أن تؤثر تغيّرات الضغط في كثير من خصائص المائع، مثل معدّل التدفّق والكثافة. يُنشىء الوزن ضغطًا هيدروستاتيكيًا داخل الغلاف الجوي وتحت سطح الماء.

سنرى في هذه الوحدة أن قوانين حفظ الطاقة وقوانين نيوتن لها أشكال جديدة في الموائع. تربط معادلة برنولي بين الضغط والكثافة والسرعة، ويربط قانون الغاز المثالي بين ضغط الغاز وحجمه ودرجة حرارته.

الأنشطة والتجارب

4-1 أمثلة على تأثير برنولي

4-2 الغاز المثالي

الدرس 1-4

ديناميكا الموائع
Fluid Dynamics

لن يؤدي توصيل خرطوم مياه بصنبور إطفاء إلى رشّ الماء لإطفاء حريق في أعلى مبنى يتألف من عدة طوابق. يكمن السبب في معادلة برنولي التي تنص على أنه، كلما ازداد الارتفاع الذي يجب أن يصل إليه المائع، فإن ضغطه ينخفض. لذا، فإن رشّ الماء بسرعة كبيرة على مستوى سطح الأرض، يتطلّب ضغط ماء 1034 kPa. أمّا سرعة ضخ الماء نفسها في الطابق 30 من مبنى، فتتطلّب ضغطًا يصل إلى 2068 kPa. يتراوح الضغط العادي للماء في الأنابيب التي تصل إلى منزلك وإلى صنبور الإطفاء أيضًا، بين 345 kPa و517 kPa. وللحصول على مزيد من الضغط، تستخدم شاحنات الإطفاء مضخات، مع الإشارة إلى أن المباني العالية تحتوي على أنابيب إطفاء رأسيّة ثابتة.

الشكل 4-1 نظام أنابيب الإطفاء الرأسية.

نظام أنابيب الإطفاء الرأسية هو امتداد لنظام صنبور الإطفاء الذي يتكون من سلسلة من الأنابيب تصل إلى أجزاء المبنى المختلفة. ويتصل هذا النظام بمضخة تزيد ضغط الماء وفقًا لارتفاع المبنى. وهناك تقنية أخرى تُستخدم في مكافحة الحرائق في المباني الشاهقة، وهي استخدام فوهات أصغر تُثبّت على الخراطيم، حيث تنتج الفوهات الأصغر سرعة تدفّق أكبر للماء.

مخرجات التّعلُّم

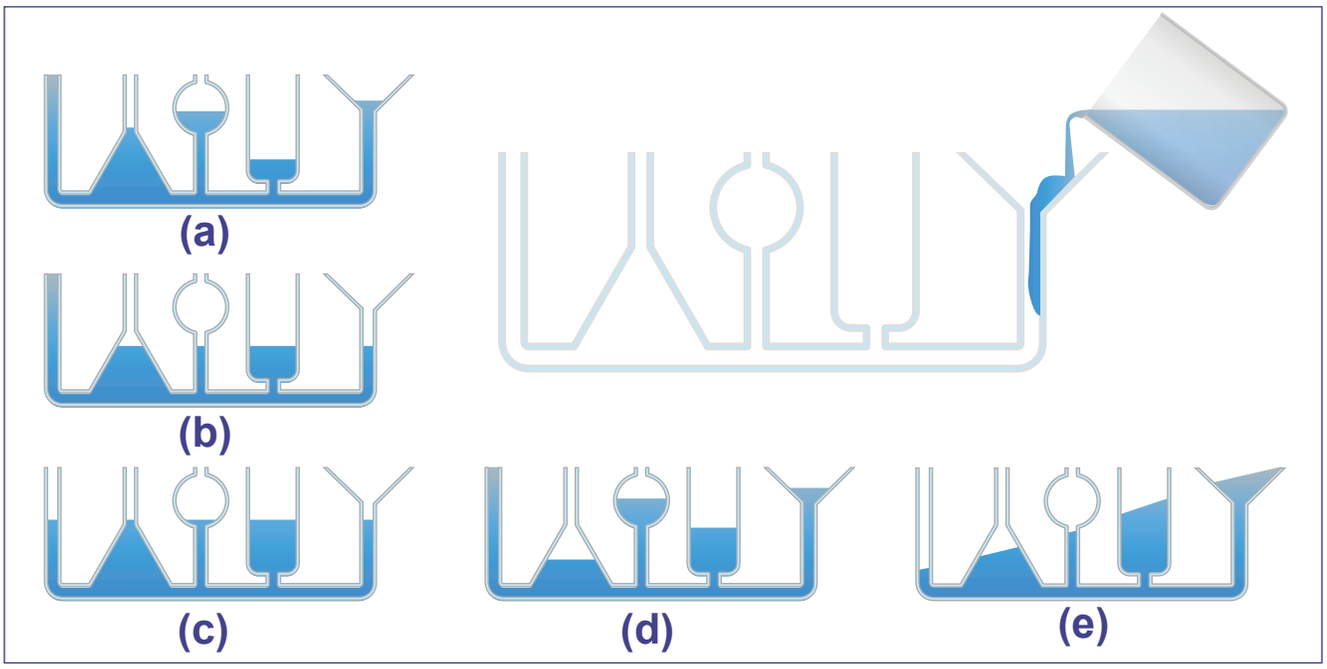
P1207.1 يناقش كيف تنطبق معادلة الاستمرارية ومبدأ برنولي على تدفق الموائع ويذكر أمثلة عملية.

المفردات

Fluid	مائع
Compressible fluid	مائع قابل للانضغاط
Incompressible fluid	مائع غير قابل للانضغاط
Flow rate	معدّل التدفّق
Equation of continuity	معادلة الاستمرارية
Bernoulli's equation	معادلة برنولي
Streamline	خط الانسياب

تدفّق المائع

تخيّل أنك تملأ الأوعية المبيّنة في **الشكل 4-2**. أيٌّ من الرسوم التخطيطية الخمسة يبيّن بالضبط المستويات الموجودة في الوعاء بعد الاستقرار التام للمائع؟ ولماذا؟

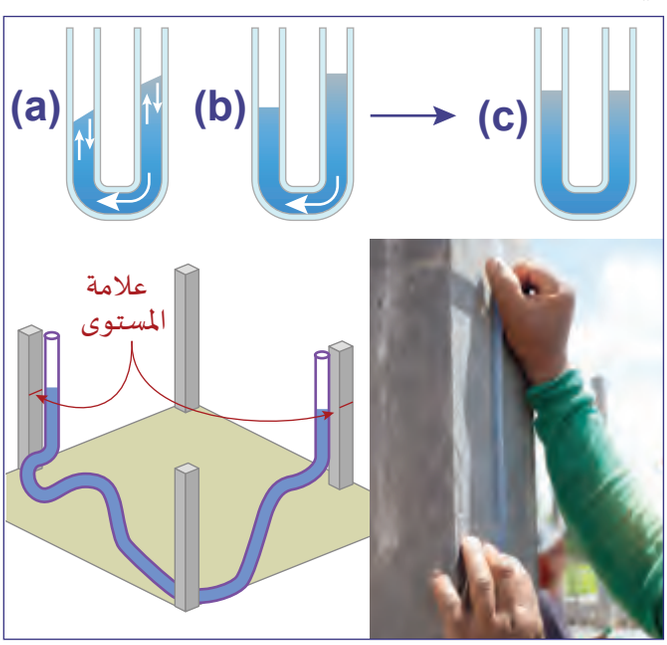


الشكل 4-2 عرض لاتِّزان المائع.

من أهم خصائص المائع قدرته على تغيير شكله تحت تأثير أية قوة، وإن كانت صغيرة جدًا. **الشكل 4-2** (c) فقط يشير إلى المائع وهو في حالة اتزان. ستستمر مستويات الموائع في الرسوم التخطيطية الأخرى في التغيّر مع تدفّق المائع إلى أن تتساوى جميع مستوياته.

يبيّن (**الشكل 4-3**) كيف يتدفّق المائع إلى أن تتساوى جميع مستوياته. يستخدم البناؤون هذا التأثير لجعل بناء الجدار مستويًا تمامًا على امتداد مسافة طويلة. وُصف الميزان المائي لأول مرة من قبل الرياضي والفيزيائي هيرون الإسكندري في القرن الأول قبل الميلاد.

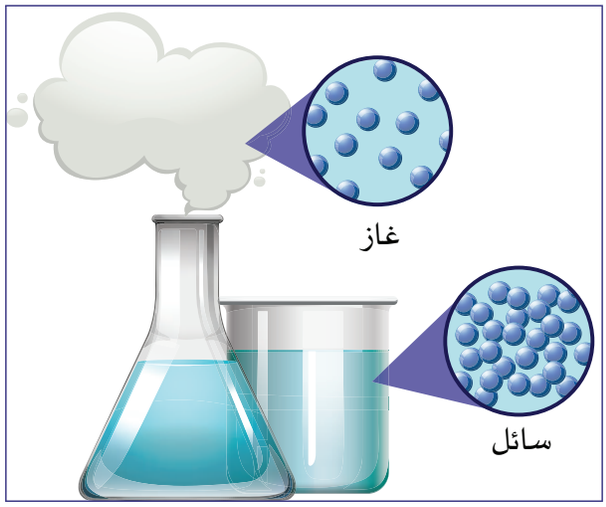
الميزان المائي هو أنبوبة طويلة مملوءة بالماء جزئيًا، ويكون طرفاها مغلقين مبدئيًا. يوضع أحد طرفي الأنبوبة عند نقطة مرجعية والطرف الآخر في المكان الذي يجب أن يكون في مستوى النقطة المرجعية. يفتح البنَّاء غطائَي الأنبوب ويضبط طرفيه بطريقة تجعل مستوى الماء في كلتا النقطتين متساويًا.



الشكل 4-3 تسبّب الاختلافات في مستوى المائع تدفّقه إلى أن تتساوى جميع مستوياته. وهذا هو مبدأ الميزان المائي الذي لايزال البناؤون يستخدمونه في هذه الأيام.

تعريف المائع

المائع Fluid هو شكل من أشكال المادة التي تتدفّق بسهولة وتغيّر شكلها استجابة لأية قوة مطبّقة عليها. السوائل والغازات هي موائع (**الشكل 4-4**). تتخذ الموائع شكل الوعاء الذي يحتويها تحت تأثير قوة الجاذبية. حركة الموائع مهمة في جميع مجالات العلوم، بما في ذلك تدفّق الماء والهواء في البيئة والديناميكا الهوائية وتدفّق الدم داخل الجسم.



الشكل 4-4 السوائل والغازات موائع.

الموائع القابلة للانضغاط والموائع غير القابلة للانضغاط

يمكن أن تكون الموائع قابلة للانضغاط أو غير قابلة للانضغاط. يمكن أن تتأثر كثافة **المائع القابل للانضغاط Compressible fluid** عندما يحدث تغيّر في الضغط، فالغازات هي موائع قابلة للانضغاط. افترض أن كمية من غاز وُضعت في محقن ذي نهاية محكمة الإغلاق (**الشكل 4-5a**): إذا طَبَّقتَ شيئًا من القوة على مكبس المحقن، فإن المكبس سيدخل أكثر داخل أسطوانة المحقن، وسيتّخذ الغاز حجمًا أقل، ما يؤدي إلى زيادة كثافة الغاز. وإذا سُمح للمكبس بالتمدّد، فإن الغاز سيشغل حجمًا أكبر من حجم الأسطوانة.

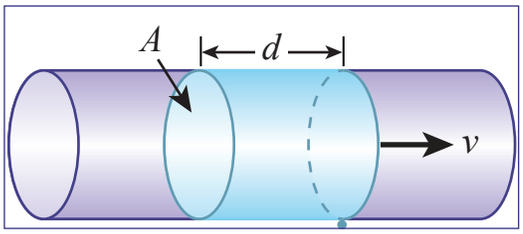
الشكل 4-5 (a) محقن مملوء بالهواء ومحكم الإغلاق؛ (b) محقن مملوء بالماء الملوّن ومحكم الإغلاق.

المائع غير القابل للانضغاط Incompressible fluid كثافته ثابتة، بغض النظر عن الضغط المحيط به، فالسوائل هي موائع غير قابلة للانضغاط. خذ محقنًا مملوءًا بسائل ومحكم الإغلاق (**الشكل 4-5b**). ما دام المحقن مغلقًا، فمن المستحيل أن تدفع المكبس إلى داخل الأسطوانة. تبقى كثافة السائل وحجمه ثابتين. وبالمثل، فإذا تركت فراغًا بين المكبس والسائل، فلن يتمدّد السائل ليملأ الفراغ.

قليلًا ما تتمدّد جميع السوائل وتتقلّص بسبب تغيّرات الضغط ودرجة الحرارة. ومع ذلك، فإن هذه التغيّرات قليلة جدًا، ويمكننا إهمالها.

معدّل التدفّق

يُعرَّف **معدّل التدفّق Flow rate** Q لمائع بأنه حجم المائع V الذي يعبر مساحة بشكل عمودي في زمن t. يكون الحجم في أنبوبة أسطوانية حاصل ضرب مساحة المقطع A بالمسافة d التي يقطعها المائع في وحدة الزمن كما في **الشكل 6-4**.



الشكل 6-4 أنبوبة فيها مائع غير قابل للانضغاط يتحرك بسرعة v.

1-4	معدّل التدفّق	Q	معدّل التدفّق (m^3/s)
	$Q = \frac{V}{t}$	V	الحجم (m^3)
		t	الزمن (s)

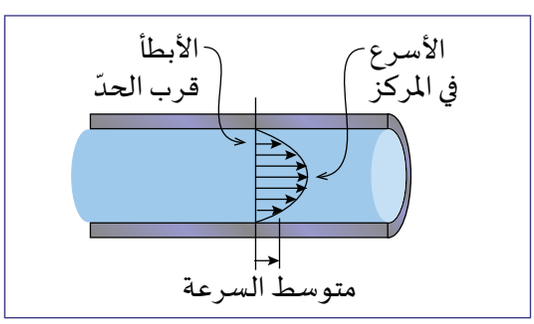
يمكن كتابة المسافة d التي يقطعها المائع على الشكل $d = vt$ حيث v هي السرعة المتوسطة لانسياب المائع. تعطي **المعادلة 2-4** معدّل التدفق بدلالة السرعة المتوسطة v ومساحة المقطع العرضي للأسطوانة A.

2-4	معدّل التدفّق	Q	معدّل التدفّق (m^3/s)
	$Q = Av$	A	مساحة المقطع العرضي (m^2)
		v	السرعة (m/s)

عند حساب معدّل التدفّق في الأنبوبة، ستكون مساحة المقطع العرضي πr^2، لأن الأنابيب أسطوانية الشكل، فتصبح معادلة معدّل التدفّق $Q = \pi r^2 v$.

3-4	معدّل التدفّق	Q	معدّل التدفّق (m^3/s)
	$Q = \pi r^2 v$	r	نصف القطر الداخليّ للأنبوبة (m)
		v	السرعة (m/s)

تستخدم معادلتا معدّل التدفّق 2-4 و3-4 السرعة المتوسطة للمائع في الأنبوبة. هذه السرعة المتوسطة هي متوسط سرعات كافة نقاط المائع التي تتحرك بشكل عمودي لمساحة مقطع الأسطوانة، وهي المُعرّفة في العلاقة 1-4. وحدة معدّل التدفّق في نظام SI هي m^3/s . ويمكن استخدام وحدات أخرى في بعض التطبيقات مثل L/min. تختلف سرعة المائع الفعلية من نقطة إلى أخرى داخل الأنبوبة، فيؤدي الاحتكاك بجدران الأنبوبة إلى تثبيت المائع المتصل بجدران الأنبوبة. وتُسمّى الطبقة الثابتة هذه «الطبقة الحديّة». ويبدو شكل السرعة أثناء التدفّق عبر الأنبوبة كاملًا كما في **الشكل 7-4**.



الشكل 7-4 صورة جانبية لسرعة المائع في أنبوبة.

مثال 1

معدل التدفّق الحجمي لمائع 6 m^3/s. احسب حجم السائل الذي سيتدفّق في دقيقة واحدة.

المطلوب: الحجم V

المُعطى: معدّل التدفّق $Q = 6\ m^3/s$، الزمن $t = 1\ min$،

العلاقات: $$Q = \frac{V}{t}$$

الحل: الزمن المطلوب في هذا السؤال هو 1 دقيقة، أي 60 s.

باستخدام العلاقة المعطاة:

$$Q = \frac{V}{t} \Rightarrow V = Qt = (6)(60) = \boxed{360\ m^3}$$

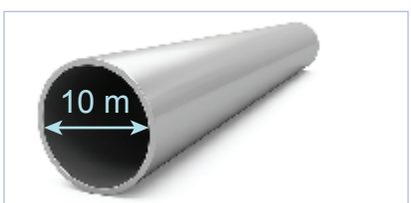
مثال 2

ما معدّل تدفّق النفط في أنبوبة قطرها 10 m، إذا كانت سرعة تدفّق النفط 5 m/s؟

المطلوب: معدل التدفّق Q

المُعطى: القطر $d = 10\ m$، السرعة $v = 5\ m/s$،

العلاقات: $Q = Av$



الشكل 4-8 صورة أنبوبة قطرها 10 m.

