الفصل 2
النواتج التعليمية

1-2 يفسِّر كيف تتولَّد الموجات الصوتية ويستكشف خصائصها الأساسية؛ ويوضح تأثير دوبلر.

2-2 يشرح كيف تحسب الشدَّة؛ ويربط الشدّة بمستوى الشدَّة وارتفاع الصوت؛ ويستكشف ظاهرة الرنين.

3-2 يبيِّن كيفية تكوّن الموجات الواقفة على وتر مهتز، وفي الأنابيب المفتوحة والمغلقة؛ ويحسب التوافقيات ويربطها بالجرْس.

حول الصورة

تظهر الصورة دلافين ذات أنوف تشبه القنينة؛ وهي تصدر أصواتًا تساعدها على الملاحة والتواصل وتحديد المواقع بواسطة الصدى. الكثير من الثدييات ومعظم الخفافيش، تستخدم أيضًا الموجات الصوتية في تحديد مواقع حركتها.

تقويم المعرفة السابقة

ما تتوقعه من معرفة

- ✔ يتولّد الصوت من أجسام مهتزّة، ويمكن تغيير درجة الصوت بتغيير التردُّد.
- ✔ تولّد الاهتزازات في المواد اضطرابات موجية الشكل، تنتشر بعيدًا عن مصدرها، مثل الصوت وموجات الزلازل. تنتقل الموجات الصوتية في المواد المختلفة بسرعات مختلفة.

معرفة للمراجعة

- ✔ الموجات الطولية هي موجات تهتز فيها جسيمات الوسط في اتجاه موازٍ لاتجاه حركة الموجة.
- ✔ سرعة الموجة تساوي حاصل ضرب الطول الموجي في التردُّد.
- ✔ تتشكّل الموجات الواقفة عندما تتحرّك موجتان لهما ذات التردُّد والسعة والطول، لعبور وسط باتجاهَين متعاكسَين، ثم تتداخلان.

للتحقق

- ✔ التآلف مع الظواهر المتعلِّقة بالموجة: اطلب إلى المتعلِّمين أن يصفوا كيف ينتقل الصوت بين السماعة والمستمع.
- ✔ المفاهيم المسبقة حول درجة الصوت وارتفاعه: سل المتعلِّمين عمّا يحدِّد درجة الصوت وارتفاعه.

الموجاتُ الصوتيَّةُ
Sound Waves

2-1 مؤشرات الأداء

- يفسر كيف تنشأ الموجات الصوتية
- يربط التردد بدرجة الصوت
- يقارن سرعة الصوت في أوساط متعددة
- يربط الموجات الصوتية بالموجات المرئية
- يتعرف تأثير «دوبلر» ويحدد التغيير في التردد نتيجة الحركة النسبية بين المصدر والمراقب

الانضغاط

منطقة في الموجة الطولية حيث يبلغ الضغط أقصاه.

التخلخل

منطقة في الموجة الطولية حيث يبلغ الضغط أدناه.

إنتاجُ الموجاتِ الصوتيَّةِ

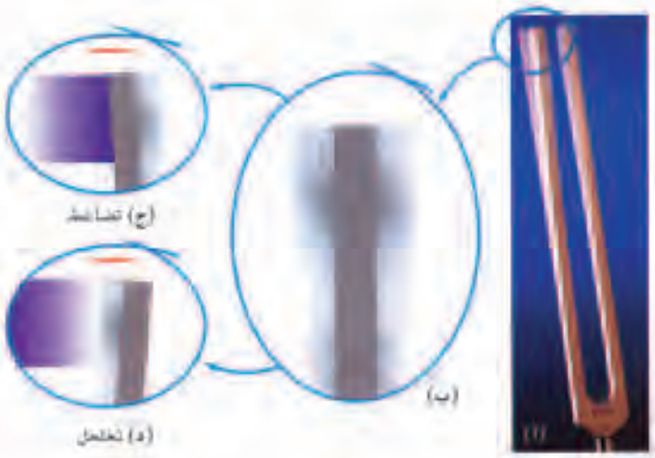
هديرُ محرّكِ نفّاثٍ أو زقزقةُ طائرٍ، كلاهما ينتقلُ كموجةٍ صوتيّةٍ، مصدرُها جسمٌ مهتزٌ. تَبيّنْ كيف تنتجُ الموجاتُ الصوتيّةُ مستعينين بالشوكة الرنانة الظاهرة في **الشكل 2-1** (أ).

حين يهتزُّ أحدُ فرعَي الشوكة، الظاهرة في **الشكل 2-1** (ب)، يجعلُ جزيئاتِ الهواء القريبةِ من الفرع تتحرّكُ. فعندما يتحرّكُ الفرعُ إلى اليسار، كما في **الشكل 2-1** (ج)، تتراصفُ جزيئاتُ الهواء القريبةُ العاليةُ منه قسريًا. تُسمّى هذه المنطقةُ ذاتُ ضغط الهواء المرتفع **انضغاطًا** compression. وعندما يعودُ فرعُ الشوكة إلى اليمين، كما في **الشكل 2-1** (د)، تتباعدُ جزيئاتُ الهواء ويصبحُ ضغطُه في هذه المنطقة أقلَّ من المستوى العادي. تُسمّى هذه المنطقةُ **تخلخلًا** rarefaction.

وعندما تستمرُّ الشوكةُ الرنّانةُ في الاهتزاز تتألّفُ سلسلةٌ من الانضغاطات والتخلخلات المتلاحقة والمنتشرة بعيدًا عن كل فرعٍ من فرعَي الشوكة وفي جميع الاتجاهات، مثل موجات الماء في بركة. وعندما تهتزُّ الشوكةُ بحركةٍ توافقيّةٍ بسيطةٍ، تهتزُّ جزيئاتُ الهواء أيضًا حيثُما ودهاليًا، بحركةٍ توافقيّةٍ بسيطةٍ.

الموجاتُ الصوتيّةُ موجاتٌ طوليّةٌ

في الموجاتِ الصوتيّةِ تكونُ اهتزازاتُ جزيئاتِ الهواء متوازيةً مع اتّجاهِ حركةِ الموجة. الموجاتُ الصوتيّةُ إذن موجاتٌ طوليّةٌ. ويمكنُ تمثيلُ أبسطِ الموجاتِ الصادرةِ عن جسمٍ



الشكل 2-1
(أ) يصدر الصوت من الشوكة الرنانة.
(ب) اهتزازات كلّ فرع من فرعي الشوكة الرنانة
(ج) عندما يهتزّ الفرع إلى اليسار يحدث منطقة ضغط عالٍ
(د) عندما يهتزّ الفرع إلى اليمين تتشكّل منطقة ضغط منخفض

القسم 2-1

مخطط القسم 2-1: الموجات الصوتية

الوقت المطلوب: 3 حصص (135 دقيقة)

الحصة 1

مختبر: 45 دقيقة

– **ك ت ط** مختبر الاكتشاف، «الرنين وطبيعة الصوت»، ص 68. يستكشف المتعلّمون ظاهرة الرنين في البندول والشوكة الرنّانة، ويبحثوا عن المتغيِّرات المؤثِّرة في الصوت الذي تصدره الآلة الصوتية.

– **ك ت م** مختبر الاكتشاف، ص 67. يستعين المعلم بالملاحظات ومعايير القياس الواردة.

الحصة 2

ركِّز: 5 دقائق

– يراجع المعلِّم مع المتعلِّمين مؤشرات الأداء الخاصة بالقسم.

حفِّز: 5 دقائق

استراتيجية بصرية

الشكل 2-1

أوضح أن اهتزاز فرعَي الشوكة يسبِّب حركة جزيئات الهواء إلى الأمام والخلف.

س: ما علاقة موقع جزيئات الهواء بحركة فرعَي الشوكة مع مرور الزمن؟

ج: تتبع جزيئات الهواء حركة الفرعَين. يزداد ضغط الهواء عندما «يدفع» الفرع تاركًا خلفه عددًا أقل من الجزيئات وضغطًا أقل، وعندما يعود الفرع يتبدَّل نمط ضغط الهواء.

درِّس: 25 دقيقة

– الشفافة 10، «إنتاج موجة صوتية»، تُظهر كيف يصدر الصوت عن شوكة رنّانة.

القسم 2-1

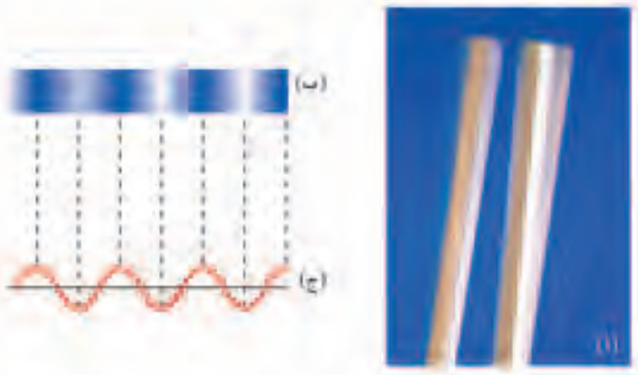
– الشفافة 11، «رسم بياني لموجة صوتية»، تظهر تمثيل الموجة الطولية التي يصدرها جسم مهتز كمنحنًى جيبي.

فكرة مفيدة في التعليم

الشكل 2-2 يستخدم منحنيًا جيبيًّا ليمثل الانضغاطات والتخلخلات لموجة طولية أصدرها جسم مهتز، الانضغاطات تقابل القمم، والتخلخلات تقابل البطون، قد يستخدم منحنًى جيبي أحيانًا، ليمثل الإزاحة وليس الضغط أو الكثافة. يكون المنحنى الجيبي الذي يمثل الضغط لأي موجة طولية معيَّنة متفاوت الطور بزاوية 90° عن المنحنى الجيبي الذي يمثل الإزاحة.

احذر الخطأ المفهومي

اذكر للمتعلِّمين أن باستطاعة بعض الناس أن يسمعوا أصواتًا تردُّدها أقل قليلاً من 20 Hz، أو أعلى قليلاً من 20 000 Hz، لأن مدى التردُّدات المعرَّف بالمسموع، يعتمد على متوسط القدرة السمعية للأذن البشرية.



الشكل 2-2
(أ) عند اهتزاز الشوكة (ب) تنتج سلسلة من الانضغاطات والتخلخلات التي تتحرك بعيدًا عن كلّ فرع. (ج) قمم هذا المنحنى الجيبي تقابل مراكز الانضغاطات، والقيعان تقابل مراكز التخلخلات.

مهتزٌ بشكل منحنى جيبيٍّ. في الشكل 2-2 تتوافقُ القممُ مع مراكز الانضغاطات (مناطق الضغط المرتفع) والقيعانُ مع مراكز التخلخلات (مناطق الضغط المنخفض). المنحنى الجيبيُّ يمثِّلُ إذًا التغيُّرات في ضغط الهواء نتيجة انتقال الموجات الصوتيَّة. علمًا أن ما يظهرُه الشكل 2-2 هو حالةٌ مثاليَّة. يسبب تخامديه عن فقد الطاقة الذي قد يسبِّبُ نقصًا في سعة الموجة.

هل تعلم؟

تستخدم الفيلة موجات صوتيَّة تحت السمعيَّة في تواصلها، حتى وإن كانت مستماعدة بضعة كيلومترات. تتبع لها آذانها الكبيرة التقاط الترددات المنخفضة، ذات الأطوال الموجيَّة الطويلة نسبيًا.

خصائصُ الموجاتِ الصوتيَّةِ

سبق أن عرَّفنا التردُّد بأنه عددُ الاهتزازات في وحدةِ الزمن. فالموجاتُ الصوتيَّةُ التي تستطيعُ الأذنُ البشريَّةُ العاديَّةُ سماعَها، وتُسمَّى موجاتٍ مسموعةً، يتراوحُ تردُّدُها بين 20 Hz و 20 000 Hz. (قدرةُ الفرد على السمع تعتمدُ على عدَّة عوامل، منها عمرُه. وتعرُّضُه لأصوات الضجيج المرتفعة.) وتُسمَّى الموجاتُ الصوتيَّةُ ذاتُ التردُّدِ الأقلِّ من 20 Hz، والتي لا تستطيعُ الأذنُ العاديَّةُ سماعَها، بالموجات تحت السمعيَّة. أما الموجاتُ الصوتيَّةُ ذاتُ التردُّدِ الأكثر من 20 000 Hz والتي لا تستطيعُ الأذنُ العاديَّةُ سماعَها أيضًا فتُسمَّى بالموجات فوق السمعيَّة.

بالرغم من أن الموجات تحت السمعيَّة والموجات فوق السمعية غيرُ مسموعتَيْن، إلا أنهما تتألَّفان من نوع الاهتزازات نفسه الذي تتكوَّنُ منه الأصواتُ التي تسمعُها. أما مدى الموجات الصوتيَّة المسموعة، فيعتمدُ على مدى تأثُّر الأذن البشريَّة باهتزازاتها. فالكلابُ والخفافيشُ مثلاً تستطيعان سماعَ الموجات فوق السمعيَّة، التي تعجزُ عن سماعها الأذنُ البشريَّة.