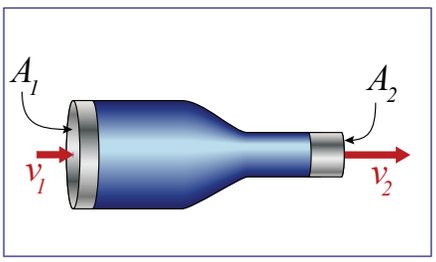
الحل: قطر الأنبوبة 10 m، فيكون نصف قطرها 5 m

مساحة مقطع الأنبوبة العرضي $A = \pi r^2 = \pi(5)^2 = 78.5\ m^2$

يمكن حساب معدّ التدفّق على النحو الآتي:

$Q = Av = 78.5\ (5) = \boxed{392.5\ m^3/s}$

معدّل التدفّق في الأنابيب ذات الأبعاد المختلفة



الشكل 4-9 أنبوبة ذات مقطع عرضي متغير المساحة.

يبيّن (**الشكل 4-9**) أنبوبة لها مساحتي مقطع عرضي مختلفتين عند طرفيها. افترض مائع غير قابل للانضغاط، كالماء مثلا، يتدفق في الأنبوبة. حجم المائع الذي يدخل الأنبوبة عند A_1 في وحدة الزمن يجب أن يساوي حجم المائع الذي يخرج عند A_2.

افترض أن الأنبوبة في (**الشكل 4-9**) مملوءة بالماء. إذا قمنا بضخ $1\ m^3$ من الماء في الأنبوبة خلال ساعة واحدة، فإن $1\ m^3$ من الماء سيتدفّق خارجًا من الأنبوبة خلال ساعة واحدة أيضًا. هذا يعني أن معدّل التدفّق عند مدخل الأنبوبة يساوي معدّل التدفّق عند مخرج الأنبوبة، $Q_1 = Q_2$. سيكون معدّل التدفّق في الواقع هو نفسه في جميع أنحاء الأنبوبة، Q = ثابت.

معدل التدفّق الحجمي للمائع غير القابل للانضغاط عند أي مساحة لمقطعين من الأنبوبة سيكون هو نفسه.

بما أن حجم المائع المتدفق في وحدة الزمن هو نفسه عند طرفي الأنبوبة، فإن معدل التدفق يجب أن يبقى ثابتًا أي $Q_1 = Q_2$. باستخدام العلاقة 4-1 يمكننا ربط السرعتين المتوسطتين v_1 و v_2 بمساحة المقطعين A_1 و A_2. ولأن $Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{A\Delta l}{\Delta t} = Av$

يكون معدل التدفق عند الطرفين هو نفسه: $Q_1 = Q_2$

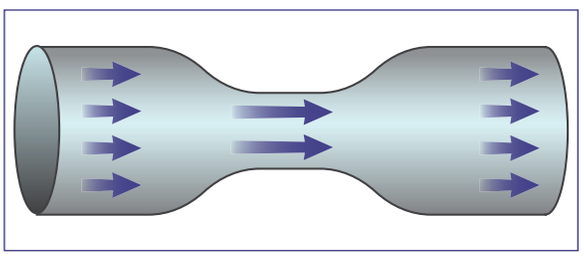
فيكون: $A_1 v_1 = A_2 v_2$

المعادلة 4-4 تُعرف **بمعادلة الاستمرارية Equation of continuity**، لأنها تصف معدّل التدفّق المستمر.

4-4	معادلة الاستمرارية		
$A_1 v_1 = A_2 v_2$		A_1	مساحة المقطع العرضي عند الموقع الأول (m^2)
		v_1	السرعة عند الموقع الأول (m/s)
		A_2	مساحة المقطع العرضي عند الموقع الثاني (m^2)
		v_2	السرعة عند الموقع الثاني (m/s)

توضّح معادلة الاستمرارية أنه، إذا كان المائع يتدفّق عبر مقطع أضيق من الأنبوبة، فإن سرعته ستزداد. أما إذا كان المائع يتدفّق عبر مقطع أوسع، فإن سرعته ستنخفض. تُلاحَظ هذه الظاهرة في كثير من الأماكن المختلفة، مثل خرطوم الحديقة المزوّد بفوهة ضيقة في نهايته لزيادة سرعة الماء المندفع.

أنبوبة فنتوري



الشكل 4-10 أنبوبة فنتوري.

تتكوّن أنبوبة فنتوري من أنبوبة ذات ممرّ أضيق لحصر تدفّق المائع وزيادة سرعته (**الشكل 4-10**). تستخدم أنبوبة فنتوري في كثير من الأجهزة، مثل بخّاخات العطور ومضخّات الشفط ومازج الهواء (الكاربوريتر) في السيارات.

مثال 3

يبلغ قطر خرطوم حديقة 1.8 cm، وهو مزوّد بفوهة قطرها 0.5 cm. احسب سرعة الماء في الخرطوم وفي فوهته إذا كان معدّل تدفّق الماء 0.5 L/s.

المطلوب: سرعة الماء عبر الخرطوم v_1،
سرعة الماء عبر فوهة الخرطوم v_2،

المُعطى: قطر أنبوبة خرطوم الحديقة $d = 1.8$ cm،
قطر الفوهة $d = 0.5$ cm،
معدّل التدفّق $Q = 0.5$ L/s،

العلاقات: $Q = Av$،
$A_1v_1 = A_2v_2$،

الحل: عبر الخرطوم: قطر الأنبوبة 1.8 cm. نصف قطر الأنبوبة سيكون $\frac{1.8}{2} = 0.9$ cm.
وبالمتر، سيكون 9×10^{-3} m.

مساحة مقطع الأنبوبة هي $A = \pi r^2 = \pi(9 \times 10^{-3})^2 = 2.5 \times 10^{-4}$ m^2.

معدّل التدفّق معطى بوحدة L/s. بتحويله إلى وحدات SI:

$$Q = \frac{0.5 \text{ L}}{1 \text{ s}} \times \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ L}} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

يمكن حساب سرعة الماء في الخرطوم كما يأتي:

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{5 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} = \boxed{2 \text{ m/s}}$$

فوهة الخرطوم:

قطر الفوهة 0.5 cm، ونصف قطرها $\frac{0.5}{2} = 0.25$ cm. وبالمتر،
سيكون 2.5×10^{-3} m.

لحساب سرعة الماء المتدفّق من الفوهة، يمكننا استخدام معادلة الاستمرارية.

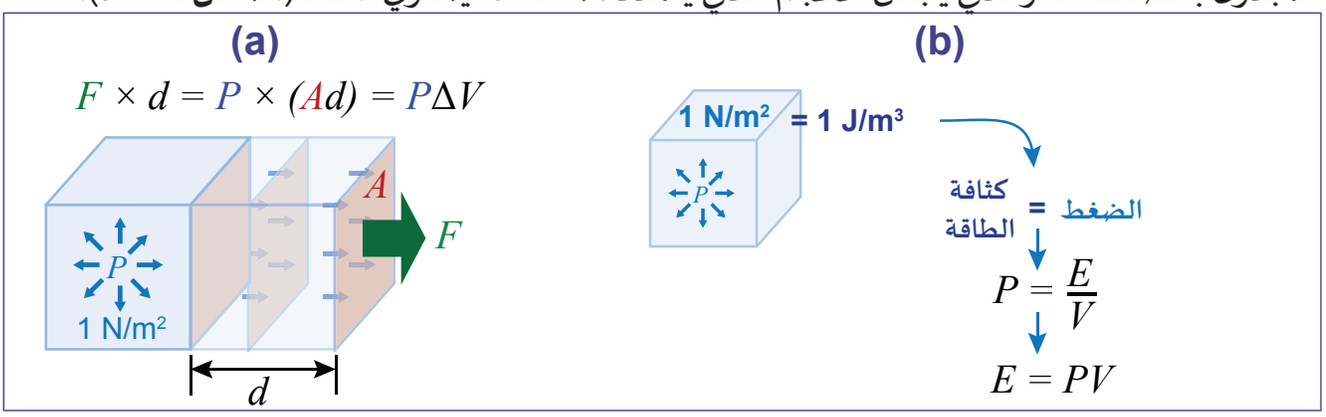
$$A_1v_1 = A_2v_2$$

$$\left(2.5 \times 10^{-4}\right)(2) = \left(\pi\left(2.5 \times 10^{-3}\right)^2\right)v_2$$

$$v_2 = \boxed{25.5 \text{ m/s}}$$

حفظ الطاقة في الموائع

الطاقة هي القدرة على بذل قوة لإنجاز شغل. في الموائع، يجب علينا تركيز الاهتمام في الطاقة التي يسبّبها الضغط. ترتبط الطاقة والضغط ارتباطًا وثيقًا لأن القوة هي حاصل ضرب الضغط في المساحة. فالشغل المبذول بالضغط P، والذي يجعل الحجم الذي يتمدّد مسافة d، يساوي $P\Delta V$ (**الشكل a11-4**).

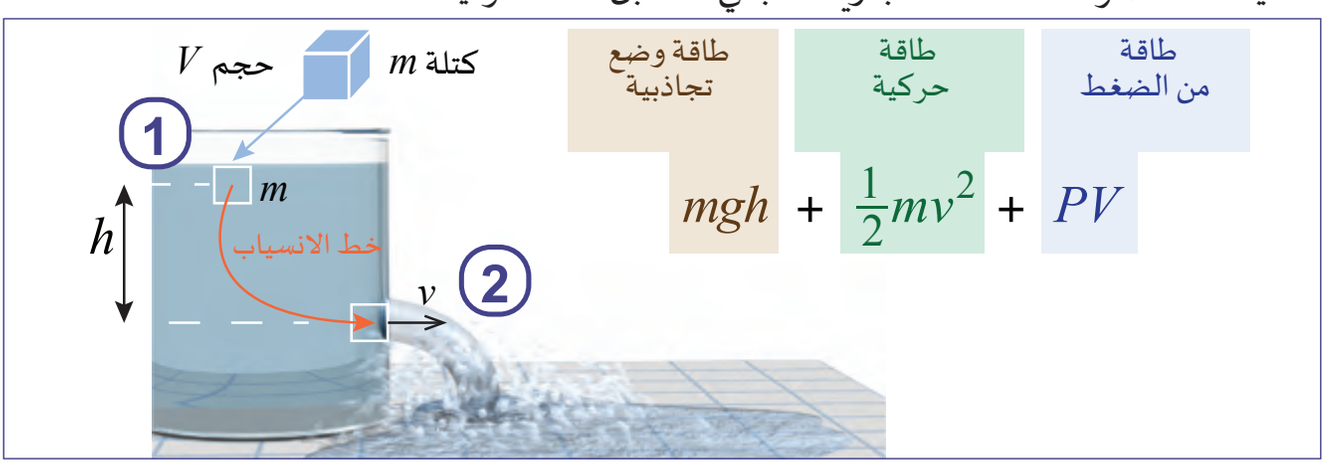


الشكل 4-11 الضغط والطاقة.

يمثّل الشغل المبذول تغيّرًا في الطاقة ΔE. فإذا كانت $\Delta E = P\Delta V$، فهذا يعني أن الطاقة الناتجة عن الضغط هي $E = PV$. يفيدنا ذلك في أن الضغط شكل من أشكال كثافة الطاقة (**الشكل b11-4**). كثافة الطاقة هي الطاقة في وحدة الحجوم.

لتوضيح حفظ الطاقة، تخيّل خزّانًا في أحد جوانبه ثقب، يخرج منه تيار من الماء. تتحوّل طاقة الضغط في داخل الخزّان إلى طاقة حركية عندما يخرج الماء.

1. يكون ارتفاع كتلة الماء في البداية h، ولكن من دون سرعة.
2. يفقد الماء ارتفاعه عند الثقب ويكتسب في المقابل طاقة حركية.



الشكل 4-12 حفظ الطاقة المطبّق على مائع بين نقطتين.

طاقة كتلة من الماء هي مجموع طاقة الوضع التجاذبية والطاقة الحركية وطاقة الوضع من الضغط. نفترض أن المستوى المرجعي لطاقة الوضع التجاذبية هو الخط الأفقي عند النقطة 2 حيث $h = 0$. فإذا جعلنا الطاقة الكلية عند النقطة (1) تساوي تلك عند النقطة (2)، فإن بإمكاننا حساب سرعة المائع.

$$\text{(1)}\quad mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \quad \text{(2)}$$

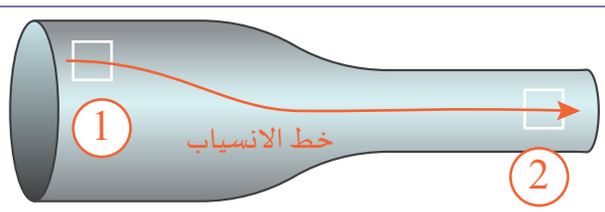
(same) (same)

$$v = \sqrt{2gh}$$

الإجابة

معادلة برنولي

نطبّق قانون حفظ الطاقة في الموائع على كتلة المائع التي تتحرك على طول خط الانسياب. **خط الانسياب Streamline** هو خط وهمي يتتبّع حركة جزء معين من المائع أثناء انسيابه. فإذا لم يكن هناك شغل متبادل مع كتلة المائع، فإن الطاقة تكون على طول خط الانسياب ثابتة.



$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV$$

الشكل 4-13 توضيح معادلة برنولي.

بمساواة الطاقة عند نقطتين من خط الانسياب نحصل على:

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 + P_1V_1 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + P_2V_2$$

نعيد كتابة معادلة الطاقة بالتعويض عن m بدلالة كثافة المائع ρ.

$$m = \rho V_1 = \rho V_2$$

$$\rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 = \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_2$$

وهو ما يسمى **بمعادلة برنولي Bernoulli's equation** (العلاقة 4-5)، وهي معادلة حفظ الطاقة عند تطبيقها لحركة مائع على خط انسياب.

5-4 معادلة برنولي

$$\text{ثابت} = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$$

ρ	الكثافة (kg/m^3)
g	تسارع الجاذبية (m/s^2) أو (N/kg)
h	الارتفاع (m)
v	السرعة (m/s)
P	الضغط (Pa أو N/m^2)

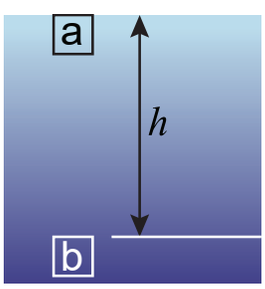
مثال 4

ما ضغط الماء عند عمق h تحت سطح المحيط؟

العلاقات:

$$\text{ثابت} = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$$

الحل: نطبّق معادلة برنولي على السطح حيث $P = 0$ وعلى العمق h في كلتا الحالتين تكون السرعة صفرًا.



النقطة a — النقطة b

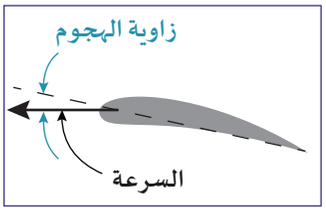
$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$$

($v = 0$ عند النقطة a، $P = 0$ عند النقطة b، $h = 0$ عند النقطة b)

$$P = \rho gh$$

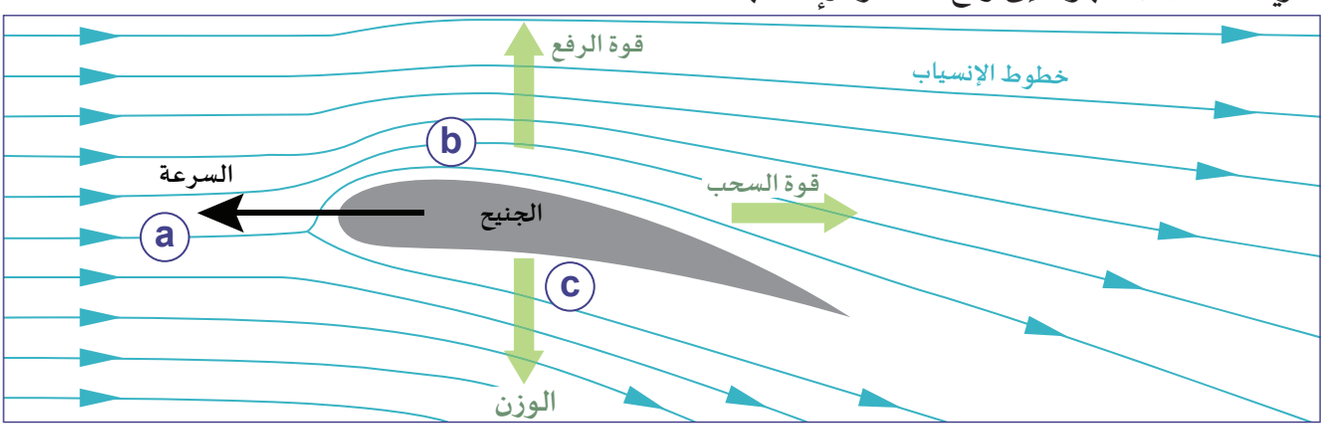
الإجابة

معادلة برنولي والطيران



الشكل 4-14 زاوية الهجوم.

لكي تتمكن الطائرة من الإقلاع، عليها أن تُولّد قوة رفع رأسية تساوي وزنها على الأقل. تنشأ قوة الرفع هذه من التحكم بحركة الهواء حول جناحي الطائرة (**الشكل 4-14**). المقطع العرضي للجناح له شكل جناح حامل (جنيح). يدفع محرك الطائرة الجناح للانطلاق في اتجاه معاكس لاتجاه قوة سحب الهواء. يدفع الجناح المتحرك الهواء المقابل له بسرعة عالية. وتؤدي طريقة انسياب الهواء إلى رفع الطائرة وإقلاعها.



الشكل 4-15 خطوط الانسياب والقوى حول جنيح الطائرة خلال الاقلاع والطيران.

تُجبر زاوية الهجوم الهواء عند النقطة (a) على الانقسام إلى مسارين: تدفّق للهواء فوق الجزء العلوي من الجناح (b) وتدفّق آخر للهواء تحت الجزء السفلي من الجناح (c). بينما في البداية، كانت سرعة كل من خطي الانسياب هي نفسها والضغط هو نفسه (**الشكل 4-15**).

يتحرك الهواء فوق الجناح (في المنطقة b) بسرعة أكبر، لأن الجناح يجبر الهواء على الانسياب من حوله إلى أعلى مقللًا بذلك المساحة التي يمكن للهواء أن يندفع عبرها. وتقليل المساحة يؤدي إلى زيادة السرعة كما تفيد معادلة الاستمرارية.

أما تحت الجناح (في المنطقة c) فتقل سرعة انسياب الهواء لأن زاوية الهجوم وشكل الجناح يؤديان إلى دفع الهواء إلى أسفل الجناح.

معادلة برنولي
بتعبيري السرعة والضغط

$$\frac{1}{2}\rho v_a^2 + P_a = \frac{1}{2}\rho v_b^2 + P_b = \frac{1}{2}\rho v_c^2 + P_c$$

الشكل 4-16 معادلة برنولي لجنيح طائرة .

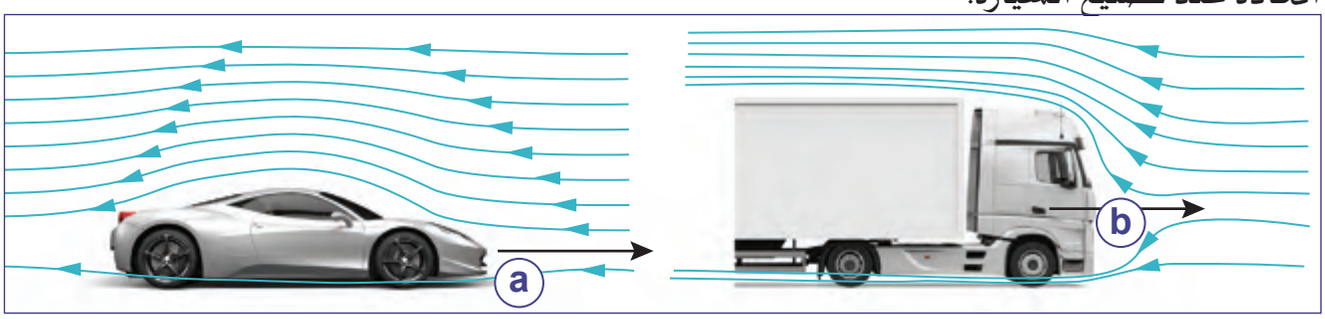
كما يشر **الشكل 4-16**، فإن معادلة برنولي تنص على أن الطاقة يجب أن تكون متساوية لكلا المسارين الناتجين عند خط الانسياب (a) . تفيد السرعة العالية في المنطقة (b) بأن الضغط فوق الجناح يكون أقل. بينما السرعة المنخفضة في المنطقة (c) تعني أن الضغط تحت الجناح يكون أكبر. يؤدي اختلاف الضغط بين منطقتي فوق الجناح وتحته إلى توليد جزء من قوة رفع الطائرة مع إهمال المسافة بين مستويي الجناح العلوي والسفلي. الجزء الآخر من قوة الرفع ينتج من أن الهواء يكتسب مركبة سرعة إلى الأسفل، فيؤدي رد فعل هذه القوة إلى دفع الجناح إلى أعلى ما يساهم في قوة الرفع.

معادلة برنولي وحركة السيارات

يتعيّن على محرك السيارة أن ينتج قوة كافية للتغلب على مقاومتين تؤثران في حركة السيارة:

1. الاحتكاك داخل أجزاء السيارة ومع الطريق.
2. الاحتكاك مع الهواء، والناتج عن دفع كتلة كبيرة منه حول السيارة.

قوة الاحتكاك مع الهواء هي القوة التي تعترض حركة السيارة عند سرعات تبدأ من 10 m/s (36 km/h). وعند بلوغ سرعة 100 km/h، تُستَخدم معظم طاقة المحرك لمقاومة الاحتكاك مع الهواء. يمكن التقليل من مقاومة الهواء بجعل خطوط سير الهواء حول السيارة أكثر انسيابية وذلك بتجنّب الانعطافات الحادة عند تصنيع السيارة.

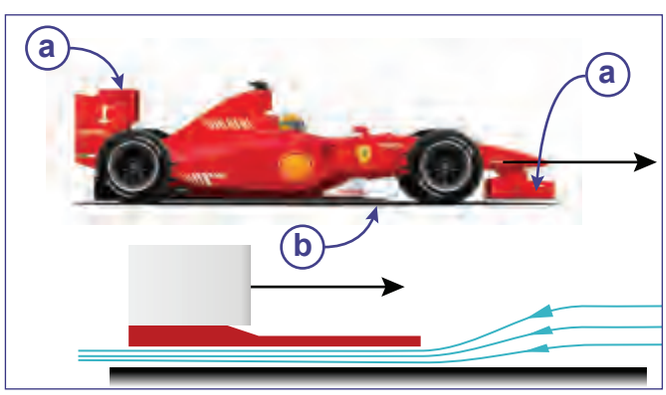


الشكل 4-17 خطوط انسياب الهواء حول سيارة (a) وحول شاحنة (b)

يظهر **الشكل 4-17** خطوط انسياب الهواء حول سيارة وشاحنة تتحركان بسرعة معينة. ينساب الهواء بسلاسة حول السيارة مع وجود مساحة صغيرة (a) فقط من مقدمة السيارة تفرض على الهواء الانحراف عن مساره بشكل حاد. أما الشاحنة فلها مساحة مقدمة كبيرة (b) تنخفض عندها سرعة الهواء عند تغير اتجاه سرعته حول الشاحنة. وِفقَ معادلة برنولي، يزداد ضغط الهواء عند (b) مع انخفاض سرعته. يدفع الضغط العالي الشاحنة إلى الخلف نتيجة للاحتكاك مع الهواء.

أما سيارات السباق فتستفيد من إنسياب الهواء للحصول على تأثير مختلف تمامًا. فسيارة السباق يجب أن تقلع وتستدير وتتوقف بسرعة. لذلك تُبذَل قوة كبيرة بين الإطارات والحلبة، لأن قوة الاحتكاك البسيطة، والناتجة عن وزن السيارة، لا تؤدي إلى تماسك الإطارات بشكل جيد مع الطريق. لذلك تستخدم سيارات السباق تقنيات مختلفة لإنتاج قوة إضافية تدفع السيارة باتجاه الطريق وتكون أضعاف قوة وزن السيارة.

1. يؤدي استخدام أجنحة مقلوبة عند مقدمة السيارة ومؤخرتها للحصول على قوة رأسية إلى أسفل نتيجة لحركة الهواء، تماما كما تؤدي حركة الهواء حول جناح الطائرة إلى إقلاعها.
2. يندفع الهواء في الممر الضيّق تحت السيارة فتزداد سرعته. يؤدي ازدياد سرعة الهواء إلى انخفاض ضغطه فيُنتِجُ قوة شفط تجعل السيارة متماسكة مع الأرض.



الشكل 4-18 إنتاج قوة رأسية إلى أسفل في سباق السيارات نتيجة لتدفق الهواء.

مثال 5

تزداد سرعة الماء في خرطوم حديقة من 2 m/s إلى 25.5 m/s عندما ينتقل الماء عبر فوهة الخرطوم. احسب الضغط في داخل خرطوم الحديقة إذا كان الضغط في الفوّهة 1×10^5 N/m^2.

المطلوب: الضغط في خرطوم الحديقة P_1،

المُعطى: سرعة الماء داخل خرطوم الحديقة $v_1 = 2$ m/s،
سرعة الماء الخارج من الفوّهة $v_2 = 25.5$ m/s،
الضغط في الفوّهة $P_2 = 1 \times 10^5$ N/m^2،
كثافة الماء $\rho = 10^3$ kg/m^3،

العلاقات: ثابت $= \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$

الحل: عند حل السؤال المتعلق بمعادلة برنولي، يجب أن يؤخذ في الحسبان أن هذا السؤال يكون حول حفظ الطاقة. في هذا السؤال، ينتقل الماء من خرطوم الحديقة إلى الفوهة، فتتغير سرعة الماء. ويشير السؤال إلى أن الضغط يتغيّر أيضًا. هنا، يمكن تجاهل ارتفاع الماء لأنه لم يرد له ذكر في السؤال. المجموع الكليّ للطاقات في موقع معيّن يساوي المجموع الكليّ للطاقات في موقع آخر. سرعة الماء في خرطوم الحديقة أصغر بكثير من سرعة الماء الخارج من الفوهة. وهذا يعني أن ضغط الماء في خرطوم الحديقة سيكون أكبر بكثير من ضغط الماء الذي يخرج من الفوهة. يمكننا وضع المعادلة على النحو الآتي:

$$\rho g\cancel{h_1}^{0} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 = \rho g\cancel{h_2}^{0} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_2$$

$$\frac{1}{2}(10^3)(2)^2 + P_1 = \frac{1}{2}(10^3)(25.5)^2 + (1\times10^5)$$

$$P_1 = \boxed{423{,}125 \text{ N/m}^2}$$

نشاط 4-1 أمثلة على تأثير برنولي

سؤال الاستقصاء	ملاحظة تأثير برنولي في أمثلة مختلفة.
الموادّ المطلوبة	ورق، ماصّات، علبتا مشروب غازي، قمع، كرة تنس طاولة (بينج بونج).

خطوات النشاط 1

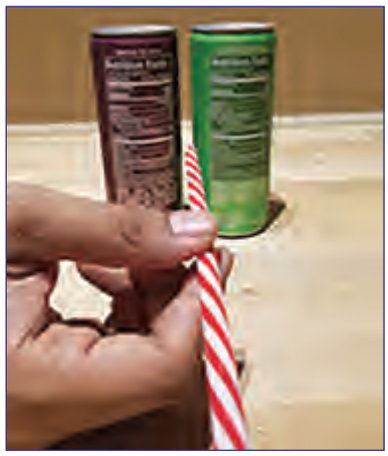
اطوِ ورقة من المنتصف واجعلها مثل الخيمة، كما هو مبيّن في **(الشكل 4-19)**.

1. استخدم الماصّة لتنفخ في الخيمة الورقية.
2. ماذا تلاحظ؟
3. اشرح كيف يظهر تأثير برنولي في هذه الملاحظة.

الشكل 4-19 ترتيب الورق والماصّة.

خطوات النشاط 2

1. خذ علبتَيْ مشروب غازي فارغتين وضع إحداهما بالقرب من الأخرى كما هو مبيّن في **(الشكل 4-20)**.
2. استخدم ماصّة للنفخ بين العلبتين.
3. ماذا تلاحظ؟
4. اشرح كيف يظهر تأثير برنولي في هذه الملاحظة.



الشكل 4-20 ترتيب علبتَي المشروب الغازي.

خطوات النشاط 3

1. ضع كرة تنس الطاولة (بينج بونج) في داخل قمع كما في **(الشكل 4-21)**.
2. انفخ في الجزء السفلي من القمع لرفع الكرة
3. ماذا تلاحظ؟
4. الآن انفخ في الجزء العلوي من القمع.
5. ماذا تلاحظ؟
6. اشرح كيف يظهر تأثير برنولي في هذا النشاط.

الشكل 4-21 ترتيب كرة البينج بونج والقمع.

تقويم الدرس 4-1

1. ما العلاقة بين معدّل التدفّق وسرعة المائع؟

2. a. ما الفرق بين مائع قابل للانضغاط ومائع غير قابل للانضغاط؟
   b. حدّد 3 مواد تُعدّ مثالًا على مائع غير قابل للانضغاط.

3. كيف يمكننا أن نولّد زيادة في سرعة التدفّق في أنبوبة؟ أيكون ذلك بتقليل نصف قطر الأنبوب أم بزيادته؟ وضّح اختيارك.

4. تتضاعف مساحة المقطع العرضي لأنبوبة يتدفق فيها ماء تسع مرات. كيف تتغير سرعة تدفّق الماء فيه؟

5. لماذا نتعرض للخطر إذا وقفنا بالقرب من خطوط السكك الحديدية عندما يمر عليها قطار سريع؟

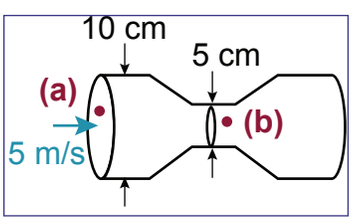
6. احسب الضغط على عمق 10 m في مائع كثافته $5000\ kg/m^3$، أي خمسة أضعاف كثافة الماء.

7. يُخزن الماء في برج مبنى. وعندما ينتقل الماء من البرج إلى الشقق المختلفة، يتغير حجم الأنابيب، فينتقل الماء بسرعة 5 m/s في الأنبوبة التي قطرها 0.5 m. ويزداد قطر الأنبوب إلى 1.5 m. فما هي سرعة الماء في الأنبوبة التي يبلغ قطرها 1.5 m إذا أهملنا الطاقة المهدورة؟

8. كوب ورقي مملوء بالماء وُضع على طاولة. أحدث طالب ثقبًا في الكوب على بعد 10 cm في أسفل حافته. ما سرعة الماء المتدفّق من الثقب؟

9. تستخدم مصفاة نفط الإيثانول كوقود، فيتدفّق الإيثانول بسرعة 1 m/s وضغط 101,300 Pa في أنبوبة الوقود. فإذا أرادت المصفاة زيادة ضغط الإيثانول في الأنبوبة إلى 202,600 Pa، فما الفرق في ارتفاع الأنبوبة؟ (كثافة الإيثانول $789\ kg/m^3$).

10. يتناقص قطر أنبوبة أسطوانية من 10 cm إلى 5 cm، ثم يعود إلى 10 cm مرة أخرى. يدخل هواء كثافته $1\ kg/m^3$ الأنبوبة بسرعة متوسطة 5 m/s عند النقطة (a) حيث الضغط 100 kPa. احسب الضغط عند النقطة (b).



الدرس 2-4

الغاز المثالي
Ideal Gas

المفردات

الضغط المطلق	Absolute pressure
قانون بويل	Boyle's Law
قانون تشارلز	Charles's law
قانون جاي لوساك	Gay-Lussac's law
الغاز المثالي	Ideal gas
قانون الغاز المثالي	Ideal gas law
ثابت الغاز المثالي	Ideal gas constant
ثابت بولتزمان	Boltzmann constant

اكتسبت بالونات الهواء الساخن مؤخرًا شعبية واسعة وشاع استخدامها في كثير من المراكز السياحية. كيف تطفو بالونات الهواء الساخن؟ عند تسخين الهواء داخل البالون تتباعد جزيئاته فيزداد حجمه. الزيادة في الحجم تجعل الهواء داخل البالون أقل كثافة من كثافة الهواء خارج البالون، فيرتفع.

الشكل 4-22 بالون هواء ساخن.

مخرجات التّعلُّم

P1208.1 يشتق ويستخدم قوانين الغازات ومعادلة الغاز المثالي: ($PV = nRT$).

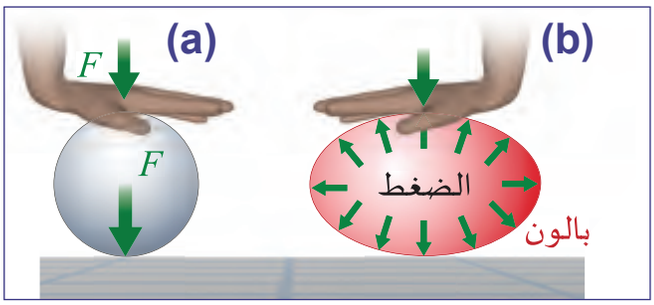
P1208.2 يوضح بطريقة تجريبية كيف تؤدّي معادلة الغاز المثالي إلى مفهوم الصفر المطلق لدرجة الحرارة.