التردُّدُ يحدِّدُ درجةَ الصوت

تردُّدُ الموجة الصوتيَّة المسموعة يحدِّدُ ارتفاعَ أو انخفاضَ الصوت الذي تسمعُه، ويسمَّى درجة الصوت pitch. للأصوات الحادَّة درجةٌ عاليةٌ. وللأصوات الغليظة درجةٌ منخفضةٌ. تزدادُ درجةُ الصوت بازدياد تردُّده. ودرجةُ الصوت لا تعتمدُ على التردُّد فحسب، بل على عوامل أخرى أيضًا، كالضجَّة الخارجيَّة وارتفاع الصوت.

درجة الصوت
مقياس مدى حدَّة الصوت المسموع أو غلظته، تبعًا لتردُّد الموجة الصوتيَّة

نافذةٌ على الموضوع

التصوير بالموجات فوق السمعية

قد تكون الأشعة السينية ظاهرة مألوفة عند المتعلّمين بالنظر إلى استخداماتها في تشخيص أعضاء الجسم البشري. أوضح أن الموجات فوق السمعية أكثر أمانًا من الأشعة السينية، وأنها أحد أشكال الأشعة الكهرومغنطيسية.

تستخدم هذه الموجات لرؤية الأجنّة بدلاً من الأشعة السينية التي قد تسبّب عاهات خلقية، بالإضافة إلى أن صور الموجات الصوتية للخلايا الطريّة أكثر فاعلية.

إيضاح 1

الموجات الصوتية في الأجسام الصلبة

الهدف: يبيّن كيفية تحرُّك الموجات الصوتية عبر جسم صلب.

المواد: علاّقة ألبسة، خيط عدد 2.

الطريقة: افتح العلاّقة واربط خيطًا بكل من طرفَيها. اطلب إلى أحد المتطوعين أن يمسك بطرفَي الخيطَين المشدودين بالقرب من أذنيه، بينما تقوم بضرب العلاّقة بقلمك. دعه يصف الأصوات التي يسمعها. وليجرب متطوّعون آخرون وأنت مستمرّ في ضرب العلاّقة. اشرح لهم أن اهتزازات العلاّقة قد انتقلت عبر الخيط وأنتجت صوت الرنين الذي يسمعه المتطوّعون.

– الشفافة أ 3، «سرعة الصوت في أوساط مختلفة»، تظهر الشفافة لائحة بسرعات الصوت في أوساط مختلفة.

نافذةٌ على الموضوع
التصويرُ بالموجاتِ فوقَ السمعيّة

تُستخدمُ الموجاتُ فوقَ السمعيّة للحصولِ على صورِ أشياءَ داخلَ الجسمِ. يحصلُ ذلكَ بفضلِ خاصّيّةِ الانعكاسِ الجزئيِّ للموجاتِ الصوتيّةِ حينَ تبلغُ السطحَ الفاصلَ بينَ مادتَيْنِ مختلفتَيِ الكثافةِ. وتكونُ الصورُ الناتجةُ عنِ الموجاتِ فوقَ السمعيّةِ أوضحَ وأكثرَ تفصيلاً منْ تلكَ الصورِ التي تنتجُ عنِ الموجاتِ الصوتيّةِ ذاتِ التردُّدِ المنخفضِ. لأنَّ الأطوالَ الموجيّةَ القصيرةَ للموجاتِ الصوتيّةِ فوقَ السمعيّةِ تسمحُ لها بالانعكاسِ بسهولةٍ. لكنَّ الموجاتِ الصوتيّةَ المسموعةَ وتحتَ السمعيّةِ ليستا فعّالتَيْنِ كفايةً، لأنَّ أطوالَهما الموجيّةَ الطويلةَ تمرُّ حولَ الأجسامِ الصغيرةِ.

لكي يتسنّى للموجاتِ فوقَ السمعيّةِ «رؤيةُ» شيءٍ داخلَ الجسمِ، يجبُ استخدامُ موجاتٍ ذاتِ طولٍ موجيٍّ يقاربُ قياسَ الشيءِ أو يقلُّ عنهُ قليلاً. إنَّ التردُّدَ الأفضلَ المستخدمَ في جهازٍ فوقَ سمعيٍّ هو حوالي 10 MHz. تكونُ سرعةُ الموجةِ فوقَ السمعيّةِ في النسيجِ البشريِّ حوالي 1500 m/s. ومنْ ثمَّ يصبحُ الطولُ الموجيُّ هنا $\lambda = \frac{v}{f} = 0.15\ mm$. يعني أنَّ الجهازَ فوقَ السمعيَّ لا يتأثّرُ بأشياءَ يقلُّ قياسُها عنْ تلكَ القيمةِ.

يستخدمُ الأطباءُ عادةً الموجاتِ فوقَ السمعيّةِ لرؤيةِ الأجنّةِ. في هذهِ العمليةِ يُرسلُ الجهازُ موجاتٍ صوتيّةً ويلتقطُها بعدَ انعكاسِها عنِ الجنينِ. وتتحوّلُ هذهِ الموجاتُ الصوتيّةُ المنعكسةُ إلى إشارةٍ كهربائيّةٍ تشكّلُ صورةً على شاشةٍ فلوريّةٍ. عندَ تكرارِ هذهِ العمليّةِ لأجزاءٍ مختلفةٍ منْ بطنِ الأمِّ، يتمكّنُ الأخصائيُّ منَ الحصولِ على صورةٍ كاملةٍ للجنينِ، كالصورةِ الظاهرةِ أعلاه. تسمحُ تلكَ الصورُ للأطباءِ بالكشفِ عنْ بعضِ أنواعِ التشوّهاتِ الجنينيّةِ.

الجدول 1-2
سرعةُ الصوتِ في أوساطٍ مختلفةٍ

الوسط	v (m/s)
الغازات	
هواء (0°C)	331
هواء (25°C)	346
هواء (100°C)	366
هيليوم (0°C)	972
هيدروجين (0°C)	1290
أكسجين (0°C)	317
السوائل عند 25°C	
كحولُ الإيثيل	1140
ماءُ البحرِ	1530
ماء	1490
الأجسامُ الصلبة	
ألمنيوم	5100
نحاس	3560
حديد	5130
رصاص	1320
مطاطٌ صلبٌ	54

اعتمادُ سرعةِ الصوتِ على الوسطِ

تنتشرُ الموجاتُ الصوتيّةُ عبرَ الأجسامِ الصلبةِ والسائلةِ والغازيّةِ. وبما أنَّ الموجاتِ تتألّفُ منِ اهتزازاتِ الجسيمِ، فإنَّ سرعةَ الموجةِ تعتمدُ على مقدارِ السرعةِ التي ينقلُ فيها الجسيمُ حركتَهُ إلى جسيمٍ آخرَ. فجسيماتُ المادةِ الصلبةِ، مثلاً، تستجيبُ للاضطرابِ بسرعةٍ أكبرَ منْ جسيماتِ المادّةِ الغازيّةِ، لأنَّ جسيماتِ الجسمِ الصلبِ أكثرُ تقارُبًا منْ جسيماتِ الجسمِ الغازيِّ. في النتيجةِ وبشكلٍ عامٍّ، تعبرُ الموجاتُ الصوتيّةُ الأجسامَ الصلبةَ أسرعَ منْ عبورِها للأجسامِ الغازيّةِ. يُظهرُ الجدولُ 1-2 سرعةَ الموجاتِ الصوتيّةِ في أوساطٍ مختلفةٍ.

تعتمدُ سرعةُ الصوتِ أيضًا على درجةِ حرارةِ الوسطِ. عندَ ارتفاعِ درجةِ الحرارةِ يتزايدُ تصادمُ جسيماتِ الغازِ، مما يجعلُ انتشارَ الاضطرابِ الموجيِّ أسرعَ عندَ درجةِ حرارةٍ عاليةٍ مقارنةً بدرجاتِ الحرارةِ المنخفضةِ. في حالةِ الأجسامِ السائلةِ والصلبةِ تكونُ الجسيماتُ متقاربةً بشكلٍ يصعبُ فيهِ ملاحظةُ الفرقِ الناجمِ عنِ التغيُّراتِ في درجةِ الحرارةِ.

انتقالُ الموجاتِ الصوتيّةِ في ثلاثةِ أبعادٍ

ظهرتِ الموجاتُ في هذا الفصلِ، وهي تنتشرُ في بعدٍ واحدٍ. في الحقيقةِ تنتشرُ الموجاتُ الصوتيّةُ بعيدًا عنْ مصدرِها في ثلاثةِ أبعادٍ. عندَما يصدرُ صوتٌ وسطَ غرفةٍ، يمكنُ سماعُ الصوتِ الصادرِ منهُ في جميعِ أرجاءِ الغرفةِ. لأنَّ الموجاتِ الصوتيّةَ تنتشرُ في جميعِ

القسم 2-1

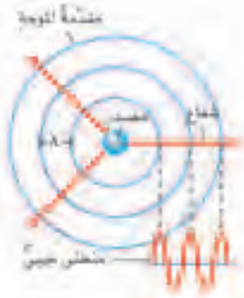
– الشفافة 12، «الموجات الكروية»، تظهر كيف تمثّل الموجات الكروية بيانيًّا في بُعدين، من خلال سلسلة من الدوائر مركزها المصدر.

– **الفيزياء والحياة** يواجه المتعلِّمون أسئلة تربط المحتوى العلمي بتطبيقات الحياة اليومية.

أجـــوبة

الفيزياء والحياة

1. لا، كما هي الحال مع الموجات، كذلك الاضطراب، فهو الذي يتحرَّك وليس المادة نفسها. جسيمات الهواء الفردية لا تتحرك مع الموجة الصوتية عبر الغرفة، وبدلاً من ذلك يهتز كل جسيم في مكانه، بينما تنتقل الاهتزازات من جسيم إلى آخر.
2. لأن الضوء ينتقل أسرع كثيرًا من الصوت، يمكن اعتبار سرعة الضوء في هذه الحالة لا متناهية فعليًّا، والوميض يكون قد حصل في اللحظة نفسها التي نراه فيها. نخلص إلى أن الزمن الذي يستغرقه وصول الصوت إلى المستمع مضروبًا في سرعة الصوت في الهواء، يعطي المسافة التقريبية بين المشاهد ومسار البرق.



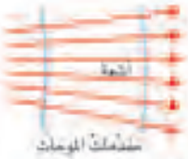
الشكل 2-3
في هذه الموجة الكروية، تمثّل المقدّمات الموجية انضغاطات. وتشير الأشعة إلى اتجاه حركة الموجة. كلّ مقدّمة موجة تقابل قمّة على المنحنى الجيبي بدوره يمثّل المنحنى شعاعًا واحدًا.

الاتجاهات. تكونُ مقدّماتُ الموجاتِ الصوتيّة، المنتشرة في جميع الاتجاهات، كرويّةً تقريبًا. لتبسيط الدراسة نفترضُ أن مقدّماتِ الموجاتِ كرويّةٌ تمامًا، ما لم يُذكرْ غيرُ ذلك.

تمثّلُ الموجاتُ الكرويّةُ بيانيًّا في بعدين، بشكل سلسلةِ دوائرَ تحيطُ بالمصدر، كما يظهرُ في الشكل 2-3. حيثُ تمثّلُ الدوائرُ مراكزَ الانضغاطات، وتُسمّى مقدّماتِ الموجات. وما دمنا ندرسُ في بعدين ظاهرةً ذاتَ ثلاثة أبعاد، فإن كلّ دائرةٍ تمثّلُ مساحةً كرويّةً.

بما أن موقعَ مركزِ الانضغاطِ تحدّدُهُ مقدّمةُ الموجة، فإن المسافةَ الفاصلةَ بين مقدّمتين موجيّتين متتابعتين تكونُ مساويةً للطولِ الموجيّ. الخطوطُ الشعاعيّةُ المتعامدةُ مع مقدّماتِ الموجاتِ تُسمّى أشعّةً، وتدلُّ على اتجاهِ حركةِ الموجة. أما المنحنى الجيبيُّ الظاهرُ في الشكل 2-3، فإنه يقابلُ شعاعًا واحدًا. ولأن القمم في المنحنى الجيبيّ تمثّلُ الانضغاطات، فإن كلّ مقدّمة موجةٍ متقاطعةٍ مع هذا الشعاعِ تكونُ مقابلةً للقمّةِ على المنحنى الجيبيّ.

تأخذُ جزءًا صغيرًا من مقدّمةِ موجةٍ كرويّةٍ تبعدُ عددًا أطوالٍ موجيّةً عن مصدرِها. كما يظهرُ في الشكل 2-4، في هذه الحالة تكونُ الأشعّةُ شبهَ متوازيةٍ أيضًا. ومن ثمّ فإن مقدّماتِ الموجاتِ البعيدةَ عن المصدرِ مسافةً كبيرةً مقارنةً بالطولِ الموجيّ، تستطيعُ أن نفترضَها مستوياتٍ متوازيةً. تُسمّى تلك الموجاتُ موجاتٍ مستويةً. كما أن أيّ جزءٍ صغيرٍ من الموجةِ الكرويّةِ، بعيدٍ عن المصدرِ، يمكنُ اعتبارُهُ موجةً مستويةً. أخيرًا يمكنُ التعاملُ مع الموجاتِ المستويةِ جميعِها كموجاتٍ ذاتِ بعدٍ واحدٍ، تنتشرُ في الاتجاهِ نفسِه. كما في فصلِ «الاهتزازاتُ والموجاتُ».