P1208.3 يطبّق نموذج الحركة الجزيئية على الغاز المثالي، ويشرح -من حيث الحجم الجزيئي والقوى بين الجزيئات- كيف ينحرف سلوك الغازات الحقيقية عن نموذج الغاز المثالي تحت الضغط المرتفع ودرجات الحرارة المنخفضة.

P1208.4 يوضح أن المعالجة النظرية للحركة الجزيئية وضغط الغاز يؤدّيان إلى العلاقة ($PV = \frac{1}{3}Nm(\overline{c})^2$) ومن خلال دمجها مع معادلة الغاز. ويدرك أن متوسط الطاقة الحركية للجزيء بسبب حركته يتناسب مع درجات حرارته المطلقة.

ضغط الغازات

مفهوم الضغط مهم لأن القوى في الموائع تعمل بشكل مختلف عن القوى في المواد الصلبة. يوضح **الشكل 4-23a** كيفية تطبيق القوة على جسم صلب، مثل كرة البولينج، وكيفية انتقال هذه القوة داخل الكرة بشكل تقريبي.



الشكل 4-23 القوة على حسب صلب (a) وعلى مائع في بالون (b).

ينشئ الضغط قوى تتوزع على جميع الأسطح الملامسة للمائع. في **الشكل 4-23b**، تُنشىء القوة المطبقة على بالون ضغطًا موزعًا يعمل على جميع الأسطح الملامسة للهواء في الداخل. عندما تضغط على بالون، يؤثر المائع (الهواء) بداخله بضغط منتظم نحو الخارج في كل الأنحاء داخل البالون. يزداد الضغط في البالون إلى أن يتّزن الضغط الذي تؤثر به مساحة يدك على البالون مع القوة المؤثرة نحو الأسفل.

الضغط المطلق

يبلغ متوسط ضغط الغلاف الجوي عند مستوى سطح البحر 101,325 Pa. تستخدم مقاييس الضغط لقياس ضغط الموائع داخل الأجسام، مثل الإطارات. ضغط الموائع هذا هو ضغط يُضاف إليه ضغط الغلاف الجوي.

الضغط المطلق Absolute pressure هو مجموع ضغط المقياس وضغط الغلاف الجوي. إذا كانت قراءة مقياس ضغط 36.542 Pa، فهذا يعني أن الضغط المطلق هو:

$$101{,}325 + 36{,}542 = 137{,}867 \text{ Pa}$$

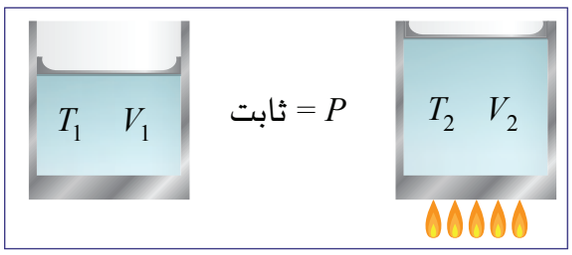
زيادة الضغط في مضخّة دراجة هوائيّة

- ضع شريطًا حراريًا على السطح الخارجي للمضخّة (**الشكل 4-24**).
- اسحب مقبض مضخّة الدراجة إلى أن تمتلئ بالهواء.
- سدّ طرف المضخّة لئلّا يتمكّن الهواء من التسرب.
- اضغط المضخّة.
- ماذا يحدث لدرجة الحرارة على الشريط الحراري؟
- هل كان التغيير فوريًا؟
- ما الذي يحدث للجزيئات داخل المضخّة؟

الشكل 4-24 مضخّة دراجة هوائيّة مع شريط حراري.

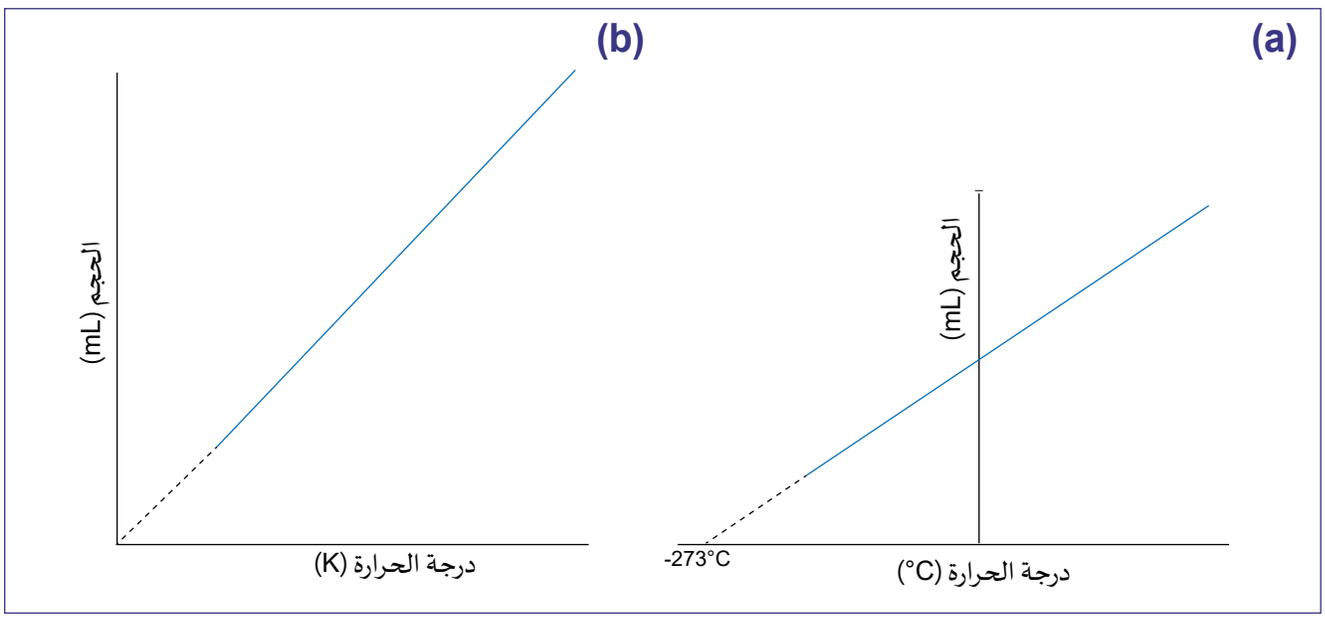
درجة الحرارة والحجم وقانون شارل

يتناسب تمدد الغازات وانكماشها، عند ضغط ثابت، طرديًا مع درجة الحرارة المُطلقة (على مقياس كلفن)، أي $V \propto T$. يسمى هذا القانون **بقانون شارل Charles's law** على اسم العالم الفرنسي جاك شارك (**الشكل 4-25**).



الشكل 4-25 قانون شارل: يتناسب الحجم طرديا مع درجة الحرارة المطلقة عند ضغط ثابت .

يوضح **الجدول 4-1** قيم درجة الحرارة السيليزية والحجم لغاز عند ضغط ثابت. العلاقة بين درجة الحرارة والحجم علاقة خطية كما في **الشكل 4-26**. إذا أُكمِلَ الخط البياني إلى الخلف، يكون الحجم صفرا عند درجة حرارة 273°C –. تسمى درجة الحرارة هذه **بالصفر المطلق Absolute zero**.



الشكل 4-26 (a) قانون شارل: تغير حجم الغاز مع درجة الحرارة (بوحدة °C) عند ضغط ثابت. (b) قانون شارل: تغير حجم الغاز مع درجة الحرارة (بوحدة K) عند ضغط ثابت.

الصفر المطلق هو أقل قيمة طبيعية لدرجة الحرارة. يبدأ **مقياس كلفن Temperature scale** لدرجة الحرارة عند الصفر المطلق والفرق بين درجاته يساوي الفرق بين درجات المقياس المئوي (السيليزي). يتجمّد الماء عند درجة حرارة 273 K ويغلي عند درجة حرارة 373 K. تقاس درجات حرارة المقياس المطلق بالكلفن (K) ولا يُشار إليها بـ °K. وباستخدام المقياس المطلق، تكون صيغة قانون شارل ببساطة قيم متساوية لِنِسَب الحجم إلى درجة الحرارة (**المعادلة 4-6**)

6-4	قانون شارل		
	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	V_1	الحجم الابتدائي (m^3)
		T_1	درجة الحرارة الابتدائية (K)
		V_2	الحجم النهائي (m^3)
		T_2	درجة الحرارة النهائية (K)

الصفر المطلق

تقيس درجة الحرارة الطاقة الحركية المتوسطة والعشوائية لجسيمات الغاز. فعند انخفاض درجة الحرارة، تتحرك الجسيمات بسرعة أبطأ. وعند درجة حرارة الصفر المطلق، تكون حركة الجسيمات عند أقل سرعة تسمح بها ميكانيكا الكم. لا يمكن لدرجة الحرارة أن تكون دون الصفر المطلق، وليس هناك قيم سالبة لدرجة الحرارة على مقياس كلفن.

- لتحويل درجة الحرارة من سيليزي إلى كلفن نُضيف 273 لدرجة الحرارة السيليزية. فمثلاً درجة الحرارة 10°C تساوي 283 K (المعادلة 4-7)
- لتحويل درجة الحرارة من كلفن إلى سيليزي نطرح 273 من درجة الحرارة المطلقة. فمثلًا درجة الحرارة 373 K تساوي 100°C (**المعادلة 4-7**)

7-4	درجات الحرارة على مقياسي كلفن وسيليزي		
T_K	$T_K = T_C + 273$	درجة الحرارة (K)	
T_C	$T_C = T_K - 273$	درجة الحرارة (°C)	

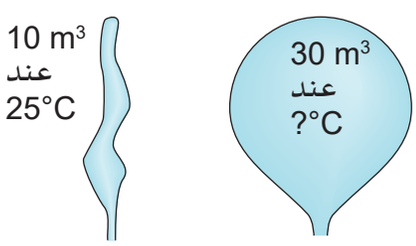
درجة الحرارة والضغط اللذين يظهران في معادلات الغاز المثالي هما درجة الحرارة المطلقة والضغط المطلق.

- يجب أن تكون درجة الحرارة وفق مقياس كلفن، أي المقياس المطلق.
- يجب أن يكون الضغط بقيمته المطلقة التي تشتمل على الضغط الجوي (100000 Pa)

درجة الحرارة والضغط اللذين يظهران في معادلات الغاز المثالي هما درجة الحرارة المطلقة (K) والضغط المطلق (Pa).

مثال 6

يحتوي بالون هواء ساخن على كمية من الهواء حجمها $10\ m^3$ ودرجة حرارتها 25°C. إلى أي درجة حرارة يجب أن يُسخّن الهواء بحيث يصبح حجمه النهائي $30\ m^3$؟



المطلوب: درجة الحرارة النهائية T_2 بوحدة °C،

المُعطيات: $V_2 = 30\ m^3$ ؛ $V_1 = 10\ m^3$ $T_1 = 25°C$

العلاقات: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ ،

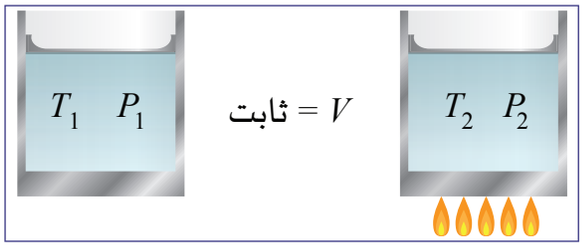
الحل:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{(30\ m^3)}{(10\ m^3)} (25 + 273) = 894K$$

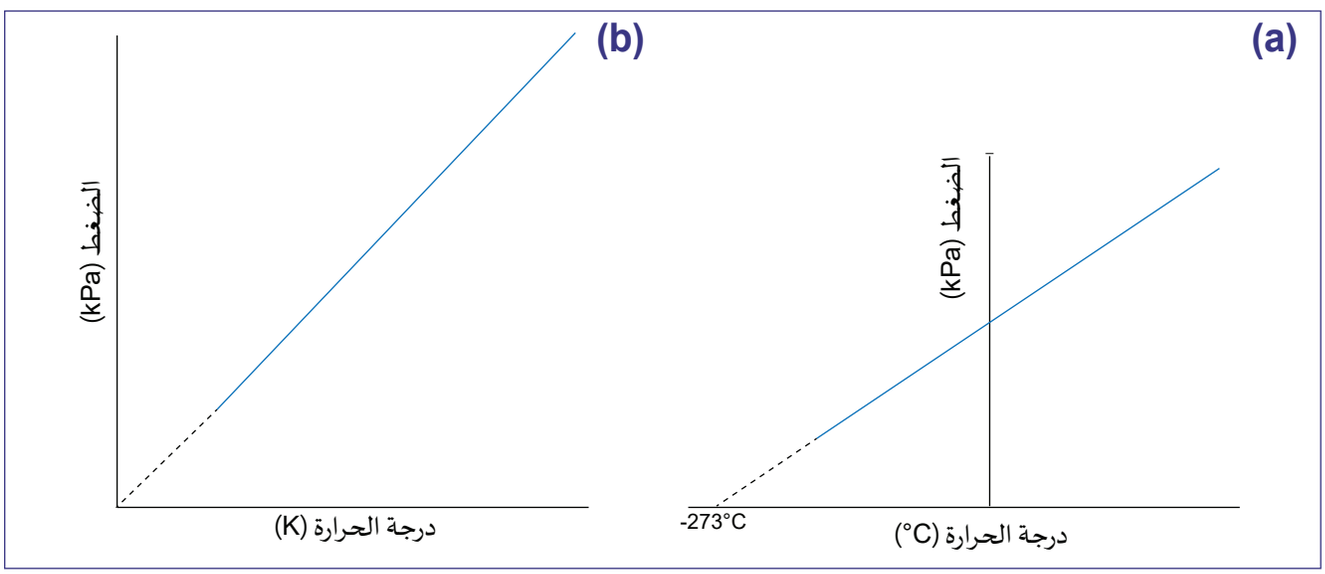
$$T_2 = (894 - 273) = \boxed{621°C}$$

درجة حرارة الغازوضغطه، وقانون جاي لوساك

إذا بقي حجم الغاز ثابتًا، فإن ضغطه يتناسب طرديًا مع ازدياد درجة حرارته على مقياس كلفن، أي $P \propto T$. فعند ثبوت الحجم، يزداد الضغط كلما ارتفعت درجة الحرارة(**الشكل 4-27**). تسمى هذه العلاقة بقانون **جاي-لوساك Gay-Laussac's law** تكريما للعالم الفرنسي جوزف جاي-لوساك الذي اكتشفه في العام 1809.



الشكل 4-27 عند حجم ثابت، يزداد الضغط بازدياد درجة الحرارة.



الشكل 4-28 (a) علاقة الضغط بدرجة الحرارة (بوحدة °C)عند حجم ثابت. (b) علاقة الضغط بدرجة الحرارة (بوحدة K) عند حجم ثابت.

يمكن صياغة قانون جاي-لوساك كما في **المعادلة 4-8**. نلاحظ أن درجة الحرارة المطلقة والضغط المطلق يتناسبان طرديًا، أي $P \propto T$.

8-4 قانون جاي لوساك

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

P_1	الضغط الابتدائي (Pa أو N/m^2)
T_1	درجة الحرارة الابتدائية (K)
P_2	الضغط النهائي (Pa أو N/m^2)
T_2	درجة الحرارة النهائية (K)

مثال 7

سُخِّنَت كمية من غاز عند حجم ثابت من درجة حرارة 25°C وضغط 100 Pa إلى درجة حرارة 1000°C. ما هو الضغط النهائي للغاز؟

الحل:

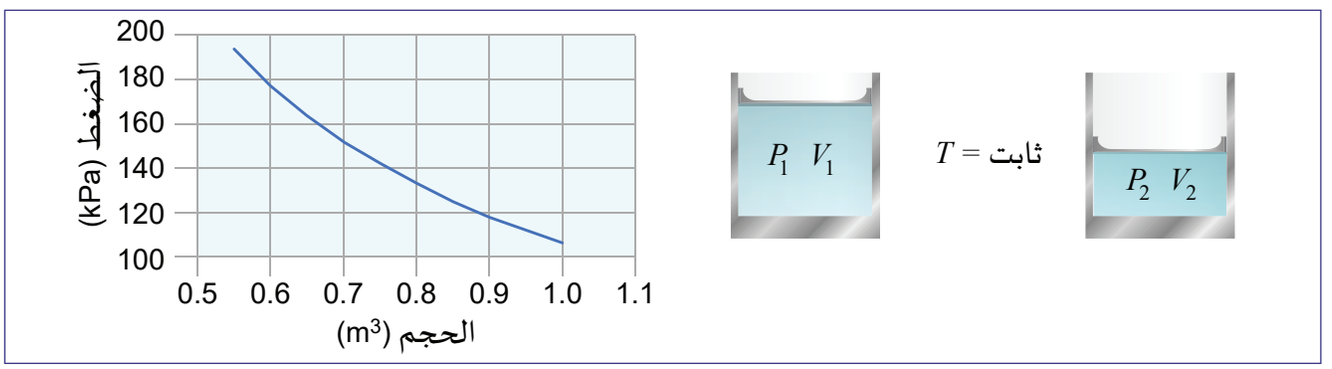
$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1 = \frac{(1000 + 273)}{(25 + 273)}(100000)$$

$$P_2 = 427181 \text{ Pa}$$

ضغط الغازوحجمه

افترض كمية من الغاز محصورة في اسطوانة مزودة بمكبس متحرك. عند تحريك المكبس صعودًا ونزولًا، تبقى كمية الغاز (كتلته) هي نفسها بينما يمكن لكل من درجة الحرارة والضغط والحجم أن يتغير.