الشكل 2-4
مقدّمات الموجات الكرويّة والبعيدة جدًّا عن المصدر يمكنُ مقاربتُها بمستوياتٍ متوازيةٍ تُسمّى موجاتٍ مستويةً

الفيزياء والحياة

1. **قارئُ قرآن** افترضْ أنك تسمعُ صوتَ قارئِ قرآنٍ يصدرُ من جهازِ تسجيلٍ في الطرفِ المواجهِ لك من الغرفة. تلتقطُ أذنُك الانضغاطاتِ والتخلخلاتِ من الموجةِ الصوتيّةِ. فتقومُ أنت بترجمةِ تلك الاهتزازاتِ إلى صوت. هل انتقلتْ جسيماتُ الهواءِ المهتزّةُ قربَ أذنِك عبرَ الغرفةِ بواسطةِ تلك الموجةِ الصوتيّة؟ كيف تعرف؟

2. **البرقُ والرعدُ** الموجاتُ الصوتيّةُ تنتشرُ أسرعَ بمليونِ مرّةٍ من الموجاتِ الصوتيّةِ في الهواء. خذْ تلك المعلومةَ بالحسبان، وأنت توضحُ كيف يتمُّ حسابُ بُعدِ الصاعقةِ من خلالِ قياسِ الزمنِ بالثواني بين الوميضِ وصوتِ الرعد.

– الشفافة 13، «تأثير دوپلر»، تظهر الحركة النسبية بين سيارة متحرِّكة ومراقب ساكن.

قف احذر الخطأ المفهومي

يعتقد بعض المتعلِّمين أن تردُّد صوت المصدر يزداد لدى اقتراب مصدر الصوت من المراقب، وينقص لدى ابتعاده عنه. شدِّد على حقيقة أن التردُّد المسموع هو الأعلى أو الأقل، وأنه يتغيَّر فقط لحظة مرور المصدر بالمراقب، ويوضح الشكل 2-5 هذه الظاهرة، ويبيِّن أن المسافة بين مقدمات الموجات ثابتة لكل مراقب.

تأثيرُ "دوپلر"

تخيَّلْ نفسك واقفًا على الرصيف لحظةَ مرورِ سيارةِ إسعافٍ بسرعةٍ. مطلقةً صافرتها. تلاحظُ التغيُّرَ في درجةِ صوتِ الصافرةِ. ذلك أنها تزدادُ عندَ اقترابِها منك، ثم تنخفضُ عندَ ابتعادِها عنك. وكما تعلمُ فإن درجةَ الصوتِ تعتمدُ على تردُّدِه. لكن في هذه الحالة لا تغيِّرُ الصافرةُ تردُّدَها، فكيف إذنْ تفسِّرُ التغيُّرَ في درجةِ الصوت؟

الشكل 2-5
عندما تتحرَّكُ سيارةُ الإسعافِ إلى اليمين، يسمعُ المُراقبُ A الصافرةَ بتردُّدٍ أكبرَ من تردُّدِ الصوتِ الذي يسمعُه السائقُ. أما المُراقبُ B، فيسمعُها بتردُّدٍ أقلَّ.

الحركةُ النسبيَّةُ تسبِّبُ تغيُّرًا في التردُّد

عندما تطلقُ سيارةُ إسعافٍ متوقِّفةً صافرتَها، تتوقَّعُ أن يسمعَ مراقبٌ يقفُ في الشارعِ الصوتَ بالتردُّدِ نفسِه الذي يسمعُه سائقُ سيارةِ الإسعافِ. لكن في حالةِ سيارةِ إسعافٍ متحرِّكةٍ، كما يظهرُ في **الشكل 2-5**، تكونُ هناك حركةٌ نسبيَّةٌ بين سيارةِ الإسعافِ المتحرِّكةِ والمراقبِ الساكنِ. تؤثِّرُ هذه الحركةُ النسبيَّةُ في الطريقةِ التي يلتقطُ فيها المراقبُ مقدِّماتِ موجاتِ الصوتِ التي تصدرُ عن الصافرةِ. (لتبسيطِ الأمرِ نفترضُ أن الموجاتِ الصوتيَّةَ التي تصدرُها الصافرةُ كرويَّةٌ.)

بالرغمِ من أن تردُّدَ صوتِ الصافرةِ يبقى ثابتًا، فإن مقدِّماتِ الموجاتِ، التي تصلُ إلى مراقبٍ (A) يقفُ أمامَ السيارةِ تكونُ أكثرَ عددًا لو كانت السيارةُ متوقِّفةً. السببُ أن مصدرَ الصوتِ يتحرَّكُ في اتِّجاهِ المراقبِ. بما أن سرعةَ الصوتِ في الهواءِ لا تتغيَّرُ لاعتمادِ الصوتِ على درجةِ حرارةِ الهواءِ، فإن حاصلَ ضربِ الطولِ الموجيِّ في التردُّدِ يبقى ثابتًا. وبما أن الطولَ الموجيَّ أقلُّ، فإن التردُّدَ الذي يسمعُه المراقبُ يكونُ أكبرَ من تردُّدِ المصدرِ.

ولنفسِ السببِ، تكونُ مقدِّماتُ الموجاتِ التي تصلُ إلى مراقبٍ (B) يقفُ خلفَ السيارةِ أقلَّ عددًا لو كانت السيارةُ متوقِّفةً. نتيجةً لذلك يكونُ تردُّدُ الصوتِ الذي يسمعُه المراقبُ أقلَّ من تردُّدِ المصدرِ. يُسمَّى تغيُّرُ التردُّدِ هذا **تأثيرَ دوپلر** Doppler effect نسبةً إلى أوَّلِ من اكتشفَه، الفيزيائيِّ النمساويِّ كريستيان دوپلر (1803-1853).

تأثيرُ دوپلر
تغيُّرٌ ملحوظٌ في التردُّدِ نتيجةَ للحركةِ النسبيَّةِ بين مصدرِ الموجاتِ والمراقبِ.

القسم 2-1

اختم: 10 دقائق

– **ك ت ط**، «الموجات الصوتية»، ص 14.

واجب منزلي

– مراجعة القسم، **ك ط**، ص 45، عيِّن الأسئلة 1-3 و 4، 5، 6.

– مراجعة الفصل، **ك ط**، ص 66، عيِّن الأسئلة 1، 3، 5، 7، 11.

– **ك ت ط**، نماذج مسائل، مسألة 2 (أ) «شدَّة الموجات الصوتية»، ص 39. يستخدم المتعلِّمون المسألة 2 (أ) كنموذج لحل مسائل متعدِّدة، بالإضافة إلى المسائل الأخرى الباقية.

الحصة 3

مختبر: 45 دقيقة

– **ك ت ط**، مختبر الفصل، «سرعة الصوت»، ص 71، يقيس المتعلِّمون سرعة الصوت. راجع الملاحظات حول مختبر الفصل في **ك ت م**، ص 69.

بما أن التردُّد يحدِّدُ درجة الصوت، فإن درجة الصوت الذي يسمعُه كلُّ مراقبٍ تعتمدُ على تأثير دوبلر. وبينما حين أن المراقب الواقف أمام سيارة الإسعاف يسمعُ درجة صوت عالية فإن المراقب الواقف خلف السيارة يسمعُ درجة صوت منخفضة.

تناولنا في دراستنا مصدر صوت متحرِّك بالنسبة إلى مراقبٍ ساكن. لكنَّ تأثير دوبلر يحدثُ أيضًا عندما يكونُ المراقبُ متحرِّكًا بالنسبة إلى مصدرٍ ساكن، أو عندما يكونُ كلاهما في حالة حركة بسرعتين مختلفتين.

باختصار يحدثُ تأثيرُ دوبلر في حالة الحركة النسبيَّة بين مصدر الموجات والمراقب. وبالرغم من شيوع الاختبارات لتأثير دوبلر مع الموجات الصوتيَّة تحديدًا، فإنه يبقى ظاهرةً عامَّةً لكلِّ الموجات، وضمنها الموجاتُ الكهرومغنطيسيَّةُ كالضوء مثلاً.

مراجعةُ القسم 2-1

1. ما العلاقةُ بين التردُّد ودرجة الصوت؟
2. **تحديدُ الموقع من خلال الصدى** عند الدلفين شبيهٌ باستخدام الموجات فوق السمعيَّة. حيثُ تسمعُ الموجاتُ الصوتيَّةُ المنعكسةُ للدلفين بتشكيل صورةٍ للجسم العاكس للموجات. يستطيعُ الدلفينُ أن يُصدرَ موجاتٍ صوتيَّةً بترددات تتراوحُ بين 0.25 kHz و 1220 kHz. لكنَّ ترددات الجزء الأعلى فقط من هذا المدى تُستخدمُ في عمليَّة تحديد الموقع من خلال الصدى. لماذا تعملُ الموجاتُ ذاتُ التردُّد المرتفع بشكلٍ أفضل من الموجات ذات التردُّد المنخفض؟
3. تنتشرُ النبضاتُ الصوتيَّةُ المنبعثةُ من الدلفين بمعدَّل 1450 m/s عبر ماء المحيط عند درجة حرارة 20°C. إذا كانت سرعةُ تلك النبضات في الهواء تبلغُ 342.9 m/s عند درجة حرارة 20°C، فكيف تفسِّرُ هذا الفرق في السرعة؟
4. **تفسير الرسم:** هل يمكنُ اعتبارُ الجزء الداخليِّ لمقدِّمة الموجة الظاهر في الشكل 2-6 موجةً شبه مستوية؟ علِّلْ ذلك.

الشكل 2-6

5. **تفسير الرسم:** الشكل 2-7 رسمٌ لتأثير دوبلر في حوض الأمواج. في أي اتِّجاهٍ يتحرَّكُ مصدرُ تلك الموجات؟
6. **تفكيرٌ ناقد:** عندما يسبحُ دلفينٌ في اتِّجاه سمكة، يرسلُ موجاتٍ صوتيَّةً تهدفُ إلى تحديد اتِّجاه حركة السمكة. إذا كانَ تردُّدُ الموجات المنعكسة أعلى من تردُّد الموجات المُرسَلة، فهل يكونُ الدلفينُ متقدِّمًا أم متراجعًا عن اللحاق بالسمكة؟

الشكل 2-7

مراجعة القسم
أجـــوبة

1. التردُّد الأكبر يُسمع بدرجة صوت أعلى.
2. تفيد الترددات المرتفعة جدًّا في تحديد المواقع بواسطة الصدى، لأن باستطاعة أطوالها الموجية القصيرة نسبيًّا استشعار الأجسام الصغرى. (الأطوال الموجية الطويلة قد تشتِّت الاهتزازات حول الأجسام الصغيرة.)
3. تنتقل الموجات الصوتية في الماء أسرع من انتقالها في الهواء، لأن جسيمات الماء أكثر تقاربًا. ونتيجة لذلك تنتشر الاهتزازات بسرعة أكبر.
4. لا، يجب أن تكون مقدمة الموجة بعيدة عن المصدر (قياسًا بالطول الموجي) ليصبح موجة شبه مسطَّحة.
5. إلى اليمين.
6. يستطيع الدلفين اللحاق بالسمكة.

القسم 2-2

مخطط القسم 2-2: شدَّة الصوت والرنين

الوقت المطلوب: حصتان (90 دقيقة)

الحصة 4

ركِّز: 5 دقائق

– راجع مؤشرات الأداء الواردة في كتاب الطالب.

حفِّز: 5 دقائق

نماذج أساسية ومقارنات

اطلب إلى المتعلِّمين أن يتخيَّلوا بالونًا منفوخًا. سطح البالون المنفوخ يشبه موجة الصوت الكروية. أوضح أنه بعد نفخ البالون تتوزع الكمية نفسها للمادة على مساحة أكبر. وبصورة مشابهة تتوزع الكمية نفسها من الطاقة على مساحة أكبر وعلى مسافات أطول من مصدر موجات الصوت. إذن تكون العلاقة بين شدَّة الصوت ومربّع المسافة معكوسة، كما يظهر في معادلة شدَّة الموجة الكروية.

شدَّةُ الصوتِ والرنينِ
Sound Intensity and Resonance

2-2 مؤشرات الأداء

- يحسب شدة الموجات الصوتية
- يربط شدة الصوت بمستوى شدة الصوت وارتفاع الصوت المسموع
- يوضح كيف يحصل الرنين

شدَّةُ الصوتِ

ورد في القسم 2-1، أن الموجات الصوتيَّة المنتقلة في الهواء موجاتٌ طوليَّةٌ. وعند انتقال هذه الموجات بعيدًا عن مصدرها، تنتقلُ الطاقةُ من جزيءٍ هوائيٍّ إلى آخر. يُسمّى معدَّلُ انتقال تلك الطاقة عبرَ وحدةِ مساحةٍ من الموجة المستوية شدّة intensity الموجة. بما أن P قد تمّ تعريفُها كمعدَّل انتقال الطاقة، فيمكننا كتابةُ الشدَّة (I) بدلالة القدرة كما يلي:

$$I = \frac{P}{\text{المساحة}} = \frac{\Delta E/\Delta t}{\text{المساحة}}$$

بما أن وحدةَ القدرة في النظام العالميّ SI هي واط (W)، فإن وحدةَ الشدَّة تكونُ واطَ لكلِّ متر مربّع (W/m^2). في حالة الموجة الكرويَّة، تنتقلُ الطاقةُ بشكلٍ متساوٍ في كلِّ الاتّجاهات، وفي هذه الحالة، تتوزَّعُ القدرةُ المنبعثةُ من المصدر (P) على سطحٍ كرويٍّ (مساحةُ سطحه $= 4\pi r^2$). نفترضُ عدمَ حصول أيِّ امتصاصٍ في الوسط الذي تنتقلُ فيه الموجةُ.

شدَّة الموجة الصوتيَّة

معدَّلُ انتقال طاقة الموجة عبر وحدة مساحة متعامدة مع اتّجاه حركة الموجة

شدَّة الموجة الكرويَّة

$$\text{الشدة} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

$$\text{الشدة} = \frac{\text{(القدرة)}}{(4\pi)\ \text{(المسافة من المصدر)}^2}$$

تدلُّ هذه المعادلةُ على أن شدَّةَ الموجة الصوتيَّة تقلُّ كلما ازدادت المسافةُ من المصدر. يحصلُ ذلك بسبب انتشار كمّيَّة الطاقة نفسها على مساحةٍ أكبر.

مثال 2 (أ)

شدَّةُ الموجات الصوتيَّة

المسألة

ما شدَّةُ الموجات الصوتيَّة الصادرة عن مذياع بعد مسافة 3.2 m إذا كانت القدرةُ المنتجةُ من المذياع تساوي 20.0 W؟ افترضْ أن الموجات الصوتيَّة كرويَّة.

الحل

المعطى: $P = 20.0\ \text{W}$ $\quad r = 3.2\ \text{m}$

المجهول: $I = ?$

المثال 2

أستخدمُ معادلة الشدّة في حالة الموجة الكرويّة.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

$$= \frac{20.0\ \text{W}}{4\pi(3.2\ \text{m})^2}$$

$$I = 0.16\ \text{W/m}^2$$

جواب الآلة الحاسبة

جواب الآلة الحاسبة للمسألة 0.00155424799 يقرّب الجواب إلى 0.16 ليتوافق مع عدد الأرقام المعنويّة في المعطى.

تطبيق 2 (أ)

شدّة الموجات الصوتيّة

1. احسبْ شدّة الموجات الصوتيّة الصادرة عن السمّاعة الكهربائيّة على مسافة 5.0 m إذا كانت القدرة المنتجة:
   أ. 0.25 W
   ب. 0.50 W
   ج. 2.0 W
2. عند الحدّ الأقصى لارتفاع الصوت، تصلُ القدرةُ المنتجةُ لـ 75 آلة وتريّة وهوائيّة إلى 70.0 W. ما شدّةُ الموجات الصوتيّة التي يلتقطُها مستمعٌ يجلسُ على مسافة 25.0 m من مصدر الصوت؟
3. إذا كانت شدّةُ صوت شخص $4.6 \times 10^{-7}\ \text{W/m}^2$ على مسافة 2.0 m، فكم القدرةُ الصوتيّةُ الناتجة عن الشخص؟
4. كم القدرةُ المنبعثةُ بشكل صوت من مكبّر صوت شدّةُ موجاته الصوتيّة $1.6 \times 10^{-3}\ \text{W/m}^2$ على مسافة 915 m؟
5. تبلغُ القدرةُ الصادرةُ عن صافرة 0.35 W، على أي مسافة تكونُ شدّةُ الصوت $1.2 \times 10^{-3}\ \text{W/m}^2$؟

القسم 2-2

درس: 35 دقيقة

– مثال 2 (أ) «شدّة الموجات الصوتية»، **ك ط**، ص 47.

تمرين صفي

يمكن إنجاز هذا التمرين بشكل فريقي، أو كتجربة إيضاحية تستخدم فيها السبّورة أو جهاز إسقاط علوي.

المسألة

شدّة الموجات الصوتية

شدّة صوت انفجار تبلغ $0.10\ \text{W/m}^2$ على مسافة $1.0 \times 10^3\ \text{m}$، جد شدّة الصوت على المسافات $5.0 \times 10^2\ \text{m}$ و $1.0 \times 10^2\ \text{m}$ و 10.0 m.

الجواب: $0.40\ \text{W/m}^2$، $1.0 \times 10^1\ \text{W/m}^2$، $1.0 \times 10^3\ \text{W/m}^2$

أجوبة

تطبيق 2 (أ)

1. أ. $8.0 \times 10^{-4}\ \text{W/m}^2$
   ب. $1.6 \times 10^{-3}\ \text{W/m}^2$
   ج. $6.4 \times 10^{-3}\ \text{W/m}^2$
2. $8.91 \times 10^{-3}\ \text{W/m}^2$
3. $2.3 \times 10^{-5}\ \text{W}$
4. 4.5 W
5. 4.8 m

استراتيجية بصرية

الشكل 2-9

تأكد من فهم المتعلِّمين للمعلومات التي تتضمَّنها المناطق المختلفة للرسم. أوضح لهم أيضًا أن مقياس محور y لوغاريثمي، إذن تكون الشدَّة المتمثلة في كل خط أفقي أكبر 100 مرة من الشدَّة المتمثلة في الخط الذي يليه مباشرة إلى أسفل.

س: هل هناك أصوات موسيقية تردُّدها 100 Hz وشدَّتها $1.0 \times 10^{-6}\ W/m^2$؟

ج: نعم، لأن منطقة السمع جزء من منطقة الموسيقى.

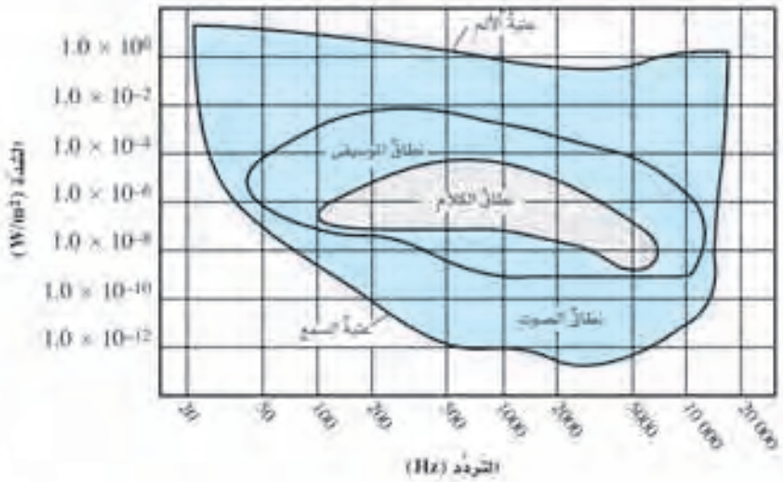
س: هل الرسم البياني هو التمثيل الصحيح لسمع الفرد؟

ج: لا، فالرسم البياني يعتمد على متوسط القدرة السمعية للأذن، وقد يتباين سمع الفرد.

– الشفافة أ 4: «مدى سمع الأذن البشرية»، تُظهر تردُّد وشدَّة الموجات الصوتية التي قد تسمعها الأذن البشرية.

احذر الخطأ المفهومي

العلاقة بين التردُّد والشدَّة والسمع معقَّدة ويختلط عادة فهمها على المتعلِّمين. شدِّد على أن التردُّد وحده لا يحدِّد أي الأصوات مسموعة والشدّة وحدها لا تحدِّد كذلك، بل يجب أخذهما كليهما بالاعتبار.



الشكل 2-8
يعتمد السمع البشري على التردُّد وشدَّة الموجات الصوتية معًا. الأصوات التي تقع في منتصف مدى التردُّدات يسهل سماعها أكثر (على شدَّة منخفضة) من التردُّدات المنخفضة أو المرتفعة.

الشدَّة والتردُّد يحدِّدان الأصوات المسموعة

درسْنا في القسم 2-1 أن تردُّد الموجات الصوتية التي يسمعها الإنسانُ العادي تتراوحُ بين 20 Hz و 20 000 Hz. والشدَّةُ أيضًا عاملٌ يحدِّدُ أيَّ الأصوات مسموعةٌ. يظهرُ الشكلُ 2-8 كيف يعتمدُ مدى السمع في أذن الإنسان العاديِّ على التردُّدِ والشدَّةِ معًا. ترى في الرسم البيانيِّ أن الأصوات ذات التردُّدات المنخفضة (أقلّ من 50 Hz) أو المرتفعة (أكثر من 12 000 Hz) يجبُ أن تكونَ نسبيًّا على درجةٍ من الشدَّةِ لتُسمع. أما الأصواتُ التي تقعُ في منتصفِ الطيف، فتكونُ مسموعةً على درجاتٍ منخفضةٍ من الشدَّةِ. أكثرُ الأصواتِ خفوتًا يمكنُ سماعُها بتردُّدِ 1000 Hz تقريبًا، وبشدَّةِ $1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$. تلك الأصواتُ تقعُ ضمنَ عتبةِ السمعِ. (لاحظْ أن الأذنَ البشريَّةَ تستطيعُ التقاطَ أصواتٍ أكثرَ خفوتًا على تردُّدٍ يبلغُ حوالي 3300 Hz.) ويُمثِّلُ المنحنى الأدنى في **الشكل 2-8** عتبةَ السمعِ على كلِّ تردُّدٍ.

وفي الترددات القريبة من 1000 Hz والتي تقعُ على عتبةِ السمعِ تبلغُ تغيُّراتُ الضغطِ، نتيجةَ الانضغاطاتِ والتخلخلاتِ، حوالي $30 \times 10^{-6}\ P_0$. أما الإزاحةُ القصوى لجزيءِ الهواءِ عند عتبةِ السمعِ فتساوي 1×10^{-11} m تقريبًا. إن المقارنةَ بين هذه الإزاحةِ وقطرِ جزيءِ الهواءِ الذي يساوي تقريبًا 1×10^{-10} m تظهرُ أن الأذنَ لاقطٌ حسَّاسٌ جدًّا للموجاتِ الصوتيَّةِ.

أكثرُ الأصواتِ ارتفاعًا، وبمقدورِ الأذنِ تحمُّلُها، تبلغُ شدَّتُها حوالي $1.0\ W/m^2$. وتُسمّى عتبةَ الألمِ، لأنها إن زادَت عن تلك الشدَّةِ يسبِّبُ سماعُها ألمًا. ويمثِّلُ المنحنى الأعلى في **الشكل 2-8** عتبةَ الألمِ على كلِّ تردُّدٍ.

والتعرُّضُ لأصواتٍ فوقَ حدِّ الألمِ قد يحدثُ ضررًا فوريًّا للأذنِ، حتى وإن لم يكنْ هناك إحساسٌ بالألمِ. كما أن استمرارَ التعرُّضِ للأصواتِ ذاتِ الشدَّةِ المنخفضةِ، قد يضرُّ بالأذنِ. لهذا السببِ يستخدمُ بعضُ الموسيقيين خلالَ أدائهم سداداتٍ للأذنِ. تحذرُ الملاحظةُ أن عتبةَ السمعِ وعتبةَ الألمِ تلتقيانِ عند الطرفَيْنِ الأدنى والأعلى للطيفِ.

قياس مستوى شدّة الصوت (β)

كما يُحدّدُ تردُّدُ الموجةِ الصوتيّةِ درجةَ الصوت، تُحدّدُ الشدّةُ تقريبًا ارتفاعَ الصوت المسموع، لكنَّ ارتفاعَ الصوت لا يتناسبُ طرديًّا مع الشدّة، لأن الإحساسَ بارتفاعِ الصوت شبيهٌ لوغاريتميٌّ في الأذن البشريّة.

مستوى شدّة الصوت β هو نسبةُ شدّة موجةٍ صوتيّةٍ معيّنة إلى شدّة موجةٍ صوتيّةٍ عند عتبة السمع، وليس له وحدة. إن ارتفاعَ الصوت يتناسبُ طرديًّا مع لوغاريتم النسبة. ويُستخدمُ الديسيبل decibel (dB) للتعبير عن مستوى شدّة الصوت.

الديسيبل

وحدةٌ بلا بُعد تقيسُ مستوى شدّة الصوت.

مستوى شدّة الصوت

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

حيث I: شدّةُ الصوت

I_0: شدّةُ عتبة السمع وتساوي $1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$

يوضحُ الجدولُ 2-2 شدّةَ الصوت ومستوى الشدّة لبعض مصادر الصوت.