إذا انخفض حجم الغاز في الأسطوانة، فإن ضغطه سيزداد (**الشكل 4-29**) . يقدم **قانون بويل Boyle's law** الصياغة الرياضية لذلك، وهي أن الضغط يتناسب عكسيا مع الحجم عند درجة حرارة ثابتة، أي $P \propto \frac{1}{V}$. والعكس صحيح أيضًا، فكلما ازداد حجم الغاز انخفض ضغطه.



الشكل 4-29 قانون بويل: يزداد ضغط الغاز مع انخفاض حجمه.

يمكن التعبير عن قانون بويل **بالمعادلة 4-9**. التي تفيد أن الضغط يتناسب عكسيًا مع الحجم $P \propto \frac{1}{V}$.

9-4	**قانون بويل**		
$P_1V_1 = P_2V_2$		P_1	الضغط الابتدائي (Pa أو N/m^2)
		V_1	الحجم الابتدائي (m^3)
		P_2	الضغط النهائي (Pa أو N/m^2)
		V_2	الحجم النهائي (m^3)

مثال 8

يبلغ حجم كمية من الغاز $9 \times 10^{-4}\ m^3$ وضغطها 200 kPa. إذا ازداد الضغط إلى 600 kPa عند ثبات درجة الحرارة، فما هو الحجم الجديد للغاز؟

المطلوب: الحجم النهائي للغاز V_2.

المُعطى: الضغط الابتدائي $P_1 = 200\ kPa$،
الضغط النهائي $P_2 = 600\ kPa$،
الحجم الابتدائي $V_1 = 9 \times 10^{-4}\ m^3$،

العلاقات: $P_1V_1 = P_2V_2$،

الحل: استخدام قانون بويل $P_1V_1 = P_2V_2$

$$(200)\left(9\times10^{-4}\right) = (600)V_2$$

$$V_2 = \boxed{3\times10^{-4}\ m^3}$$

مثال 9

غاز، حجمه $0.002\ m^3$ عند درجة حرارة $22^\circ C$، سُخِّن عند ضغط ثابت فازداد حجمه إلى $0.004\ m^3$. ما هي درجة الحرارة النهائية؟

المطلوب: درجة الحرارة النهائية T_2،

المُعطيات: الحجم الابتدائي $V_1 = 0.002\ m^3$،
الحجم النهائي $V_2 = 0.004\ m^3$،
درجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 22^\circ C$،

العلاقات: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ ،

الحل: نحوّل درجة الحرارة إلى الكلفن: $T_1 = 22 + 273 = 295\ K$

باستخدام قانون شارل: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{0.002}{295} = \frac{0.004}{T_2}$

$T_2 = \boxed{590\ K}$

مثال 10

درجة الحرارة الابتدائية لغاز هي 37^oC وضغطه الابتدائي $300\ kPa$. يتم وضع الغاز داخل حاوية ذات حجم ثابت. كم سيبلغ ضغط الغاز، إذا ازدادت درجة حرارته إلى 87^oC؟

المطلوب: الضغط النهائي P_2،

المُعطيات: درجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 37^\circ C$،
درجة الحرارة النهائية $T_2 = 87^\circ C$،
الضغط الابتدائي $P_1 = 300\ kPa$،

العلاقات: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ ،

الحل: التحويل من الدرجة المئوية إلى الكلفن: $T_1 = 37 + 273 = 310\ K$

$T_2 = 87 + 273 = 360\ K$

تطبيق قانون جاي لوساك: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \Rightarrow \frac{300}{310} = \frac{P_2}{360}$

$P_2 = \boxed{348\ kPa}$

الغاز المثالي

يعتمد فهمنا الحديث للغازات على الغاز المثالي. **الغاز المثالي Ideal gas** هو شكل تخيّلي للمادة يساعدنا على فهم السلوك الحقيقي للغازات. خصائص الغاز المثالي هي:

- يتكون من جسيمات صغيرة تتحرك بشكل عشوائي، ولها كتلة، وحجمها مهمل مقارنة بحجم الوعاء الموجودة فيه.
- تتفاعل هذه الجسيمات فقط من خلال التصادمات المرنة الكلية التي تتبادل فيها الطاقة وكمية الحركة فيما بينها، وبينها وبين الجدران التي تحصر الغاز.
- لا توجد قوى بين جزيئات الغاز المثالي إلا أثناء التصادم.
- زمن التصادم صغير جدا بالمقارنة مع الفترات الزمنية بين التصادمات. من الناحية العملية، ذرات الغاز صغيرة جدًا، ما يسمح للغازات الحقيقية أن تتصرّف مثل الغازات المثالية عند ضغوط منخفضة (مثل 1 ضغط جوي) وعند درجات حرارة أعلى بكثير من نقطة غليان المادة.

قانون الغاز المثالي

تم اكتشاف قانون بويل وقانون شارل وقانون جاي لوساك تجريبيًا. يصف كل من هذه القوانين العلاقات بين كميتين قابلتين للقياس مع ثبات الكمية الثالثة. إذا قمنا بدمج القوانين الثلاثة، فسنتهي بقانون الغاز المثالي. من الناحية الحسابية، يعطينا الجمع بين القوانين الثلاثة ما يأتي:

تجريبيًا، لوحظ أن الثابت في هذه الحالة يساوي حاصل ضرب عدد مولات الغاز n وثابت الغاز المثالي R، أي $n \times R$.

ثابت الغاز المثالي هو ثابت عالمي قيمته: $R = 8.31\ \text{JK}^{-1}\,\text{mol}^{-1}$، بالتعويض عن الثابت، نحصل على المعادلة 4-9 كقانون الغاز المثالي:

$$\frac{PV}{T} = \text{ثابت}$$

10-4 قانون الغاز المثالي

$$PV = nRT$$

P	الضغط (Pa أو N/m^2)
V	الحجم (m^3)
n	عدد مولات الغاز
R	ثابت الغاز = $8.371\ \text{JK}^{-1}\,\text{mol}^{-1}$
T	درجة الحرارة (K)

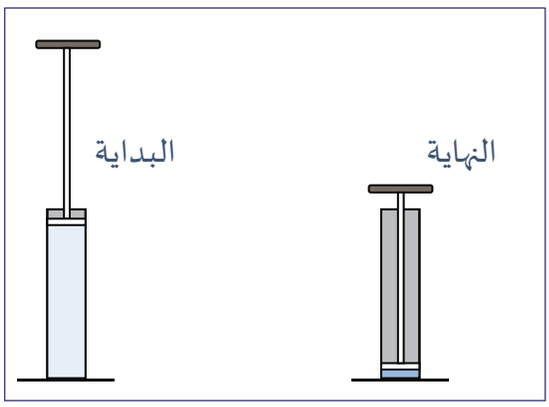
حل أسئلة قانون الغاز المثالي

عندما يتغيّر كل من الضغط والحجم ودرجة الحرارة، فإن قانون الغاز المثالي يمكن استخدامه وفق الصيغة:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

مثال 11

تحتوي مضخّة الدراجة الهوائية على $8 \times 10^{-4}\,m^3$ من الغاز. ضُغِطَ الغاز حتى وصل حجمه إلى $8 \times 10^{-5}\,m^3$ بعد أن ازداد الضغط من 101kPa إلى 1100 kPa. إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 20°C، فما هي درجة الحرارة النهائية؟ وكم يبلغ عدد مولات الغاز الموجودة في المضخّة؟



الشكل 4-30 مضخة دراجة هوائيّة.

المطلوب: درجة الحرارة النهائية T_2،

المُعطيات:
درجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 20^\circ C$،
الحجم الابتدائي $V_1 = 8 \times 10^{-4}\,m^3$،
الضغط الابتدائي $P_1 = 101\,kPa$،
الحجم النهائي $V_2 = 8 \times 10^{-5}\,m^3$،
الضغط النهائي $P_2 = 1{,}100\,kPa$،

العلاقات:
$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$ ،

$PV = nRT$،

الحل:
نُحوّل من الدرجة المئوية إلى الكلفن: $T_1 = 20 + 273 = 293\,K$

نستخدم قانون الغاز المثالي:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

$$\frac{(101\times10^3)(8\times10^{-4})}{293} = \frac{(1{,}100\times10^3)(8\times10^{-5})}{T_2}$$

$$T_2 = \boxed{319\ K}$$

لحساب عدد المولات: $PV = nRT$.

$$(1{,}100\times10^3)(8\times10^{-5}) = n(8.31)(319)$$

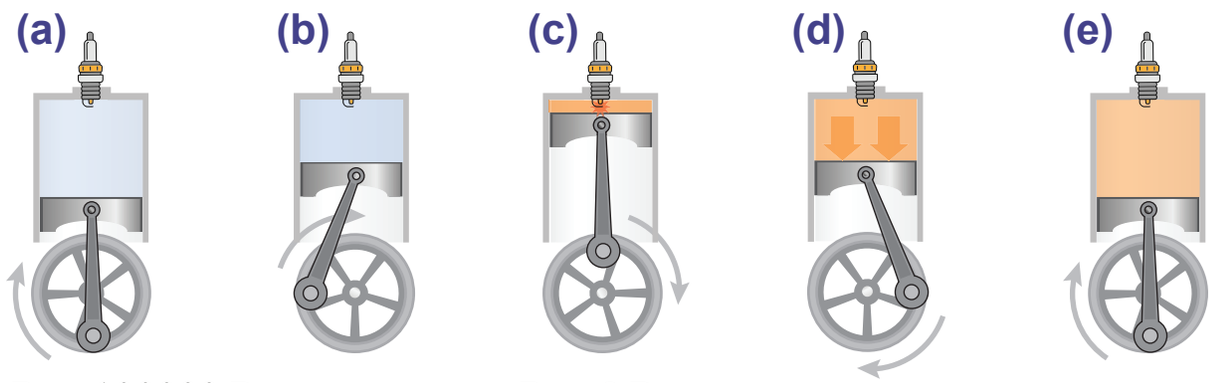
$$n = \boxed{0.033\ moles}$$

مثال 12

يُزوّد محرك السيارة بمكبس يضغط حجم الغاز في الأسطوانة كما في **الشكل 4-31 a**. عندما يصل المكبس المتحرك إلى أقصى ارتفاع، تقوم شمعة الإشعال بإحداث شرر يؤدي إلى إشعال الغاز الناتج من مزيج الهواء وبخار الوقود كما في **الشكل 4-31 c**. يؤدي ذلك إلى ارتفاع كبير ومفاجئ في درجة حرارة الخليط وضغطه. يؤدي الضغط الكبير إلى تمدد الغاز في الأسطوانة وينتج القوة المطلوبة من المحرّك (**الشكل 4-31 d**). يمكننا إهمال كمية الوقود القليلة واعتبار الغاز هو الهواء فقط.

a. إحسب أقصى قيمة لضغط الغاز خلال دورة المحرّك.

b. احسب ضغط الغاز عند النقطة e بافتراض أن درجة الحرارة تبقى ثابتة بين (c) و (e).



$P_1 = 100000$ Pa
$V_1 = 5.0 \times 10^{-4}$ m^3
$T_1 = 30$°C

$P_2 = ?$ Pa
$V_2 = 5.5 \times 10^{-5}$ m^3
$T_2 = 2100$°C

الشكل 4-31 دورة محرك سيارة نموذجي .

المطلوب: الضغط النهائي عند (c) و (e)

المُعطيات: $T_1 = 30°C, V_1 = 5.0 \times 10^{-4}$ m^3, $P_1 = 100$ kPa, $Vc = 5.5 \times 10^{-5}$ m^3

العلاقات: PV = nRt،

الحل: نُحوّل من الدرجة المئوية إلى الكلفن:

$T_1 = 30 + 273 = 303K, T_2 = 2100 + 273 = 2373K$

كمية الغاز تبقى ثابتة

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

(a) $$P_c = \frac{P_aV_aT_c}{T_aV_c} = \frac{(100000)(5.0 \times 10^{-4})(2373)}{(303)(5.5 \times 10^{-5})} = \begin{matrix} 7\ 120\ 000 \text{ Pa} \\ = 71.2 \text{ atm} \end{matrix}$$

(b) $$P_e = \frac{P_cV_c}{V_e} = \frac{(7120000)(5.5 \times 10^{-5})}{(5.0 \times 10^{-4})} = \begin{matrix} 783\ 200 \text{ Pa} \\ = 7.83 \text{ atm} \end{matrix}$$

نشاط 4-2 الغاز المثالي

سؤال الاستقصاء	ما العلاقة التي تربط الضغط والحجم ودرجة حرارة الغاز؟
الموادّ المطلوبة	الوصول إلى محاكاة الكمبيوتر.

الخطوات

1. أدخل القيم في أي من مربعات النص لتشغيل المحاكاة. (**الشكل 4-32**)
2. درجة الحرارة والحجم والضغط محدّدة بخصائص واقعية للمواد.

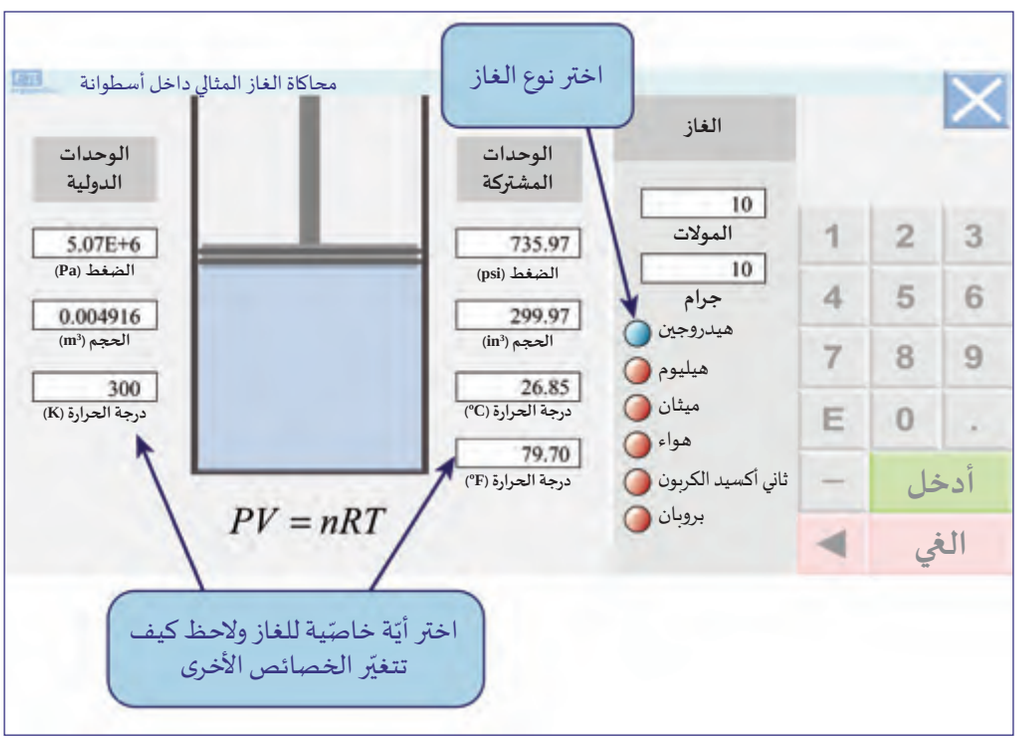
أسئلة

a. ما هو الحجم الذي يشغله 1 mole من الهواء عند 101.325 Pa و 0°C ؟ قارن بين هذا الحجم وحجم الغازات الأخرى عند الشروط ذاتها.

b. يتغير ضغط هواء الإطارات عندما تتغير درجة الحرارة. افترض أن ضغط الإطار قد ارتفع إلى 220632 Pa عند 20°C. كم يصبح الضغط إذا انخفضت درجة الحرارة إلى -20°C؟

c. إذا استخدم الإطار نفسه في القيادة على الطريق الصحراوي ، فكيف يتغير الضغط؟ قدر ضغط المقياس مع التعليل.

d. كيف يتغيّر الضغط إذا تمت مضاعفة كمية الغاز عند درجة حرارة وحجم ثابتين؟



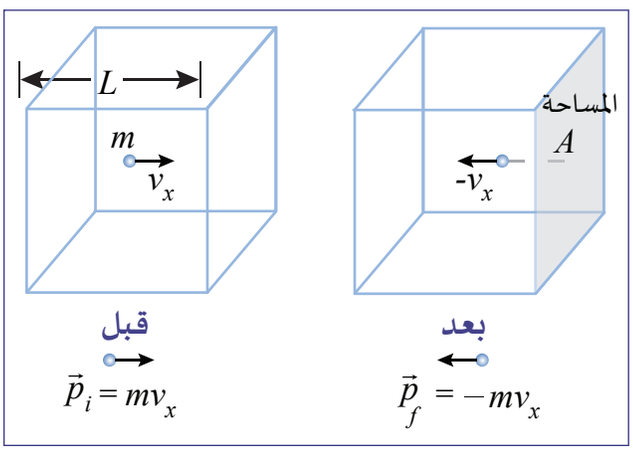
الشكل 4-32 محاكاة غاز مثالي.