الجدول 2-2 شدّة الصوت ومستوى الشدّة لبعض مصادر الصوت

مصادرُ الصوت	الشدّة (W/m^2)	مستوى الشدّة بالديسيبل (dB)
عتبةُ السمع	1.0×10^{-12}	0
حفيفُ ورق الشجر	1.0×10^{-11}	10
همسٌ خفيفٌ	1.0×10^{-10}	20
همس	1.0×10^{-9}	30
أزيزُ بعوضة	1.0×10^{-8}	40
محادثةٌ عاديّة	1.0×10^{-7}	50
مكيّفٌ يبعدُ 6 m	1.0×10^{-6}	60
مكنسةٌ كهربائيّة	1.0×10^{-5}	70
ازدحامُ السير أو ساعةٌ منبّه	1.0×10^{-4}	80
قطّاعةُ خشب	1.0×10^{-3}	90
قطارٌ كهربائيٌّ نفقيٌّ		
مولّدٌ كهربائيٌّ	1.0×10^{-2}	100
منبّهُ السيارة على بعد 1 m	1.0×10^{-1}	110
عتبةُ الألم	1.0×10^{0}	120
قصفُ الرعد، رشّاشٌ حربيٌّ	1.0×10^{1}	130
طائرةٌ نفّاثةٌ قريبة	1.0×10^{2}	150

هل تعلم؟

الوحدةُ الأصليّةُ لمستوى الديسيبل هي البل، تيمّنًا بألكسندر بل، مخترع الهاتف. الديسيبل يساوي 0.1 بل.

القسم 2-2

قف احذر الخطأ المفهومي

قد يختلط على بعض المتعلّمين مفهوما مستوى الشدّة والشدّة. أوضح أن نسبة مستوى الشدّة إلى مستوى آخر لا يعطي نسبة شدّتي صوتيهما، لأن مقياس الديسيبل لوغاريثمي. استعن بأمثلة من الجدول 2-2 لتصحيح الخطأ المفهومي.

– الشفافة أ 5، «تحويل الشدّة إلى مستوى الشدّة بالديسيبل»، تظهر مستوى الشدّة بالديسيبل لعدّة مستويات مختلفة الشدّة، وتعطي مثالاً من الواقع على كل منها.

نماذج أساسية ومقارنات

صُمِّم مقياس ديسيبل لارتفاع الصوت بشكل شبيه بمقياس ريختر للزلازل ومقياس pH للمستوى الحمضي. القيم المقيسة بهذه المقاييس تطابق رتبة العظم (الأس 10) للكميات الأصلية، لأن هذه الكميات تغطي مدىً واسعًا من القيم.

استراتيجية بصرية

الجدول 2-2

أوضح أن الصفر على مقياس الديسيبل لا يعني أن الشدّة صفر أو عدم وجود صوت، بل يعني أن الصوت غير مسموع.

س: كيف يقارن ضجيج قطار الأنفاق بصوت المحادثة؟

ج: على مسافات قريبة يُصدر قطار الأنفاق ضجيجًا إلى آذاننا طاقته أكبر من طاقة المحادثة بـ 100 000 (أو $10^{-2}/10^{-7}$) مثْل من طاقة المحادثة. (يعتقد بعض المتعلّمين أن الجواب هو ببساطة الضعف أو نسبة 100 لـ 50، أوضح لهم خطأ هذا الاعتقاد.)

القسم 2-2

الحصة 5

درس: 25 دقيقة

إيضاح 2

الرنين

الهدف: يوضح الرنين مستخدمًا شُوَكًا رنّانة.

المواد: شوك رنّانة متعدِّدة (ضمنها شوكتان بالتردُّد نفسه)، علبتا رنين متشابهتان، مطرقة مطاطية.

الطريقة: خذ شوكة رنّانة على صندوق الرنين واطرقها بالمطرقة المطاطية وأصغ إلى الصوت الذي يصدر عنها.

ضع شوكة أخرى على صندوق الرنين لها تردُّد الشوكة الأولى نفسه، وقربها إلى الشوكة التي طرقتها أولاً بحيث يتواجه جانبا الصندوق المفتوحين وبينهما مسافة 10 cm، اطرق الشوكة الأولى بالمطرقة المطاطية وأصغ جيدًا (تسمع صوت الرنين). المس الشوكة الأولى التي طرقتها لتتوقف عن الاهتزاز، وأصغ جيدًا إلى الشوكة الثانية (تجد أنها لا تزال تهتز). فسِّر ذلك بانتقال الطاقة عبر الهواء والخشب، ذلك أن الشوكة الأخرى قد التقطت الاهتزازات، لأن تردُّدها الطبيعي تطابق مع تردُّد الشوكة الأولى. أعد المحاولة مستخدمًا شوكًا بتردُّدات مختلفة لتبرهن أن الرنين لا يحدث في هذه الحالات.

الشكل 2-9

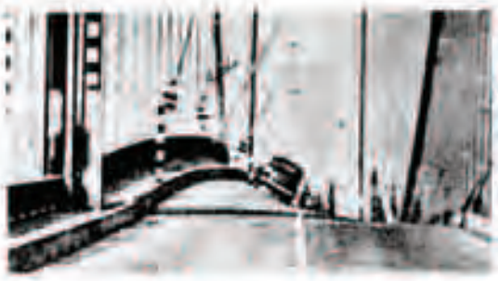
عند تحريك بندول أزرق واحد، يتحرَّك فقط البندول الأزرق الآخر ذو الطول نفسه. متأرجحاً بسعة أكبر، ليصبح النظام في حالة رنين.

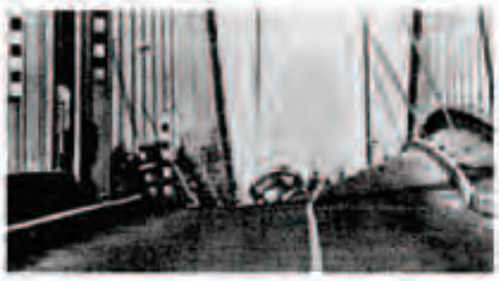
الاهتزازاتُ القسريّةُ والرنينُ

نكادُ نسمعُ أيَّ صوتٍ يصدرُ عند نقرِ وترٍ مشدودٍ ومعزولٍ لكن عند وضعِ الوترِ نفسِه على الغيتارِ ثم نقرِه، نلاحظُ أن شدَّةَ الصوتِ تزدادُ بشكلٍ هائلٍ. ما سببُ هذا الفرقِ؟ للإجابةِ عن هذا السؤالِ، نأخذُ مجموعةَ بندولاتٍ معلَّقةٍ على قضيبٍ يصلُ بينها رباطٌ مطّاطيٌّ غيرُ مشدودٍ، كما يظهرُ في **الشكل 2-9**. عند تحريكِ أحدِ البندولاتِ، تنتقلُ الاهتزازاتُ عبرَ الرباطِ، فتبدأُ باقي البندولاتِ بالاهتزازِ. تُسمّى هذه الظاهرةُ الاهتزازَ القسريَّ.

الأوتارُ المهتزَّةُ في الغيتارِ تدفعُ جسرَ الغيتارِ للاهتزازِ. والجسرُ بدورِه ينقلُ اهتزازاتِه إلى جسمِ الغيتارِ. تُسمّى هذه الاهتزازاتُ القسريَّةُ اهتزازاتٍ بالتأثيرِ. بما أن مساحةَ جسمِ الغيتارِ تفوقُ مساحةَ الأوتارِ، فإن اهتزازاتِ الأوتارِ تتمكَّنُ من الانتقالِ إلى الهواءِ بفاعليَّةٍ أكبرَ، ونتيجةً لذلك، تزدادُ شدَّةُ الصوتِ وتخمدُ اهتزازاتُ الأوتارِ. أسرعُ ممّا لو لم تكنْ متَّصلةً بجسمِ الغيتارِ، ويعني ذلك أن جسمَ الغيتارِ يسمحُ بتبادلِ الطاقةِ بين الأوتارِ والهواءِ بفاعليَّةٍ أكبرَ، فيزيدُ بذلك من شدَّةِ الصوتِ الصادرِ.

في الغيتارِ الكهربائيِّ، تتحوَّلُ اهتزازاتُ الأوتارِ إلى نبضاتٍ كهربائيَّةٍ يمكنُ تضخيمُها بالقدرِ المطلوبِ. وبإمكانِ الغيتارِ الكهربائيِّ أن يُصدرَ أصواتًا شدَّتُها أكبرُ بكثيرٍ من أصواتِ غيتارٍ صوتيٍّ غيرِ مضخَّمٍ. يستخدمُ فقطُ اهتزازاتِ جسمِ الغيتارِ القسريَّةِ لزيادةِ شدَّةِ الصوتِ من الأوتارِ المهتزَّةِ.





الشكل 2-10

في نوفمبر 1940 تداعى جسرُ تاكوما نارورز المعلَّقُ بعد أربعة أشهرٍ فقط من افتتاحِه. موجاتٌ واقفةٌ سببَها رياحٌ هائجةٌ حرَّكت الجسرَ وجعلتْه ينهارُ.

نشاط عملي سريع

الرنين

المواد

- جهاز تأرجح

استخدمْ بندولاً وادفعْه بقوى مختلفةٍ عندما يصلُ إلى أقصى ارتفاعٍ في كلِّ مرةٍ. ولاحظْ تأثيرَ القوَّةِ في سعةِ اهتزازةِ البندولِ.

لاحظْ تأثيرَ القوَّةِ في سهولةِ ازديادِ سعةِ الاهتزازةِ. هل هناك قوى أكثرُ فاعليةً في زيادةِ سعةِ اهتزازةِ البندولِ من معدَّلاتٍ أخرى؟ يجب أن تستنتجَ أن تأثيرَ القوى يكونُ أكثرَ فاعليةً عندما يتطابقُ تردُّدُ البندولِ الناتجِ عن القوةِ مع التردُّدِ الطبيعيِّ للبندولِ. أوضحْ كيف تدعمُ نشاطُك التصريحَ القائلَ بأن الرنينَ يكونُ أفضلَ عندما يتطابقُ تردُّدُ القوةِ المطبَّقةِ مع التردُّدِ الطبيعيِّ للنظامِ.

نشاط عملي سريع

ملاحظات المعلم

لتوسيع النشاط دع المتعلِّمين يقارنوا بين حالتين بدءًا من تردُّد منخفض، في الحالة الأولى، يُدفع البندول بقوة معينة عند وصوله إلى أقصى ارتفاع من إحدى جهتي تأرجحه، في الحالة الثانية يُدفع البندول بالقوة نفسها عند أقصى ارتفاع من كل جهة من تأرجحه. يجب أن يستنتج المتعلّمون العلاقة بين تردُّد القوة المطبقة والتردُّد الطبيعي للبندول.

اهتزازةٌ بتردُّدٍ طبيعيٍّ تولِّدُ رنينًا

ورد في فصل الموجات، أن تردُّدَ البندول يعتمدُ على طول الخيط. فكلُّ بندولٍ إذًا يهتزُّ بتردُّدٍ معيَّنٍ، يُسمّى التردُّدَ الطبيعيَّ. تجدُ في الشكل 2-9، أن للبندولَيْن الأزرقَيْن التردُّدَ الطبيعيَّ نفسَه. في حين أن البندولَيْن الأحمرَ والأخضرَ لهما تردُّدان طبيعيّان مختلفان. عند تأرجح البندول الأزرق الأول، يهتزُّ البندولُ الأخضرُ والأحمرُ قليلاً. لكنَّ البندول الأزرق الثاني، يتأرجحُ بسعةٍ أكبرَ بكثيرٍ، لأن تردُّدَهُ الطبيعيَّ يطابقُ تردُّدَ البندول الذي كان بدايةً في حالة حركة. يُقال إن هذا النظامَ في حالة رنين resonance. وبما أن الطاقة تنتقلُ من بندولٍ إلى آخرَ فإن سعةَ اهتزازةِ البندول الأزرق الأول ستنخفضُ، بينما تزدادُ سعةُ البندول الأزرق الثاني.

مثالٌ لافتٌ هو الرنينُ الذي حدث عام 1940، عندما اهتزَّ جسرُ تاكوما نارورز في واشنطن بسبب الرياح. وانظر الشكل 2-10، حيث تلاءمت موجاتٌ واقفةٌ في الجسر بسبب رياحٍ عاتيةٍ، مما جعل الجسرَ يتأرجحُ بأحد تردُّداته الطبيعيَّة، وازدادت سعةُ الاهتزازات إلى أن تداعى الجسرُ. مثالٌ آخرُ على الرنين حدثَ حصل عام 1989 خلال زلزالٍ لوما بريتا كاليفورنيا، عندما انهارَ جزءٌ من السطح الأعلى للطريق السريعة نتيجةَ موجاتٍ زلزاليَّةٍ تردُّدها 1.5 Hz وهو قريبٌ جدًّا من التردُّد الطبيعيِّ لهذا الجزء من الطريق السريعة.

الرنين

ظاهرةٌ تحصلُ عندما يتطابقُ تردُّدُ نظامٍ معيَّنٍ عند تطبيق قوةٍ عليه مع التردُّد الطبيعيِّ له، مسبِّبًا اهتزازاتٍ ذات سعةٍ هائلة.

الفيزياء والحياة

مصانع نبَّهَ قوانينَ البلديَّات إلى عدم تعرُّض أيِّ عاملٍ إلى مستوياتٍ ضجيجٍ يفوق 90 dB لفترةٍ زمنيَّةٍ تزيدُ على ثماني ساعاتٍ في اليوم. هذا يعني أن مصنعًا ضجيجُه 100 dB يجب خفضُه 10 dB. افترضْ أن كلَّ آلةٍ تصدرُ الكميَّةَ نفسها من الضجيج. ما النسبةُ المئويَّةُ للآلات التي يجب إزالتُها؟ أوضحْ ذلك.

مراجعةُ القسم 2-2

1. عندما يزدادُ مستوى شدَّة الصوت لحركة المرور في الشارع من 40 dB إلى 60 dB، كم تزيدُ شدَّةُ الضجيج؟
2. يهتزُّ الفرعان المعدنيَّان لشوكةِ رنَّانةٍ بتردُّدٍ واحدٍ. عند طرقهما، ماذا يحصلُ إذا وُضعَتْ شوكةٌ رنَّانةٌ مهتزَّةٌ قربَ شوكةٍ رنَّانةٍ أخرى تهتزُّ بالتردُّد نفسه؟ أوضحْ ذلك.
3. يوضعُ في المحيط ميكروفونٌ معيَّنٌ حسَّاسٌ للأصوات المنبعثة من الدلافين، وللحصول على إشارةٍ صالحةٍ، يجب أن يلتقطَ الميكروفون موجاتِ صوتٍ ذات مستوى شدَّةٍ 10 dB. فإذا أصدرت الدلافينُ موجاتِ صوتٍ ذات قدرةٍ 0.050 W، فكم يجبُ أن يكونَ بُعد الدلافين عن الميكروفون ليبقى صوتُها مسموعًا؟ (افترضْ أن انتشار موجاتِ الصوت كرويٌّ، وأهملْ أيَّ امتصاصٍ لموجات الصوت.)
4. **تفكيرٌ ناقد** أيُّ العوامل التالية يتغيَّرُ عندما يرتفعُ الصوتُ؟ وأيُّ العوامل يتغيَّرُ عند ارتفاعِ درجة الصوت؟

أ. الشدَّة	ب. سرعةُ موجات الصوت
ج. التردُّد	د. مستوى الشدَّة
هـ. الطولُ الموجيُّ	و. السعة

القسم 2-2

– **الفيزياء والحياة** أسئلة المفاهيم تساعد المتعلِّم على تطبيق ما يتعلمه من مفاهيم فيزيائيّة في حياته العملية.

أجوبة

الفيزياء والحياة

خفض مستوى الديسيبل 10 مرَّات يتطلب خفض الشدَّة بعامل 10، يجب، إذن إزالة 90% من المعدَّات والآلات.

مراجعة القسم
أجوبة

1. ازدادت الشدَّة بعامل 100 (أي 10^2).
2. الشوكة الثانية تلتقط الاهتزازات من الشوكة الأولى، ويسمع صوت خافت من الشوكة الثانية. وهذا يحصل لأن للشوكتين التردُّد الطبيعي نفسه، والذي يُعدُّ شرطًا لحدوث الرنين.
3. 2.0×10^4 m
4. (أ، د، و)، (ج، هـ)

اختم: 10 دقائق

– **ك ت ط**، ص 15، مراجعة القسم، «شدَّة الصوت والرنين».

واجب منزلي

– تطبيق 2 (أ)، **ك ط**، ص 47، «شدَّة الموجات الصوتية». عيِّن الأسئلة 1-5.
– **ك ط**، مراجعة القسم، ص 52. عيِّن الأسئلة 1-5.
– **ك ت ط**، ص 39، «شدَّة الموجات الصوتية»، يستخدم المتعلِّمون هذه المسألة لحل تمارين إضافية.

القسم 2-2

استزادة: 10 دقائق

نافذةٌ على الموضوع
فقدان حدّة السمع

للوقاية من الضجيج لا بد أن ندرك أولاً أنه السبب لفقدان حاسة السمع. ويكتسب الموضوع أهمية خاصة لدى الشباب، لأن تأثيرات التعرُّض للضجيج تتراكم مع الزمن، وليس هناك تأثير واضح في تلف خلايا شعر القوقعة عند الشباب، لكن استمرار التعرُّض للضجيج قد يؤدي إلى فقدان جزئي أو كلّي لحاسة السمع.
فالعاملون في مواقع ضجيج عالٍ هم أكثر الناس تعرُّضًا لهذه المشكلة. حتى التعرُّض العرضي أو في المناسبات، قد يسبب أيضًا فقدانًا لحاسة السمع. أوضح للمتعلّمين أن الاستخدام المستمر لسماعات الرأس، خصوصًا عند سماع أصوات مرتفعة قد يسبب أيضًا ضررًا لخلايا الشعر. وبما أن الأذن هي أقرب لمصدر الصوت من السماعات، تكون أكثر تعرُّضًا لشدَّة صوت عالية.

إضافات

استخدم مقياس مستوى الصوت لقياس شدَّة أصوات، أو مستوى الشدَّة لأصوات حول الغرفة أو المدرسة. وإذا توفر أكثر من مقياس، فليتوزع المتعلّمون ضمن مجموعات لإجراء عملية القياس.
باستطاعتك إعارة المقياس للمتعلّمين المهتمين بقياس مستوى شدَّة الصوت في محيط منازلهم.

لدى التعامل مع الأجهزة الكهربائيّة، يُنصَح بوضع واقية الأذن، لتجنيبها أيّ أذى.

نافذةٌ على الموضوع
فقدان حدّة السمع

يعاني حوالي 10 % من الناس فقدانَ حدّة السمع بدرجات متفاوتة. أنواعُ الفقدان الأساسيّةُ هي:

1. فقدانُ موصّل السمع.
2. فقدانُ حسب السمع.
3. فقدانُ حسّ السمع.

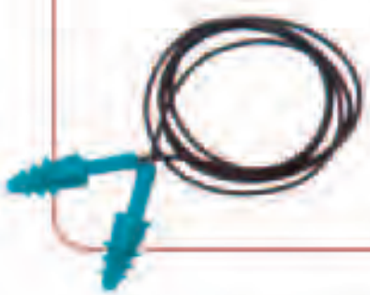
ينتجُ فقدانُ موصّل السمع عن خللٍ في نقل موجات الصوت عبر الأذن الخارجيّة، أو نقل الاهتزازات في الأذن الوسطى. وسببُ الخلل في معظم الأحيان، تضرُّرٌ بعض أجزاء الأذن الوسطى أو الخارجية نتيجة حادث أو مرض، أو نموٌّ غير سليم لتلك الأجزاء. يمكن معالجةُ هذا النوعِ بالعقاقير أو الجراحة. أما فقدانُ حسب السمع، فسببُه المشكلاتُ التي تصيبُ العصبَ السمعيَّ الذي ينقلُ الإشاراتِ من الأذن الداخليّة إلى الدماغ. من الأسباب الشائعة لفقدان حدّة السمع ما يتعلّقُ بفقدان حسّ السمع الذي يعودُ إلى ضررٍ في الأذن الداخليّة، وخصوصًا في خلايا الحسّ المجهريّة داخل قوقعة الأذن.

قد يبدأ فقدانُ حسّ السمع منذ الولادة، وقد يكونُ وراثيًّا أو نتيجة مرض أو اضطرابات في النموّ، لكنّ مصدرَ الاعتلال الأكثرَ شيوعًا لخلايا الحسّ هو التعرُّضُ للضجيج المرتفع. في حين أن التعرُّضَ لفترةٍ قصيرة قد يسبّبُ رنينًا في الأذنَيْن مع ثقلٍ مؤقّتٍ في السمع. وبالمقابل فإن التعرُّضَ المستمرَّ أو الطويل الأمد لأنواعٍ من الضجيج فوق 70 dB. ومنها ضجيجُ مصادرَ مألوفةٍ مثل مجفّف الشعر أو ضجّاعة العشب، يؤدّي إلى تلفٍ دائم في خلايا الحسّ في القوقعة.

إن خلايا الحسّ داخل القوقعة لا تشبهُ شعرَ رأسك أو يديك. إنها خلايا أعصابٍ عاليةُ الاختصاص لا يمكنُ إصلاحُها أو استبدالُها عند تعرُّضِها لتلفٍ أو اعتلالٍ خطير، ويمكنُ لخلايا حسّ القوقعة أن تتعافى من تلفٍ خفيفٍ، لكن في حال تكرار التلف، حتى وإن كانَ متوسّطَ الدرجة، فقد لا يتسنّى لخلايا الحسّ أن تتعافى، فتصابُ بضررٍ دائم. لذلك، ومن المهمّ أن تحميَ نفسك من فقدان حسّ السمع، بالتقليل من تعرُّضِك للضجيج المرتفع، أو باستعمال سدّاعتي الرأس أو سدادات الأذن، التي تسدُّ قناةَ الأذن كليًّا، عندَ تعرُّضِك للضجيج المرتفع.

يحدثُ فقدانُ حسّ السمع تدريجيًّا في العادة، وقد يستغرقُ 20 سنةً أو أكثر. وبما أن خلايا الحسّ التي تستجيبُ لأصواتٍ ذات درجةٍ عالية أقصرُ وأرقّ، فإن أوّلَ ما نفقدُه هو الحساسيّةُ لأصواتٍ بتردُّداتٍ تقاربُ 20 kHz. أما فقدانُ حساسية الأصوات ذات التردُّدات التي تقاربُ 4 kHz فهو عادةً أوّلُ ما نلاحظُه، لأن تلك التردُّداتِ تقعُ في المجال الأعلى للنطق البشريّ. والأشخاصُ الذين يبدأ فقدانُ السمع لديهم يعانون عادةً مشكلاتٍ سمعيّةً حيال أصواتٍ ذاتِ درجةٍ عالية أو حيال سماع أحرفٍ معيّنة مثل السين والماء والفاء، مع تقدُّم فقدان السمع بزيادةِ فقدانِ الحساسيّة لمجالٍ أوسعَ من الأصوات.

وبالرغم من أن العلاج الشافي الحقيقيَّ لفقدان حسّ السمع لم يتوفّرْ إلى الآن، فهناك بعضُ وسائل العلاج المتاحة. فوسائلُ السمع تقومُ بدور مضخّماتِ الصوت فتجعلُ الأصواتَ التي تلتقطُها الأذنُ أكثرَ ارتفاعًا. وتهدفُ أجهزةُ السمع المساعدةُ إلى تضخيم مجالٍ صغيرٍ معيّنٍ من الترددات للأشخاص الذين يعانون فقدانَ سمعٍ جزئيًّا. أما عمليّاتُ الزرع في القوقعة فتستخدمُ إلكترودًا يُزرعُ جراحيًّا داخلَ القوقعة، من خلال ثقبٍ خلفَ الأذن الخارجيّة، فتحتُ الإشاراتُ الكهربائيّةُ في الإلكترود العصبَ السمعيَّ مباشرةً، مجاوزةً بالفعل الخلايا الحسّيّةَ كلّها.



القسم 3-2

النغماتُ التوافقيَّةُ
Harmonics

الموجاتُ الواقفةُ على خيطٍ مهتزٍّ

ذكرْنا في فصل «الاهتزازاتُ والموجاتُ» أن الكثيرَ من الموجاتِ الواقفةِ تستطيعُ أن تتشكَّلَ عند تثبيتِ خيطٍ مشدودٍ من طرفَيْه. وجعلُه يهتزُّ، تتألَّفُ الاهتزازاتُ على وترٍ عادةً من عددٍ موجاتٍ واقفةٍ معًا في الوقتِ نفسِه. ولكلٍّ منها طولٌ موجيٌّ وتردُّدٌ مختلفٌ. وهذا يعني أن الأصواتَ التي تسمعُها من آلةٍ وتريَّةٍ، حتى تلك التي تصدرُ بدرجةٍ واحدةٍ، تتألَّفُ في الواقعِ من ترددّاتٍ مضاعفةٍ.

يُظهرُ الجدولُ 3-2 على الصفحةِ التالية عددَ اهتزازاتٍ محتملةٍ على خيطٍ مثاليٍّ طرفا الخيطِ اللذانِ لا يهتزّان يجبُ أن يكونا دائمًا عقدتَيْن (N). أما أبسطُ اهتزازةٍ فقد تحدثُ، فتظهرُ في العمودِ الأول من الجدول 3-2. وفي هذه الحالةِ، يتعرَّضُ مركزُ الخيطِ إلى إزاحةٍ قصوى، ومن ثمَّ فهو بطنٌ (A). وبما أن المسافةَ بين عقدتَيْن متتاليتَيْن هي دائمًا نصفُ طولٍ موجيٍّ، فإن طولَ الخيطِ (L) يجبُ أن يساوي $\lambda/2$. وبذلك يصبحُ الطولُ الموجيُّ ضعفَ طولِ الخيطِ ($\lambda_1 = 2L$).

وكما وردَ في الفصلِ الأول، فإن سرعةَ الموجةِ تساوي التردُّدَ مضروبًا في الطولِ الموجيِّ. ويمكنُ إعادةُ ترتيبِ المعادلةِ كما يلي:

$$f = \frac{v}{\lambda} \text{ أو } v = \lambda f$$

عند تعويضِ قيمةِ الطولِ الموجيِّ في المعادلةِ السابقةِ للتردُّدِ، نحصلُ على:

$$f_1 = \text{التردُّدُ الأساسي} = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$$

تردُّدُ الاهتزازةِ هذا يُسمّى **التردُّدَ الأساسيَّ** fundamental frequency للخيطِ المهتزِّ. بما أن التردُّدَ يتناسبُ عكسيًّا مع الطولِ الموجيِّ، وبما أن الطولَ الموجيَّ أكبرُ فإن التردُّدَ الأساسيَّ يصبحُ أقلَّ ترددٍ محتملٍ للموجةِ الواقفةِ على هذا الخيطِ.