النظرية الحركية وقانون الغاز المثالي

يمثل قانون الغاز المثالي الصلة بين الحركات المجهرية للجسيمات في الغاز وكمياتها التي يمكن معاينتها وقياسها في المختبر، مثل درجة الحرارة والضغط. لفهم كيفية الحصول بدقّة على معادلة الغاز المثالي، نحتاج إلى تحديد متوسط الضغط على جدران الوعاء والناتج عن تصادم جزيئات الغاز.

الضغط الناتج عن جزيء غاز واحد في وعاء

تخيّل جسيمًا يتحرك بسرعة متجهة v_x في الاتجاه x في صندوق طوله L كما في **الشكل 4-33**. سيصطدم الجسيم بالسطح الداخلي للصندوق ومساحته A، ويرتد بسرعة $-v_x$. الضغط هو القوة مقسومة على المساحة، أمّا القوة فهي معدل التغيير في كمية الحركة $F=\Delta p/\Delta t$. بعد التصادم بالجدار، يكون التغير في كمية الحركة: $\Delta p = -mv_x - mv_x = -2mv_x$.



الشكل 4-33 كمية الحركة لجسيم في صندوق.

ينتقل الجسيم ذهابًا وإيابًا مسافة $2L$ بين تصادمين مع الجدار الأيمن. الوقت المستغرق لاجتياز المسافة $2L$ هو $\Delta t = 2L/v_x$. لذلك، يكون متوسط القوة:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-2mv_x}{\left(\frac{2L}{v_x}\right)} = -\frac{mv_x^2}{L}$$

الإشارة السالبة سببها أن القوة على الجسيم تغير اتجاه كمية حركته. ولحساب الضغط على الحائط نحتاج إلى أن تكون قوة رد الفعل موجبة على الحائط. معدل الضغط يأتي من هذه القوة الموجبة مقسومة على مساحة الحائط A:

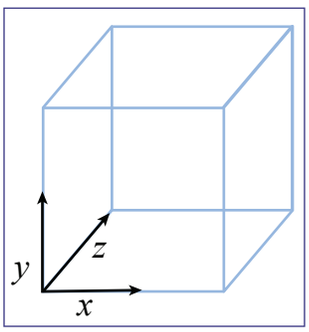
$$P = \frac{F}{A} = \frac{mv_x^2 / L}{A} = \frac{mv_x^2}{A \times L} = \frac{mv_x^2}{V} \Rightarrow PV = mv_x^2$$

يمكن استخدام الحجم $V = A \times L$. نلاحظ أن PV تؤدي لحساب الطاقة الحركية للجزيء في الاتجاه x.

PV هي الطاقة الحركية لجسيم يتحرك في الاتجاه x.

الضغط الناتج من عدة جسيمات من الغاز

لقد حسبنا العلاقة $P \times V$ الناتجة عن جسيم غاز واحد فقط يتحرك في الاتجاه x. في الواقع، هناك جزيئات غاز متعددة في الوعاء، وهذه الجسيمات تتحرك في اتجاهات عشوائية.



الشكل 4-34 الاتجاهات x و y و z في صندوق.

نلاحظ الصندوق في **الشكل 4-34**. لا يوجد اتجاه يتميز عن آخر في هذا الصندوق. متوسط السرعات في اتجاهات x و y و z متساوية. ونعبّر عن ذلك رياضيًا بـ: $v_x^2 = v_y^2 = v_z^2$، فيكون مربع السرعة الكلية للجسيم:

$$c^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

متوسط مركبات السرعة في جميع الاتجاهات متساوية، لذلك، يمكننا استخدام: $c^2 = 3v_x^2$.

لقد تم اشتقاق متوسط مربع السرعة لجسيم واحد من جسيمات الغاز. أما عند حساب متوسط مربع السرعة لعدد من الجسيمات فسنحصل على:

$$\overline{c^2} = 3\overline{v_x^2}$$

أو

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{c^2}$$

ولعدد N من الجسيمات، يعطى حاصل ضرب PV **بالمعادلة 4-11** وهو شكل آخر من قانون الغاز المثالي.

11-4 قانون الغاز المثالي

$$PV = \frac{1}{3}Nm\overline{c^2}$$

P	الضغط (Pa أو N/m^2)
V	الحجم (m^3)
N	عدد جسيمات الغاز
m	الكتلة (kg)
c^2	متوسط مربع سرعة جزيء الغاز (m/s)

الهيليوم

الهيليوم هو الغاز الأقرب إلى الغاز المثالي. جزيئات الهيليوم صغيرة لأنه غاز أحادي الذرة. القوى الذرية بين ذرات الهيليوم صغيرة جدًا، ما يسمح له بالبقاء في الحالة الغازية حتى عند درجات حرارة منخفضة للغاية وعند ضغط مرتفع. هذه المسافة بين الذرات هي التي تسمح للهيليوم بأن يكون أقل كثافة ومثاليًا للبالونات (**الشكل 4-35**).

الشكل 4-35 كبر المسافة بين ذرات الهيليوم تجعله أقل كثافة.

الطاقة الحركية للغاز المثالي

يمكن الحصول على متوسط الطاقة الحركية للغاز المثالي باستخدام قانون الغاز المثالي. شكلا قانون الغاز المثالي هما:

$$PV = \frac{1}{3}Nm\overline{c^2}$$

$$PV = nRT$$

المعادلتان تعطينا: $\frac{1}{3}Nm\overline{c^2} = nRT$

عدد المولات n يساوي عدد الجسيمات مقسومًا على عدد افوجادرو (6.022×10^{23} /mol)،

أي $n = \frac{N}{N_A}$. بتعويض n وضرب المعادلة السابقة بـ $\frac{3}{2}$ نحصل على:

$$\frac{3}{2}\left(\frac{1}{3}Nm\overline{c^2}\right) = \frac{3}{2}\frac{NRT}{N_A}$$

حيث R وN_A ثابتان. وحاصل القسمة $\frac{R}{N_A}$ يساوي 1.38×10^{-23} J/K ويعرف **بثابت بولتزمان** k_B **Boltzmann constant**. ويمكن تلخيص المعادلة السابقة لتصبح:

$$\frac{1}{2}m\overline{c^2} = \frac{3}{2}k_BT$$

$\frac{1}{2}m\overline{c^2}$ يساوي متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز. يمكن أن نلاحظ أنه، مع زيادة درجة الحرارة المطلقة للغاز، فإن متوسط الطاقة الحركية للجزيئات تزداد. هذا هو السبب في أن متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز يعرف أيضًا بالطاقة الحرارية للغاز، ويمكن كتابتها كما في **المعادلة 4-12**.

12-4	**متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز**	E_K	متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز (J)
$E_K = \frac{3}{2}k_BT$		k_B	ثابت بولتزمان = (1.38×10^{-23} J/K)
		T	درجة الحرارة المطلقة (K)

لا يعتمد متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز على نوع الغاز، ولكن على درجة الحرارة المطلقة فقط. ومع ذلك، فإن السرعة المتوسطة للجسيم تعتمد على كتلة الجزيء. على سبيل المثال، عند 293 K يتساوى متوسط الطاقة الحركية لذرات الأرجون وذرات الهيليوم حيث كل منهما 6.00651×10^{-21} J. أمّا السرعة المتوسطة لذرة الأرجون عند 293 K فهي 427 m/s والسرعة المتوسطة لذرة الهيليوم عند 293 K هي 1351 m/s.

مثال 13

a. احسب الطاقة الحركية المتوسطة لذرة غاز عند 15°C.

b. ما السرعة المتوسطة لذرات الهيليوم عند درجة الحرارة هذه؟

المطلوب: **a.** الطاقة الحركية المتوسطة E_k،

b. السرعة المتوسّطة لذرّات الهيليوم c،

المُعطيات: درجة الحرارة $T = 15°C$،

العلاقات: $E_K = \frac{3}{2}k_BT = \frac{1}{2}m\overline{c^2}$،

الحل:

a. نحوّل درجة الحرارة للكلفن: $T = 15 + 273 = 288\ K$

لحساب الطاقة الحركية:

$$E_K = \frac{3}{2}k_BT = \frac{3}{2}\left(1.38\times10^{-23}\right)(288)$$

$$= \boxed{5.96\times10^{-21}\ J}$$

b. لحساب السرعة المتوسطة لذرات الهيليوم، علينا حساب كتلة ذرة هيليوم واحدة.

باستخدام الجدول الدوري، يكمن إيجاد كتلة مول واحد من الهيليوم وهي 0.004 kg. يمكن الحصول على كتلة ذرة واحدة بقسمة كتلة المول على عدد أفوكادرو N_A وهو عدد الذرات في المول الواحد.

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{0.004}{6.022\times10^{23}} = 6.64\times10^{-27}\ kg$$

ولحساب السرعة المتوسطة لذرة الهيليوم:

$$E_K = \frac{1}{2}m\overline{c^2}$$

$$5.96\times10^{-21}\ J = \frac{1}{2}\left(6.64\times10^{-27}\right)\overline{c^2}$$

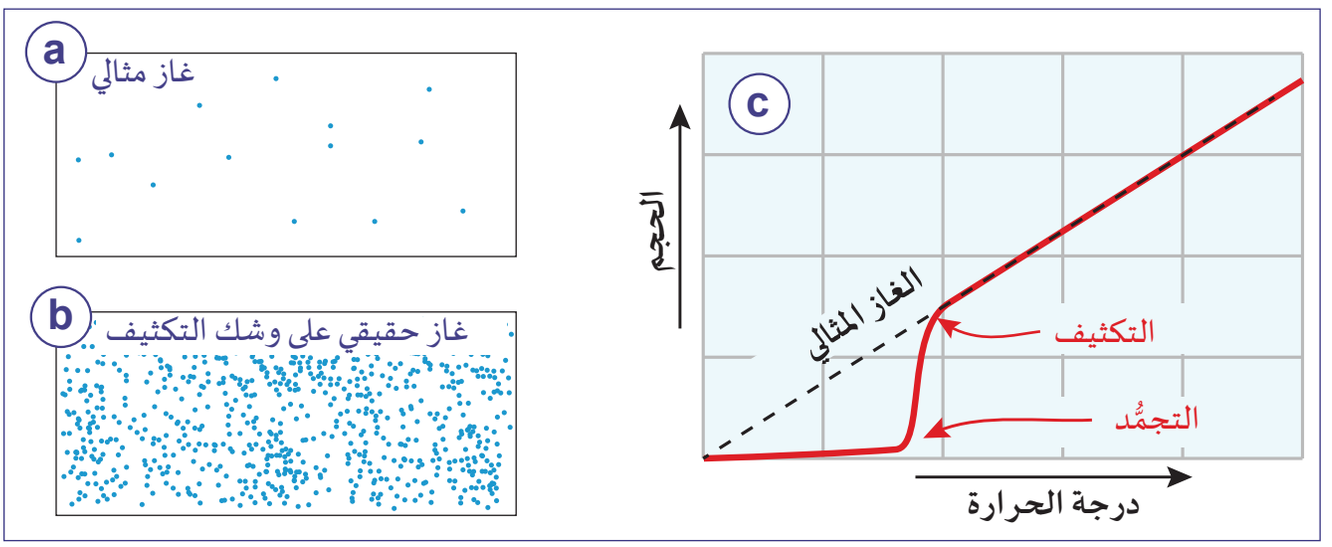
$$\overline{c^2} = 1{,}795{,}181$$

$$\boxed{c = 1{,}339\ m/s}$$

الغازات الحقيقية تتكثف وتتحول إلى سائل

تتبع الغازات المثالية قانون الغاز المثالي في جميع الحالات. يعني ذلك أن الغاز المثالي لايمكن أن يتكثف ويتحول إلى سائل. ولأن الغازات الحقيقية تتبع سلوك الغاز المثالي عند درجات الحرارة المرتفعة والضغط المنخفض، فإن قانون الغاز المثالي يصح عند درجات حرارة تفوق درجة حرارة الغليان بكثير.

الغازات الحقيقية، كالهواء عند درجة حرارة الغرفة، تتبع قانون الغاز المثالي أيضًا. ذلك لأن متوسط المسافة بين جزيئات الهواء يكون أكبر من حجم الذرة بمعامل يصل إلى 25 أو 30 مرّة (**الشكل 4-36 a**)



الشكل 4-36 التكثيف هو سلوك غير مثالي للغازات الحقيقية.

عندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون نقطة الغليان تتكثف جزئيات الغاز ويتحول إلى سائل. تكون الطاقة الحركية لجزيئات السائل منخفضة جدًا بحيث لا تستطيع التغلب على القوى التي تجذب الجزيئات معًا. تصبح الجزيئات قريبة من بعضها البعض ليتكوّن السائل (**الشكل 4-36 b**). يوضح الرسم البياني في **الشكل 4-36 c** كيف يؤدي التكثيف إلى انحراف عن الغاز المثالي.

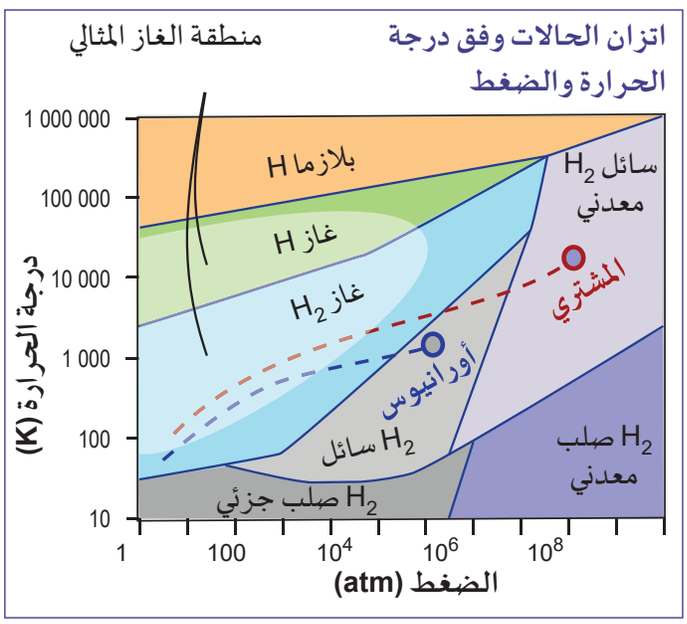
تستخدم التكنولوجيا البشرية تكثيف الغازات في الكثير من التطبيقات. يوضح **الشكل 4-37** النيتروجين السائل. تبلغ درجة حرارة غليان النيتروجين السائل 77 K (-196°C). تستخدم درجة الحرارة المنخفضة هذه لتبريد الأسماك الطازجة بسرعة، حيث تتجمّد على الفور. كما أنها تستخدم لسحب الطاقة الحرارية من المغناطيسات الكهربائية في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي ومفاعلات الاندماج.

الشكل 4-37 النيتروجين السائل.

سلوك الغازات عند ضغط مرتفع

يكون حجم الجسيمات في الغاز المثالي صفرا. يصح هذا التقريب عندما تكون الجزيئات بعيدة جدًا عن بعضها البعض بحيث يمكن إهمال حجمها. أما عند الضغط المرتفع فإن الجسيمات تنضغط وتصبح قريبة من بعضها البعض ولا يخضع الغاز عندها لشروط الغاز المثالي. فالهواء عند درجة حرارة الغرفة يمكن أن يصبح سائلًا، وربما صلبًا، عند ضغط مرتفع جدًا. يمكن للأجسام الحقيقية أن تغير حالتها عند تغيّر درجة الحرارة والضغط.

يظهر **الشكل 4-38** كيف يؤثر تغير كل من الضغط ودرجة الحرارة في حالة الهيدروجين. عند ضغط 1 atm، يكون الهيدروجين غازًا مثاليًا بين 80 K و 50000 K. أما عند ضغط يفوق 10^6 atm لا يكون الهيدروجين مثاليا عند أي درجة حرارة. أما عند مراكز الكوكبين الغازيين أورانيوس والمشتري، فإن الضغط يكون كبيرا جدًا بحيث يتحول الهيدروجين إلى سائل معدني.