النغماتُ التوافقيَّةُ مضاعفاتٌ تكامليَّةٌ للتردُّدِ الأساسيِّ

الموجةُ الواقفةُ التاليةُ المحتملةُ للخيطِ تظهرُ في العمودِ الثاني من الجدول 3-2. في هذه الحالةِ، يكونُ هناك ثلاثُ عقدٍ بدلَ عقدتَيْن. لذلك يساوي طولُ الخيطِ طولاً موجيًّا واحدًا. وبما أن هذا الطولَ الموجيَّ يساوي نصفَ الطولِ الموجيِّ السابقِ، يكونُ تردُّدُ هذه الموجةِ ضعفَ التردُّدِ الأساسيِّ.

$$f_2 = 2 f_1$$

3-2 مؤشرات الأداء

- يميّز بين المنسلسلات التوافقية للأنابيب المغلقة والمفتوحة
- يحسب النغمات التوافقية لخيط مهتزّ ولأنابيب مغلقة ومفتوحة
- يربط النغمات التوافقية بالجرس لنوع الصوت.

التردُّدُ الأساسيُّ

أقلُّ تردُّدٍ محتملٍ للموجةِ الواقفةِ.

مخطط القسم 2-3: التوافقيات

الوقت المطلوب: 3 حصص (135 دقيقة)

الحصة 6

ركِّز: 5 دقائق

– راجع مؤشرات الأداء الواردة في كتاب الطالب.

حفِّز: 5 دقائق

إيضاح 3

رؤية الأصوات

الهدف: يلاحظ موجات الصوت من مصادر متعدِّدة.

المواد: أوسيلوسكوب، ميكرفون، مضخِّم صوت صغير، مولدات أصوات مختلفة.

الطريقة: صِل الميكروفون والمضخِّم بالأوسيلوسكوب، واعرض على شاشة الأوسيلوسكوب نمط الصوت البشري لمتعلِّمين عدّة يتكلمون أو يقرؤون، مستخدمين الميكروفون، وقارنه مع نمط صوت بتردُّد واحد بإدخال الصوت من مولِّد ذبذبة أو مولِّد موجة جيبية أو شوكة رنّانة أو صوت متعلِّم بدرجة صوت واحدة.

دع بعض المتعلِّمين يستخدموا أوتارًا مهتزة ليلاحظوا التوافقيات الأساسية لكل وتر عند عرضها على شاشة الأوسيلوسكوب.

فكرة مفيدة في التعليم

دع المتعلِّمين يشاهدوا التوافقيات، لتساعدهم على تذكُّر المعادلات المناسبة. يُعدُّ طرفا الوتر المثبَّتان عقدتين. ويكون لأول توافقية (بطن واحد) $L = \frac{1}{2}\lambda$ ومن ثمَّ $\lambda = 2L$، وللتوافقيات الأخرى يستخدم المتعلِّمون الطريقة نفسها مع مضاعفات مناسبة لـ $\frac{1}{2}\lambda$.

درِّس: 35 دقيقة

– الشفافة أ 6، «المتسلسلات التوافقية». تلخص التوافقيات الأربع الأول لوتر مهتز.

استراتيجية بصرية

الجدول 2-3

تأكد أن المتعلِّمين يدركون أن كل بطن يطابق نصف طول موجي.

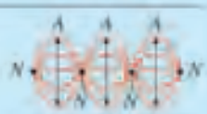
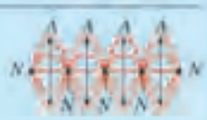
س: جد الطول الموجي λ_5 والتردُّد f_5 للحالة التالية المحتملة في المتسلسلات التوافقية.

ج: $\lambda_5 = \frac{2}{5}L$ ، $f_5 = 5f_1$

فكرة مفيدة في التعليم

أوضح أن التردُّد يعتمد على طول الوتر وسرعة الموجة معًا، كما يظهر في معادلة المتسلسلات التوافقية. ليس شرطًا أن يكون لوترين لهما الطول نفسه التردُّد الأساسي نفسه. قوة الشد في الوتر والكتلة في وحدة طول تؤثران في سرعة الموجة على الوتر. لذا يمكن تغيير التردُّد الأساسي بتغيير أحد هذين العاملَين. فمثلاً يمكن الحصول على تردُّد وطول موجي جديد بتعديل قوة الشدّ فيه. هذا التعديل يغير من سرعة الموجة على الوتر، ومن ثَمَّ التردُّد الأساسي للوتر.

الجدول 2-3 المتسلسلات التوافقية

	$\lambda_1 = 2L$	f_1	التردُّد الأساسي (أو النغمة التوافقية الأولى)
	$\lambda_2 = L$	$f_2 = 2f_1$	النغمة التوافقية الثانية
	$\lambda_3 = \frac{2}{3}L$	$f_3 = 3f_1$	النغمة التوافقية الثالثة
	$\lambda_4 = \frac{1}{2}L$	$f_4 = 4f_1$	النغمة التوافقية الرابعة

ويستمرُّ هذا النمطُ. فيكونُ تردُّدُ الموجة الواقفة الظاهرة في الصفِّ الثالث من الجدول 2-3 ثلاثة أمثال التردُّد الأساسيّ. بشكل عامّ، يكونُ لتردُّدات أنماط الموجات الواقفة كلُّها مضاعفاتٌ تكامليّةٌ للتردُّد الأساسيّ. تشكِّلُ تلك التردُّدات **متسلسلات توافقيّة** harmonic series. التردُّدُ الأساسيُّ (f_1) يقابلُ النغمةَ التوافقيّةَ الأولى. والتردُّدُ الثاني (f_2) يقابلُ النغمةَ التوافقيّةَ الثانية، وهكذا...

بما أنَّ كلَّ نغمةٍ توافقيّةٍ مضاعَفٌ تكامليٌّ للتردُّد الأساسيّ، فمن الممكن تعميمُ معادلة التردُّد الأساسيّ، لتشمل المتسلسل التوافقيّ بأكمله. إذًا، $f_n = nf_1$ حيث f_1 هي التردُّدُ الأساسيُّ ($f_1 = \frac{v}{2L}$). و f_n هي تردُّدُ النغمة التوافقيّة ذات الرقم n. يُكتبُ الشكلُ العامُّ للمعادلة على النحو التالي:

المتسلسلة التوافقية للموجات الواقفة في خيط مهتز

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad , \quad n = 1, 2, 3...$$

$$\text{التردُّد} = \text{رقم التوافقية} \times \frac{(\text{سرعة الموجات في الخيط})}{(2)(\text{طول الخيط المهتز})}$$

لاحظْ أنَّ v في المعادلة تمثِّلُ سرعةَ الموجات في الخيط المهتز. وليس سرعةَ موجات الصوت في الهواء. إذا اهتزَّ الخيطُ بأحد هذه التردُّدات، يكونُ لموجات الصوت الصادرة في الهواء المحيط بالخيط التردُّدُ نفسُه. وسرعةُ هذه الموجات هي سرعةُ موجات الصوت في الهواء، ويكون طولُها الموجيُّ يساوي السرعة مقسومةً على التردُّد.

المتسلسلات التوافقية

متسلسلات من التردُّدات تشمل التردُّد الأساسيَّ ومضاعفاته.

فكرة مفيدة في التعليم

جهاز الذاكرة المستخدم في الوتر المهتز، يمكن استخدامه أيضًا للأنابيب المفتوحة والمغلقة. اطلب إلى المتعلِّمين أن يتخيَّلوا الموجة الواقفة، وأن يتذكروا أن الأطراف الثابتة عقد، والطليقة بطون. إن رسمًا لمخطَّط كل حالة يظهر أن الأنبوب المغلق أحد الطرفين يجب أن يزيد عن الأنبوب المفتوح الطرفين مسافة $\frac{1}{4}\lambda$.

الموجاتُ الواقفةُ في عمودٍ هوائيٍّ

يمكنُ أيضًا تشكيلُ موجاتٍ واقفةٍ في أنبوبٍ داخلَه هواءٌ (عمودٌ هوائيٌّ) كالبوقِ أو المزمارِ. بينما تنتقلُ بعضُ الموجاتِ داخلَ الأنبوبِ، تعكسُ موجاتٌ أخرى في اتِّجاهٍ معاكسٍ لتلكَ الموجاتِ الساقطةِ، فتشكِّلُ موجاتٍ واقفةً.

النغماتُ التوافقيَّةُ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْنِ

المتسلسلةُ التوافقيَّةُ الموجودةُ في أنبوبٍ هوائيٍّ تعتمدُ على ما إذا كانَ طرفُه الماكسُ للموجاتِ مفتوحًا أو مُغلقًا. فإذا كانَ الطرفُ مفتوحًا، كما يظهرُ في الشكلِ 11-2، يكونُ لجزيئاتِ الهواءِ حرِّيَّةٌ كاملةٌ في الحركةِ. لذا يتشكَّلُ بطنٌ (من الإزاحةِ) عندَ هذا الطرفِ. وإذا كانَ الأنبوبُ مفتوحَ الطرفَيْنِ، يتشكَّلُ بطنٌ عندَ كلِّ طرفٍ. وهذا الوضعُ معاكسٌ تمامًا لحالةِ الوترِ المشدودِ والمثبَّتِ عندَ طرفَيْه، حيثُ العقدتانِ.

بما أنَّ المسافةَ بينَ عقدتَيْنِ متتاليتَيْنِ ($\frac{1}{2}\lambda$) تساوي المسافةَ بينَ بطنَيْنِ متتاليَيْنِ، يصبحُ شكلُ نمطِ الموجاتِ الواقفةِ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْنِ شبيهًا بالوترِ المهتزِّ. ومن ثمَّ تتوفَّرُ كلُّ المتسلسلاتِ التوافقيَّةِ في هذه الحالةِ، كما يظهرُ في الشكلِ 11-2. وتكونُ معادلتُنا السابقةُ للمتسلسلةِ التوافقيَّةِ لوترٍ مهتزٍّ صالحةً للاستعمالِ.

المتسلسلةُ التوافقيَّةُ للموجاتِ الواقفةِ في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْنِ

(النغماتُ التوافقيَّةُ كلُّها)

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad , \quad n = 1,2,3...$$

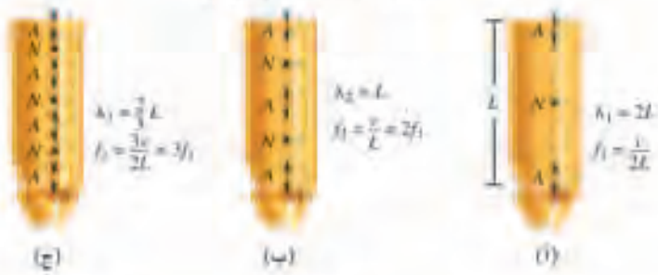
التردُّد = رقم التوافقية $\times \frac{\text{(سرعة الصوت في الأنبوب)}}{(2)\text{(طول عمود الهواء المهتز)}}$

في هذه المعادلةِ، يمثِّلُ L طولَ عمودِ الهواءِ المهتزِّ. فكما يمكنُ لتردُّدِ الآلةِ الوتريَّةِ الأساسيِّ أن يتغيَّرَ بتغيُّرِ طولِ الوترِ، كذلك يمكنُ أن يتغيَّرَ التردُّدُ الأساسيُّ لجميعِ آلاتِ موسيقيَّةٍ مصنوعةٍ من النحاسِ الأصفرِ، وأخرى هوائيَّةٍ مصنوعةٍ من الخشبِ، بتغيُّرِ طولِ عمودِ الهواءِ المهتزِّ.

هل تعلم؟

البوقُ شبيهٌ بأنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْنِ عندَ سدِّ جميعِ ثقوبِه يكونُ طولُ عمودِ الهواءِ المهتزِّ مساويًا تقريبًا لطولِ البوقِ. عندَ فتحِ الثقوبِ واحدًا بعدَ الآخرِ، يتضاءلُ طولُ عمودِ الهواءِ، ويزدادُ بذلكَ التردُّدُ الأساسيُّ.

التوافقيات في أنبوب مفتوح الطرفين



الشكل 11-2
في أنبوبٍ مفتوحِ الطرفَيْنِ، يكونُ كلُّ طرفٍ بطنًا، وتكونُ جميعُ التوافقيَّاتِ موجودةً أمَّا الظاهرةُ منها هنا فهي التوافقيَّاتُ الأولى (أ) والثانيةُ (ب) والثالثةُ (ج)

نشاط عملي سريع

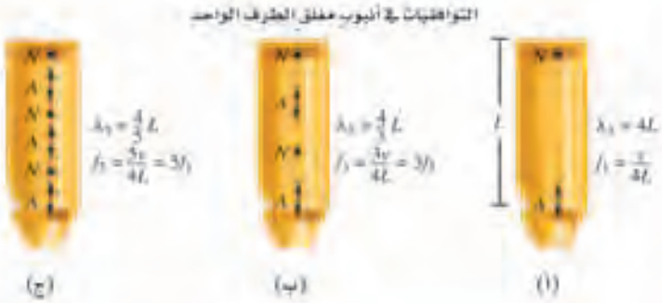
ملاحظات المعلم

يوضح النشاط تأثير طول الأنبوب في درجة الصوت. يفضّل استخدام ماصات ورقية للوصول إلى نتائج مرضية.