الشكل 4-38 مخطط اتزان الحالات للهيدروجين

التبريد

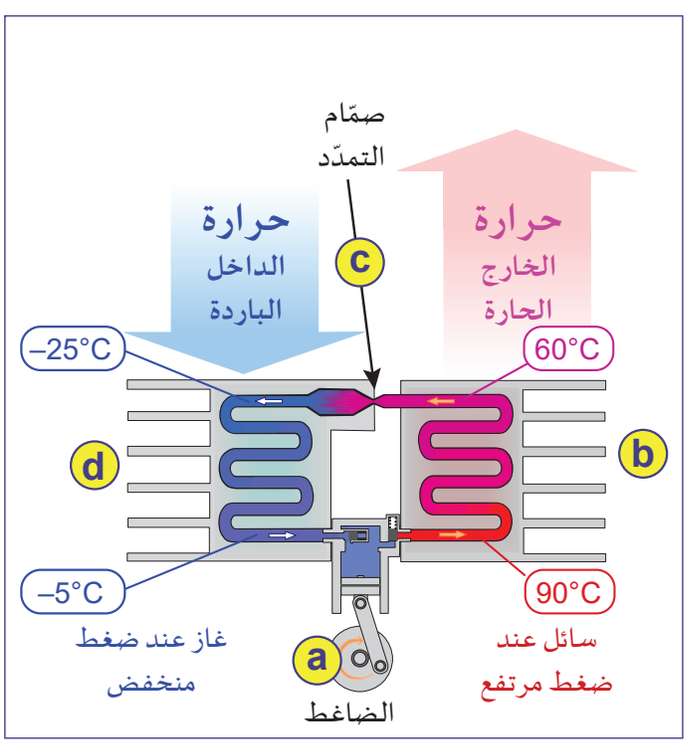
يصعب تخيّل الحياة في قطر من دون أجهزة تكييف. يظهر **الشكل 4-39** كيف يساهم تغير الحالة بين الغاز والسائل في عمل جهاز التكييف.

a. يرفع الضاغط ضغط الغاز البارد فيحوّله إلى سائل حار.

b. يبرد السائل الحار بعد أن يطرد الحرارة إلى الخارج.

c. يتمدد السائل في صمام التمدد فيتحول إلى غاز بارد عند درجة حرارة -25°C.

d. يمتص الغاز البارد الحرارة من المقصورة الداخلية ويعود إلى الضاغط.



الشكل 4-39 دورة المكيّف.

تقويم الدرس 4-2

1. الضغط المطلق لكمية معينة من الغاز يبلغ 250000 Pa عند 20°C . كم يصبح الضغط إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 1000°C وبقي الحجم ثابتًا؟

2. افترض وجود كمية من غاز مثالي عند درجة حرارة 27°C
   a. إذا تم تسخين الغاز بمقدار 1 درجة مئوية عند ضغط ثابت، فبأيّ عامل سيتغير حجمه؟
   b. إذا بقي الحجم ثابتًا أثناء تبريد الغاز بمقدار 1 درجة مئوية بدءًا من 27°C، فبأيّ عامل سيتغير ضغطه؟
   c. إذا بقيت درجة حرارة الغاز ثابتة وقد تمدد حجمه بنسبة 1%، فبكم سيتغير ضغطه؟

3. يبلغ حجم إطار السيارة 10 L، ويتم نفخه ليصبح مقياس ضغطه 207000 Pa عند 20°C. كم عدد مولات الهواء داخل الإطار؟

4. كم يبلغ عدد مولات الغاز الموجودة في حاوية حجمها $0.025\ m^3$، عند درجة حرارة 320 K وضغط 480000 Pa؟

5. زيادة درجة الحرارة المطلقة للغاز تزيد من السرعة المتوسطة لجزيئاته. إذا تمت مضاعفة درجة الحرارة المطلقة، فما هو عامل ازدياد السرعة المتوسطة لجزيئات الغاز؟

6. وعاء يحتوي على 2 mole من النيتروجين عند درجة حرارة 0 مئوية وضغط 100000 Pa. احسب كتلة النيتروجين وحجمه في الوعاء. (الكتلة المولية للنيتروجين 28 g/mol).

7. اشرح، باستخدام الحجم الجزيئي والقوى بين الجزيئات، كيف أن سلوك الغازات الحقيقية ينحرف عن النموذج المثالي عند قيم ضغط عالية ودرجات حرارة منخفضة.

8. يبلغ حجم الهواء داخل إطار السيارة $0.015\ m^3$ عند 273 K وضغط 250,000 Pa.
   a. بعد قيادة السيارة ، ازداد ضغط الهواء داخل الإطار . اشرح سبب حدوث ذلك.
   b. ما الضغط الجديد للإطار إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 308 k وتمدد الحجم إلى $0.016\ m^3$ بعد قيادة السيارة لبعض الوقت.

ضوء على العلماء

روبرت بويل: 1627-1691

الشكل 4-40 روبرت بويل.

اشتهر العالم الإنجليزي-الأيرلندي روبرت بويل في مجالات الفلسفة والفيزياء والكيمياء. كان واحدًا من أوائل العلماء في منتصف القرن السابع عشر الذين نشروا علومهم ولم يتركوها مخفيّة، في وقت كان فيه معظم المكتشفين والعلماء يخفون علومهم واكتشافاتهم عن الناس. نهج بويل المختلف دفع علماء آخرين للتقدم في عملهم.

ولد روبرت بويل في إيرلندا في العام 1627 لأسرة بريطانية ثرية. انضم بويل إلى كلية إيتون المرموقة في سن الثامنة وتفوق في دراسته. ذهب في جولة أوروبية مع معلمه في العام 1639، وانتهى به الأمر إلى البقاء في سويسرا لمدة 5 سنوات. عاد بويل إلى إنجلترا في العام 1644 وبدأ بالكتابة في العام 1649، فاهتم في البداية بالعلوم التجريبية. سافر أيضًا إلى إيرلندا للاعتناء بأرضه الموروثة، حيث بدأ هناك في دراسة علم التشريح. وبحلول العام 1654، دُعي إلى أكسفورد حيث التقى بعدد من العلماء البارزين، وشكّل «نادي الفلسفة التجريبي» مع جون ويلكنز وكريستوفر ورين وجون لوك.

عمل روبرت بويل أيضًا مع روبرت هوك في أكسفورد وقام ببناء مضخّة هواء تم استخدامها في اكتشافات تتعلق بضغط الهواء والتفريغ. ما نعرفه الآن باسم «قانون بويل» تم اكتشافه أيضًا بمساعدة روبرت هوك. ساهم روبرت بويل في علوم الكيمياء أيضًا، وقد أصدر نشرات علمية حول تكوين المادة. وبسبب تأييده لاستخدام الكيمياء في الطب والعالم الطبيعي حصل على لقب «والد الكيمياء». أمضى بويل السنين الثلاث والعشرين الأخيرة من حياته في لندن مع أخته حيث أنشأ مختبرًا واستمر في العمل هناك ونشر الكثير من الكتب. كان روبرت بويل أحد العلماء القلائل المعروفين على نطاق واسع في عصره. توفي بويل في العام 1691 في لندن بعد فترة من المرض.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 4-1: ديناميكيا الموائع

- **الموائع** هو الاسم الذي يطلق على حالات المادة التي تتدفق. وهذا يشمل السوائل والغازات والبلازما.
- **الغازات** هي موائع قابلة للانضغاط ، لأن ذرات الغاز أو جزيئاته تتقارب عند تعرّضها للضغط.
- **السوائل** هي موائع غير قابلة للانضغاط لأن تأثير الضغط في جزيئات السائل يكاد يكون معدومًا.
- عند مرور الموائع غير القابلة للانضغاط عبر مساحات مختلفة يبقى **معدل تدفقها** هو نفسه.
- **معادلة الاستمرارية** تسمح لنا بحساب سرعة الموائع غير القابلة للانضغاط أثناء مرورها عبر مساحات مختلفة.
- تُستخدم **معادلة برنولي** لشرح تأثير الموائع. وتتعلق المعادلة بالضغط والحجم والارتفاع في سائل متحرك.
- توضح **خطوط الانسياب** كيفية تدفق الموائع حول أسطح أشياء مثل المركبات والطائرات. يتم رسم هذه الخطوط بطريقة تجعلها متوازية مع تدفق المائع.

الدرس 4-2: الغاز المثالي

- لحساب **الضغط المطلق**، أضف قراءة مقياس الضغط إلى الضغط الجوي.
- يصف **قانون بويل** العلاقة بين ضغط وحجم الغاز المثالي بأنها علاقة تناسب عكسي عندما تظل درجة الحرارة ثابتة.
- يصف **قانون شارل** العلاقة بين حجم و درجة حرارة الغاز المثالي بأنها علاقة تناسب طردي عند الحفاظ على ضغط ثابت.
- يصف **قانون جاي لوساك** العلاقة بين ضغط و درجة الحرارة المطلقة لغاز مثالي بأنها علاقة تناسب طردي عند حجم ثابت.
- **الغاز المثالي** هو شكل تخيلي للمادة يتكون من جسيمات ذات كتلة تتحرك بشكل عشوائي ولكن حجمها يكون صفرًا.
- **قانون الغاز المثالي** يجمع العلاقات بين ضغط ودرجة حرارة وحجم الغاز المثالي.
- **ثابت الغاز المثالي** قيمته $R = 8.31\ \text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ويستخدم لتحديد كميات الغاز المثالي.
- **ثابت بولتزمان** قيمته $k_B = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$ ويربط الطاقة الحركية المتوسطة لجسيم الغاز بدرجة الحرارة.

اختيار من مُتعدِّد

1. أيُّ من الكميات الآتية تكون غير ثابتة عند تدفق مائع غير قابل للانضغاط في أنبوبه لها مساحات مقطع مختلفة؟
   a. الكتلة
   b. الحجم
   c. السرعة
   d. معدل التدفق

2. ما الذي توضحه معادلة برنولي رياضيًا؟
   a. سبب ثبات الضغط في جميع أنحاء المائع.
   b. سبب عدم ارتباط الضغط بسرعة انسياب المائع.
   c. سبب انخفاض الضغط مع زيادة سرعة انسياب المائع.
   d. سبب ازدياد الضغط مع زيادة سرعة انسياب المائع.

3. وفقًا لمعادلة برنولي، أي مما يأتي يجب أن يحدث عندما تمر شاحنة كبيرة بجانب سيارة على الطريق السريع؟
   a. ينخفض الضغط بينهما، فتبتعد السيارة قليلًا عن الشاحنة.
   b. يزداد الضغط بينهما، فتبتعد السيارة قليلًا عن الشاحنة.
   c. ينخفض الضغط بينهما، فتقترب السيارة قليلًا من الشاحنة.
   d. يزداد الضغط بينهما، فتقترب السيارة قليلًا من الشاحنة.

4. يتدفق الماء عبر أنبوب قطره 7 m بسرعة 8 m/s، ويتدفق الزيت عبر أنبوب مربع المقطع تبلغ مساحته $1\ m^2$ بسرعة 5 m/s. في أي من الأنبوبين يكون معدل التدفق الحجمي أعلى؟
   a. أنبوب الزيت
   b. انبوب الماء
   c. كلا الأنبوبين لهما معدل التدفق نفسه.
   d. هناك حاجة إلى مزيد من المعلومات للإجابة على هذا السؤال.

5. يقوم الطالب بتسخين وعاء صلب يحتوي على غاز مثالي، حيث رفع درجة حرارته من 50°C إلى 100°C. أية عبارة تصف تغيّر الضغط بدقة؟
   a. يتضاعف ضغط الغاز.
   b. ينخفض ضغط الغاز إلى النصف.
   c. يصبح ضغط الغاز أكثر من الضعفين.
   d. يزداد ضغط الغاز بعامل يقع بين 1 و 2.

6. ما الذي يحدث إذا ارتفعت درجة الحرارة في كمية ثابتة من الغاز عند حجم ثابت؟
   a. ينخفض ضغط الغاز.
   b. يرتفع ضغط الغاز.
   c. يتكثف الغاز على شكل سائل.
   d. تنقسم جزيئات الغاز إلى ذرات منفصلة.

7. عندما يتم خفض حجم الغاز عند درجة حرارة ثابتة يزداد الضغط الذي يبذله الغاز على جدران الوعاء. لماذا يحدث ذلك؟
   a. يتم ضغط جزيئات الغاز.
   b. تتنافر جزيئات الغاز بقوة أكبر.
   c. تزداد السرعة المتوسطة لتصادمات جزيئات الغاز بجدران الوعاء.
   d. تزداد وتيرة التصادمات بين جزيئات الغاز وجدران الوعاء.

8. يؤدي تعديل حجم الغاز المثالي ودرجة حرارته إلى حدوث تغيير في ضغطه. أيٌّ من الحالات التالية ستؤدي دائمًا إلى زيادة الضغط؟
   a. زيادة الحجم وزيادة درجة الحرارة.
   b. زيادة الحجم وانخفاض درجة الحرارة.
   c. انخفاض الحجم وزيادة درجة الحرارة.
   d. انخفاض الحجم وانخفاض درجة الحرارة.

9. يحفظ غاز مثالي عند حجم ثابت ودرجة حرارة 300 K. كم تبلغ درجة حرارة الغاز إذا تضاعف ضغط الغاز وبقي حجمه ثابتًا؟
   a. 150 K
   b. 286.5 K
   c. 327 K
   d. 600 K

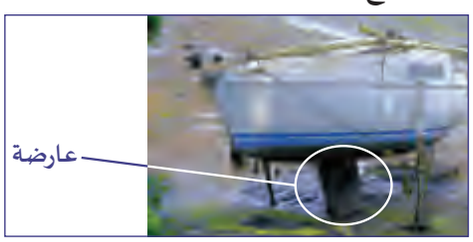
10. يتم ملء وعاءين متماثلين بـ 2 mole من الغاز لكل منهما. يحتوي الوعاء الأول على غاز CO_2 ويحتوي الوعاء الثاني على غاز H_2 عند درجة الحرارة الغرفة. ماذا يمكن أن نقول عن ضغط الغازين؟
   a. الضغط هو نفسه في الوعاءين.
   b. ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون يكون أعلى من ضغط غاز الهيدروجين.
   c. ضغط غاز الهيدروجين يكون أعلى من ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون.
   d. لا يمكن مقارنة ضغط الغازَيْن.

الدرس 4-1: ديناميكا الموائع

11. لماذا تكون سرعة المائع أكبر عندما تكون خطوط الانسياب متقاربة.

12. استنادًا إلى معادلة برنولي، صف الأشكال الثلاثة لطاقة المائع.

13. المراكب الشراعية لها عارضة في أسفلها كتلك الظاهرة في الشكل المجاور. ما الغرض من استخدامها بحسب معادلة برنولي؟



14. اثبت أن وحدة الضغط تساوي الطاقة لكل وحدة حجم.

15. يتدفق الماء عبر أنبوب تبلغ مساحة مقطعه العرضي $0.4\ m^2$، بسرعة $8\ m/s$. إذا انخفضت مساحة المقطع العرضي للأنبوب إلى $0.2\ m^2$ وازداد ارتفاع الأنبوب بمقدار $4\ m$، فاحسب السرعة الجديدة.

16. معدل تدفق الدم Q عبر أنبوب شعري نصف قطره $2 \times 10^{-6}\ m$ هو $3.8 \times 10^{-11}\ m^3/s$.

a. احسب سرعة تدفق الدم.

b. إذا كان الدم كله يمر عبر الشعيرات الدموية ، فكم عدد الشعيرات الدموية التي يجب أن تتوافر ليكون معدل التدفق $0.9\ m^3/s$؟

17.* مائع كثافته $1000\ kg/m^3$ يتدفق عبر أنبوبة بسرعة $5\ m/s$ وضغط $100000\ Pa$. تزداد سرعة المائع بعد ذلك إلى $10\ m/s$. احسب القيمة الجديدة لضغط المائع.

18.* يقوم طبيب بدراسة تدفق الدم عبر وعاء دموي يحتوي على جلطة دموية. هناك غازات مذابة في الدم مثل الأكسجين. هل سيرتفع ضغط الأكسجين في الدم أم ينخفض عندما يتدفق أثناء حدوث الجلطة؟ اشرح إجابتك

19.** يبلغ ضغط الماء عند نقطة توصيل خرطوم إطفاء الحريق $400\ kPa$ ($400000\ Pa$). ما هي أقصى سرعة لتدفق المياه من فوهة الخرطوم إذا كان الخرطوم أفقيًا؟ كثافة الماء $1000\ kg/m^3$.

20.* يتدفق الماء عبر أنبوب أفقي بمعدل $5 \times 10^{-3}\ m^3/s$. تبلغ مساحة المقطع العرضي عند مركز الأنبوب $2 \times 10^{-3}\ m^2$، وضغط الماء عنده $1.6 \times 10^5\ Pa$.

a. احسب سرعة تدفق الماء عند مركز الأنبوب.

b. ينخفض الضغط قرب نهاية الأنبوب إلى $1.2 \times 10^5\ Pa$. ما سرعة الماء عند هذه النقطة؟

c. ما هي مساحة المقطع العرضي للأنبوب بالقرب من نهايته؟

21. احسب صافي القوة المؤثرة في نافذة مساحتها $3\ m^2$ عندما تهب الرياح في الخارج باتجاه موازٍ للنافذة وبسرعة $20\ m/s$. لاحظ أن سرعة الرياح في الداخل هي $0\ m/s$. هل ترى أن هذا يشكل مشكلة لمهندسي البناء؟ لماذا؟ (افترض أن كثافة الهواء $1.29\ kg/m^3$).

الدرس 4-2: الغاز المثالي

22. تحت أية ظروف لا تنطبق معادلة الغاز المثالي، $PV = nRT$ على الغاز الحقيقي؟

23. وحدة قياس الضغط هي نيوتن لكل متر مربع (N/m^2) ووحدة قياس الحجم هي متر مكعب (m^3). ما هي وحدة قياس الضغط × الحجم؟ ما هي الكمية الفيزيائية التي لها وحدة القياس هذه؟

24. تم ملء وعاء ثابت الحجم بغاز عند درجة حرارة $37°C$ وضغط $300000\ Pa$، ثم سُخِّنَ الغاز إلى أن وصلت درجة حرارته إلى $87°C$. ما هو الضغط الجديد عند درجة الحرارة الجديدة؟

25. ما مقدار متوسط طاقة الحركة لكل ذرة من غاز الأرجون عند درجة حرارة $68°C$؟ هل من الضروري معرفة الكتلة الذرية للأرجون لحل هذا السؤال؟

26. بالون مملوء بـ $70\ kg$ من الهيليوم، حجمه $404\ m^3$ ودرجة حرارته $17°C$. كم يبلغ ضغط الغاز داخل هذا البالون؟

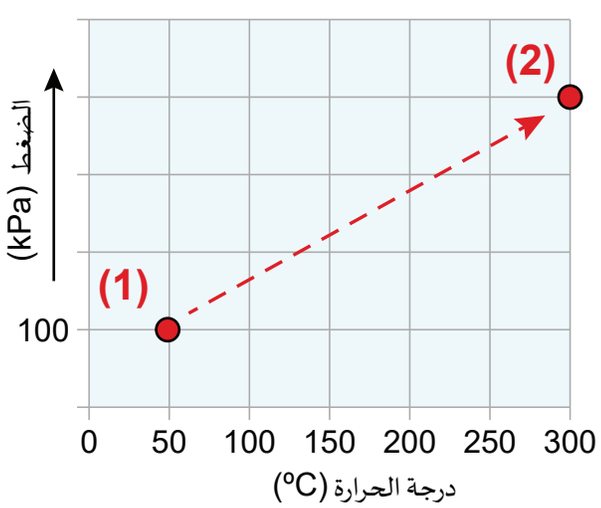
27. قارورة حجمها $7 \times 10^{-4}\ m^3$ مملوءة بغاز عند درجة حرارة $37°C$ وضغط $140.000\ Pa$.

a. كم يبلغ عدد مولات الغاز في القارورة؟

b. كم يبلغ عدد جزيئات الغاز في القارورة؟

c. احسب كتلة الغاز في القارورة إذا كانت الكتلة المولية $28\ g/mol$.

28. يظهر الشكل المجاور حالتين لكمية ثابتة من غاز مثالي عند حجم ثابت مقداره $1\ m^3$.



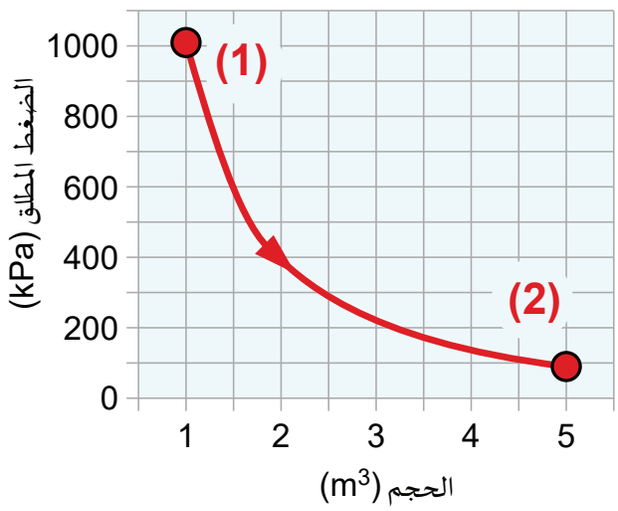
a. احسب درجة الحرارة المطلقة للغاز عند الحالة (1)

b. احسب عدد مولات الغاز.

c. ما الضغط المطلق للغاز عند الحالة (2)؟

d. ما القيمة التي يقرأها مقياس الضغط عند الحالة (2)؟

29. تتمدد كمية ثابتة من غاز مثالي بسرعة عند درجة حرارة 25°C وضغط 1000 kPa إلى الضغط الجوي العادي 100 kPa على المسار الموضح في الشكل المجاور. ما درجة الحرارة النهائية للغاز؟



30. ما هو تعريف درجة الحرارة والضغط المعياريين (STP)؟

العديد من الكميات الفيزيائية تُعطى قيمها عند درجة حرارة وضغط معياريين.

31. أُعطي طالب السؤال التالي:

" يكون الضغط داخل عجلة سيارة حسب مقياس الضغط 220 kPa. درجة حرارة الهواء داخل العجلة 30°C ، والحجم الداخلي للعجلة $0.05\ m^3$. ما عدد مولات الهواء داخل العجلة؟"

وكانت إجابة الطالب كما يلي:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(220000)(0.05)}{(8.371)(30)} = 43.8\ \text{mol}$$

a. حدّد أخطاء الطالب.

b. ما الإجابة الصحيحة؟

32. يزداد ضغط غاز مثالي ثابت الكتلة بمعامل 2 عندما ترتفع درجة حرارته من 30°C إلى 120°. ما هي نسبة التغير في حجم الغاز؟

33. يُحفظ غاز عند درجة حرارة 300 K. ما مقدار متوسط طاقة الحركة لجزيء الغاز؟

34. يُستخدَم ثاني أكسيد الكربون لملء خزان حجمه 12 L عند درجة حرارة 20°C وضغط 4 atm. ما هي كتلة ثاني أكسيد الكربون إذا كان الخزان ممتلئًا تمامًا. (سوف تحتاج إلى البحث عن الكتلة المولية لثاني أكسيد الكربون)

35. أثبت ان الجذر التربيعي لمتوسط مربع سرعة جزيء الغاز ذي الكتلة المولية M ودرجة الحرارة T هي:

$$c = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

36. احسب السرعة المتوسطة لذرات الأرجون الموجودة في المصباح الكهربائي إذا وصلت درجة حرارة المصباح إلى 2500 K.

37. ما هي السرعة المتوسطة لذرات الهيليوم عند درجة حرارة 850 K إذا كانت الكتلة المولية للهيليوم 4 g/mol.

38. يحتوي منطاد مراقبة متوسط الحجم ما يقرب من $200000\ ft^3$ من غاز الهليوم عند ضغط تقريبي 1.1 atm. ($1\ ft^3 = 0.0283\ m^3$) و ($1\ atm = 1.01 \times 10^5\ N/m^2$).

a. افترض أن درجة حرارة المنطاد 12°C. ما عدد مولات الهيليوم التي يحتويها المنطاد؟

b. ما كتلة هذه الكمية من الهيليوم؟

c. ما السرعة الحرارية المتوسطة لذرة الهيليوم عند 12°C؟

مسألة للبحث

تستخدم البخّاخات في كثير من عبوات الزجاج المختلفة، مثل زجاجات العطور ومواد التنظيف ودهان الطلاء وحقن الوقود. ابحث في عمل البخّاخة مستندًا في شرحك إلى مبدأ برنولي.

الشكروالتقدير

جميع الرسوم الفنّية الواردة في هذا العمل صمَّمتها شركة تطوير العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات (STEM) في الولايات المتَّحدة الأميركية. وهي وحدها تملك الحق القانوني لإجازة استخدام تلك الرسوم.

يشكر المؤلفون والناشرون المصادر الآتية على السماح لهم باستخدام ملكياتهم الفكرية كما أنهم ممتنون لهم لموافقتهم على نشر الصور.

RonnieChua/Shutterstock; Shyrochenko Aleksandr/Shutterstock; chrisdorney/Shutterstock; Bobx-73/ Shutterstock; Lipskiy/Shutterstock; Naskky/Shutterstock; SoleilC/Shutterstock; AlexandrN/Shutterstock; Martin Bergsma/Shutterstock; Toa55/Shutterstock; ShadeDesign/Shutterstock; Caterina Belova/Shutterstock; Pavol Kmeto/Shutterstock; A7880S/Shutterstock; Corund/Shutterstock; Shannon Serpette/Shutterstock; agsandrew/ Shutterstock; tankist276/Shutterstock; VectorPot/Shutterstock; Vector Tradition/Shutterstock; J10/Shutterstock; RomanVanur/Shutterstock; Garen Takessian/Shutterstock; Aldona Griskeviciene/Shutterstock; Fouad A Saad/ Shutterstock; hlphoto/Shutterstock; stockcreations/Shutterstock; MAHATHIR MOHD YASIN/Shutterstock; Konoplytska/Shutterstock; Eric Isselee/Shutterstock; Maksim Safaniuk/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Daniele Pietrobelli/Shutterstock; Tichr/Shutterstock; Vladislav Havrilov/Shutterstock; Olga Zinovskaya/ Shutterstock; Tatiana Foxy/Shutterstock; 3DSculptor/Shutterstock; Merlin74/Shutterstock; Eduard Kim/ Shutterstock; Vadim Sadovsky/Shutterstock; Janaka Dharmasena / Shutterstock; Nasky/ Shutterstock; adike/ Shutterstock; Richard Peterson/ Shutterstock; stihii/ Shutterstock; NoPainNoGain/ Shutterstock; Teguh Mujiono/ shutterstock; Improvisor/ Shutterstock; Jose Luis Calvo/ Shutterstock; Rattiya Thongdumhyu/ Shutterstock; Peter Hermes Furian/ Shutterstock; Sebastian Kaulitzki/ Shutterstock; VectorMine/ Shutterstock; bsd/ Shutterstock; Blamb/ Shutterstock; MikeMartin / Shutterstock; Photographee.eu/ Shutterstock; Jason Boyce/ Shutterstock; Maridav Eugene Onischenko/ Shutterstock; CI Photos/ Shutterstock; Sergey Nivens, Vasyl Shulga/ Shutterstock; Sea Wave, Tanya Sid/ Shutterstock; belushi/ Shutterstock; Birger Olovson, Dionisvera/ Shutterstock; sportpoint / Shutterstock; ChrisVanLennepPhoto, Jacob Lund, sattahipbeach,/Shutterstock; Catalin Grigoriu/ Shutterstock; Designua/Shutterstock; Andres Garcia Martin/Shutterstock; Cagla Acikgoz/ Victor Moussa/photoworld; Aleksey Gusev/Shutterstock; Designua/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; mapichai/Shutterstock; Kitnha/ Elena11 /Shutterstock; dlhca/Shutterstock; ShotStalker/Shutterstock; Sketchart/Shutterstock; tel52/Robert Adrian Hillman/ Shutterstock; rzarek/Imagine Photographer; Tomas Ragina/Shutterstock; Rainer Lesniewski/Shutterstock; Vixit/ Shutterstock; Fedor Selivanov/Shutterstock; Phil Emmerson /Shutterstock; stihii/Shutterstock; Fouad A. Saad/ Shutterstock; NASA images/Shutterstock; NickJulia/Shutterstock; ch123/Shutterstock; Cozine/ Suzanne Tucker/ Ayman Haykal /Shutterstock; Robert Adrian Hillman/Shutterstock; Sigur/ SUNISA DAENGAM/Shutterstock; Jeroen Mikkers/ Manamana /Shutterstock; duckeesue /Shutterstock; Thomas C. Altman /Shutterstock; Sara Winter /Shutterstock; MaraZe /Shutterstock; Adwo/ Tomowen Shutterstock; Rosalie Kreulen /Shutterstock; Daniel Carlson /Shutterstock; Filip Fuxa/ Fulcanelli/ Shutterstock; lembi /Shutterstock; stihii /Shutterstock; GracePhotos /Shutterstock; Mega Pixel Shutterstock; Justek16 /Shutterstock; Scottish Traveller /Shutterstock; Lori Bonati /Shutterstock; anek.soowannaphoom /Shutterstock; Lost_in_the_Midwest /Shutterstock; B Calkins / Shutterstock; AlexussK /Shutterstock; pablofdezr /Shutterstock; fischers /Shutterstock; corbac40 /Shutterstock; CROX /Shutterstock; Africa Studio /Shutterstock; Emre Terim /shutterstock; Volodymyr Goinyk /shutterstock; Johann Helgason /shutterstock; OSweetNature /shutterstock; Kathryn Snoek/ /shutterstock; Thomas C. Altman; MateusandOlivia /shutterstock; Designua /shutterstock; Rainer Lesniewski /shutterstock; Praveen Menon / shutterstock; Mark Hall /shutterstock; Konoplytska /shutterstock; Igor Alexsander /shutterstock; Zoom Team / shutterstock; Turkey Photo /shutterstock; Dexpixel /shutterstock; Dennis O&#39:Hara /shutterstock; Tetyana Dotsenko /shutterstock; Vadim Nefedoff /shutterstock; Designua /shutterstock; Sabelskaya /shutterstock; Rich Carey /shutterstock; Bill McKelvie/shutterstock; Andrey Burmakin/ kuruneko/ ZoranOrcik/shutterstock; Imagesines/ shutterstock; Diagram/shutterstock; HelloRF Zcool/ Andrey Burmakin/shutterstock; Alex Kravtsov/shutterstock; sirtravelalot/shutterstock; Suzanna Tucker/shutterstock; Graph/shutterstock; Gwoeii/shutterstock; Graph/ Oleksii Sidorov/shutterstock; sizov/ LUKinMEDIA/shutterstock; BUY THIS/shutterstock; Stock image/shutterstock; TLaoPhotography/shutterstock; TASER/shutterstock; Roger costa morera/shutterstock; Preto Perola/ HomeArt; topimages/NDT/KKulikov/shutterstock; OSTILL is Franck Camhi/ Wikipedia; Ljupco Smokovski/Alexander Kirch/Stefan Schurr/ Jonah_H/shutterstock; Brocreative/ Motion Arts; Dan Thornberg/shutterstock; faboi/ TASER; Miriam Doerr/shutterstock; Martin Frommherz/shutterstock; Bjoern Wylezich/shutterstock; Inna Bigun/ shutterstock; Steven_Mol/shutterstock; goffkein.pro/shutterstock; EugenePut/shutterstock; fotoliza/shutterstock; IDKFA/shutterstock; Yosanon Y/ VarnakovR/shutterstock; Rost9/shutterstock; Tyler Boyes/shutterstock; Dimarion/ shutterstock; Maridav/shutterstock; Dmitry Markov152/shutterstock; Charobnica/Shutterstock; Rvkamalov/ Shutterstock; Peter Hermes Furian/Shutterstock; Konstantinks/Shutterstock; Extender_01/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Miriam Doerr/Shutterstock; Martin Frommherz/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Orange Deer studio/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.;Olga Popova/Shutterstock; Pavel Sapozhnikov/ Shutterstock; VectorMine/Shutterstock; Paramonov Alexander/Shutterstock;OSweetNature/Shutterstock; Danielz1/Shutterstock; Dafinchi/Shutterstock; Fen Deneyim/Shutterstock; Artskvortsova/Shutterstock; Nasky/ Shutterstock; Adam J/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Denis Radovanovic/Shutterstock; Ipek Morel/ Shutterstock; Nito/Shutterstock; Geza Farkas/Shutterstock; Albert Russ/Shutterstock; Orange Deer studio/ Shutterstock; Everett Collection/Shutterstock; Mega Pixel/Shutterstock; Ihor Matsiievskyi/Shutterstock; Mahathir Mohd Yasin/Shutterstock; Liveshot/Shutterstock; MTKang/Shutterstock; Andrey Kozyntsev/Shutterstock; Gab90/ Shutterstock; Olga Hofman/Shutterstock; Breck P. Kent/Shutterstock; Beker/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; Frees/Shutterstock; Concept W/Shutterstock; Volha_A./Shutterstock; Aliona Ursu/Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; John James/Shutterstock; Photo-World/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; LeysanI/Shutterstock; ADA Photo/Shutterstock; Elena Zolotukhina/Shutterstock; Bukhta Yurii/Shutterstock; Edward Olive/Shutterstock; Maxx-Studio/Shutterstock; Peter Sobolev/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Eduardo Estellez/Shutterstock; Shishir Gautam/Shutterstock; Josep Suria/Shutterstock; Designua/Shutterstock; Izzmain/Shutterstock; Kiran Paul/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; Sansanorth/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Henri Koskinen/Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; Humdan/Shutterstock; ibreakstock/Shutterstock; Magnetix/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; EDU WATANABE/Shutterstock; Kristina Vor/Shutterstock; Wantanddo/Shutterstock;