يجب أن يكتشف المتعلّمون أنه كلما قصرت المصاصة ازداد التردُّد الأساسي. وقد يصدر عن طول الماصّة نفسه أكثر من نغمة محتملة، بسبب وجود أطوال موجية عدة محتملة للموجات الواقفة لطول معيَّن من الماصّة.

أما تردُّدات الصوت فيمكن ملاحظة أثرها من خلال النفخ على ميكروفون متصل إلى أوسيلوسكوب، ومشاهدة النتيجة على الشاشة.

– الشفافة 14، «توافقيات الأنابيب المفتوحة والأنابيب المغلقة». توضح التوافقيات الثلاث الأولى في أنابيب مفتوحة ومغلقة.



الشكل 12-2
في أنبوب مغلق الطرف الواحد يكون الطرف المغلق عقدة، والطرف المفتوح بطنًا في هذه الحالة توجد التوافقيات المفردة فقط الأولى (أ) والثالثة (ب) والخامسة (ج) كما يظهر في الشكل.

النغمات التوافقيّة في أنبوب مغلق الطرف الواحد

عندما يكونُ أحدُ طرفَيْ أنبوبِ الأُرغُن مغلقًا، كما يظهرُ في الشكل 12-2، تُحصَرُ حركةُ جزيئاتِ الهواء في هذا الطرف فتجعلُه عقدةً. وفي هذه الحالة يصبحُ أحدُ طرفَي الأنبوب عقدةً والآخرُ بطنًا. في النتيجة، يمكنُ أن تتشكّلَ مجموعةٌ مختلفةٌ من الموجات الواقفة.

يظهرُ في الشكل 12-2 (أ) أن أبسطَ موجةٍ واقفةٍ محتملةٍ تحدثُ في هذا الأنبوب هي الموجةُ التي يكونُ فيها طولُ الأنبوب مساويًا لربع الطول الموجيّ. وهذا يعني أن الطول الموجيّ لهذه الموجة الواقفة يساوي أربعةَ أمثالِ طولِ الأنبوب. وفي هذه الحالة، يساوي التردُّدُ الأساسيُّ السرعةَ مقسومةً على أربعةِ أمثالِ طولِ الأنبوب.

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L}$$

في الحالةِ التي يظهرُها الشكلُ 12-2 (ب)، يساوي طولُ الأنبوب ثلاثةَ أرباعِ الطول الموجيّ. أي إن الطولَ الموجيَّ يساوي أربعةَ أثلاثِ طولِ الأنبوب ($\lambda_3 = \frac{4L}{3}$). وبعد تعويضِ هذه القيمةِ في معادلةِ التردُّدِ نحصلُ على تردُّدِ التوافقيّة.

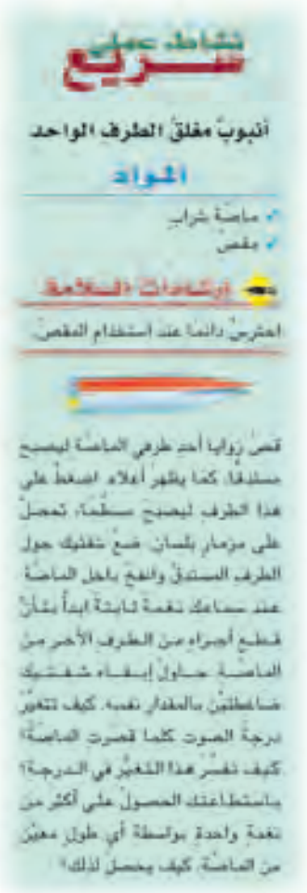
$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{4}{3}L} = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$

تردُّدُ هذه التوافقيّة يساوي ثلاثةَ أمثالِ التردُّدِ الأساسيّ. وبعد إعادةِ الحساب للحالة الظاهرة في الشكل 12-2 (ج)، نحصلُ على تردُّدٍ يساوي خمسةَ أمثالِ التردُّدِ الأساسيّ. ويعني ذلك أن التوافقيّاتِ المفردةَ هي وحدَها تهتزُّ في أنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحد. نعمّمُ معادلةَ المتسلسلةِ التوافقيّةِ لأنبوبٍ مغلقِ الطرفِ الواحد كما يلي:

المتسلسلة التوافقية لأنبوب مغلق الطرف الواحد
(النغمات التوافقيّة المفردة فقط)

$$f_n = n\frac{v}{4L} \quad , \quad n = 1,3,5...$$

التردُّد = رقم التوافقية × $\frac{\text{(سرعة الصوت في هواء الأنبوب)}}{\text{(4)(طول عمود الهواء المهتز)}}$



الحصة 7

(35 دقيقة)

تمرين صفي

يمكن إنجاز هذا التمرين بشكل فريقي، أو كتجربة إيضاحية تستخدم فيها السبّورة أو جهاز إسقاط علوي.

المسألة

توافقيات

وتر غيتار لعبة طوله 34.5 cm.

أ. ما الطول الموجي للتوافقية الأولى؟

ب. عند نقر الوتر، بلغت سرعة الموجات 410 m/s. ما تردُّدات أول ثلاث نغمات توافقية؟

الأجوبة:

أ. 69.0 cm

ب. 590 Hz ، 1200 Hz ، 1800 Hz

طريقة بديلة لحل المثال 2 (ب)

بما أن الأنبوب مفتوح فسوف يتشكَّل بطنان عند الطرفين، ومن ثَمَّ: $L = \frac{1}{2}\lambda_1$ أو

$\lambda_1 = 2L = 2(2.45\ \text{m}) = 4.90\ \text{m}$

نستخدم $f = \frac{v}{\lambda}$ لحساب التوافقية الأولى،

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{345\ \text{m/s}}{4.90\ \text{m}} = 70.4\ \text{Hz}$$

وفي أنبوب مغلق أحد الطرفين، يتشكَّل بطن عند طرف، وعقدة عند الطرف الآخر، ومن ثَمَّ: $L = \frac{1}{4}\lambda_1$ أو $\lambda_1 = 4L = 9.80\ \text{m}$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{345\ \text{m/s}}{9.80\ \text{m}} = 35.2\ \text{Hz}$$

تحسب التوافقيات الأخرى بضرب التوافقية الأساسية في رقم التوافقية، كما هي الحال في مثال 2 (ب).

– مثال 2 (ب)، **ك ط**، ص 57.

مثال 2 (ب)

التوافقيات

المسألة

ما تردُّدُ أوّل ثلاث نغمات توافقيّة في أنبوب مفتوح الطرفَيْن طوله 2.45 m؟ وما تردُّدُها في هذا الأنبوب عند إغلاق أحد طرفَيْه؟ افترضْ أن سرعة الصوت في هواء الأنبوب 345 m/s.

الحل

المعطى: $L = 2.45\ \text{m}$ $v = 345\ \text{m/s}$

المجهول: في حالة الأنبوب المفتوح الطرفَيْن $f_1 = ?$ $f_2 = ?$ $f_3 = ?$

في حالة الأنبوب المغلق الطرف الواحد $f_1 = ?$ $f_3 = ?$ $f_5 = ?$

أختارُ معادلةً أو موقفًا: في حالة الأنبوب المفتوح الطرفَيْن، يُحسبُ التردُّدُ الأساسيُّ باستخدام معادلة المتسلسلة التوافقيّة كاملة.

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad , \quad n = 1,2,3,\ldots$$

وفي حالة الأنبوب المغلق الطرف الواحد، تُستخدمُ المعادلةُ التالية:

$$f_n = n\frac{v}{4L} \quad , \quad n = 1,3,5,\ldots$$

في الحالتَيْن تُحسبُ التوافقيّتان الثانيةُ والثالثةُ بضرب رقم التوافقيّة في التردُّدِ الأساسيّ.

أعوّضُ القيم في المعادلة وأحلّ:

في حالة الأنبوب المفتوح الطرفَيْن:

$$f_n = n\frac{v}{2L} = (1)\left(\frac{345\ \text{m/s}}{(2)(2.45\ \text{m})}\right) = \boxed{70.4\ \text{Hz}}$$

التوافقيّتان التاليتان هما الثانيةُ والثالثةُ:

$$f_2 = 2f_1 = (2)(70.4\ \text{Hz}) = \boxed{141\ \text{Hz}}$$
$$f_3 = 3f_1 = (3)(70.4\ \text{Hz}) = \boxed{211\ \text{Hz}}$$

في حالة الأنبوب المغلق الطرف الواحد:

$$f_n = n\frac{v}{4L} = (1)\left(\frac{345\ \text{m/s}}{(4)(2.45\ \text{m})}\right) = \boxed{35.2\ \text{Hz}}$$

التوافقيّتان التاليتان المحتملتان هما الثالثةُ والخامسةُ:

$$f_3 = 3f_1 = (3)(35.2\ \text{Hz}) = \boxed{106\ \text{Hz}}$$
$$f_5 = 5f_1 = (5)(35.2\ \text{Hz}) = \boxed{176\ \text{Hz}}$$

تأكّدْ من استخدام أرقام التوافقيّات الصحيحة في كلّ حالة. فالأنبوب مفتوح الطرفَيْن: $n = 1,2,3,\ldots$ وفي الأنبوب المغلق الطرف الواحد تتشكّلُ التوافقيّاتُ المفردةُ فقط، بالتالي: $n = 1,3,5,\ldots$

في الأنبوب المفتوح الطرفَيْن يساوي أوّلُ طولٍ موجيٍّ محتملٍ L 2. وفي الأنبوب المغلق الطرف الواحد، يساوي أوّلُ طولٍ موجيٍّ محتملٍ L 4. وبما أن التردُّدَ والطولَ الموجيَّ يتناسبان عكسيًّا، فالتردُّدُ الأساسيُّ في الأنبوب المفتوح الطرفَيْن يكونُ ضعفَ التردُّدِ في الأنبوب المغلق الطرف الواحد، أي $(2)(35.2) = 70.4$.

أجوبة

تطبيق 2 (ب)

1. 440 Hz
2. 260 Hz، 520 Hz، 780 Hz
3. أ. 82.1 Hz
   ب. 115 Hz
   ج. 144 Hz
4. 440 m/s

فكرة مفيدة في التعليم

أوضح التمييز الحاصل بين الأصوات المريحة للطيور والضجيج. عندما تكون أشكال الموجات الفردية منتظمة يتشكّل نمط موجي محصِّل، وبالرغم من أن الموجة معقَّدة فإنها تتألَّف من أنماط متكررة. من ناحية أخرى، عندما لا تكون أشكال الموجات الفردية دورية، لا يكون الشكل الموجي المحصِّل متكرِّرًا. فللأصوات التي تُعدُّ موسيقية فعليًّا أشكال موجية بأنماط متكررة، في حين أن أصوات الضجيج ليست متكرِّرة.

استراتيجية بصرية

الجدول 2-4

أوضح أن العمود الثاني يمثِّل طيفًا من السعات الموجية للتوافقيات الصادرة عن كل آلة.

س: يظهر الجدول 2-4 توافقيات النغمة الموسيقية الطبيعية A بتردُّد 220 Hz. اذكر الترددات الصادرة عن بوق من الشدَّة الكبرى إلى الشدَّة الصغرى.

ج: 660 Hz، 220 Hz، 440 Hz، 1540 Hz، 1100 Hz، 880 Hz

– الشفافة 15، «توافقيات الشوكة الرنانة والمزمار». راجع الجدول 2-4 .

تطبيق 2 (ب)

التوافقيات

1. ما التردُّدُ الأساسيُّ في أنبوب هوائيٍّ مغلق الطرف الواحد طولُه 0.20 m إذا كانت سرعةُ الصوت في الأنبوب 352 m/s؟
2. يبلغُ طولُ بوقٍ (أنبوبٍ مفتوح الطرفَيْن) 66.0 cm تقريبًا. ما تردُّدُ أول ثلاث توافقيات للبوق عندما تكونُ جميعُ المفاتيح مغلقة، بحيثُ يجعلُ طولُ عمود الهواء المهتزّ يساوي تقريبًا طولَ البوق؟ إذا علمْتَ أنّ سرعةَ الصوت داخلَ البوق 340 m/s.
3. ما التردُّدُ الأساسيُّ لوترٍ إذا كانت سرعةُ الموجات على الوتر 115 m/s، والأطوالُ الفعليَّةُ للوتر كما يلي:
   أ. 70.0 cm ب. 50.0 cm ج. 40.0 cm
4. ما سرعةُ الموجات على وترٍ، إذا كان التردُّدُ الأساسيُّ 440 Hz وطولُ الوتر 50.0 cm؟

التوافقيات تحدِّدُ نوعَ الصوت أو جَرْسه

يظهرُ الجدول 2-4 توافقيات الشوكة الرنّانة والمزمار عندما يصدرُ عن كلٍّ منهما النغمةُ الموسيقيةُ A-الطبيعيةُ. لكلِّ آلةٍ خليطٌ خاصٌّ مميّزٌ من توافقيات مختلفة الشدّة.

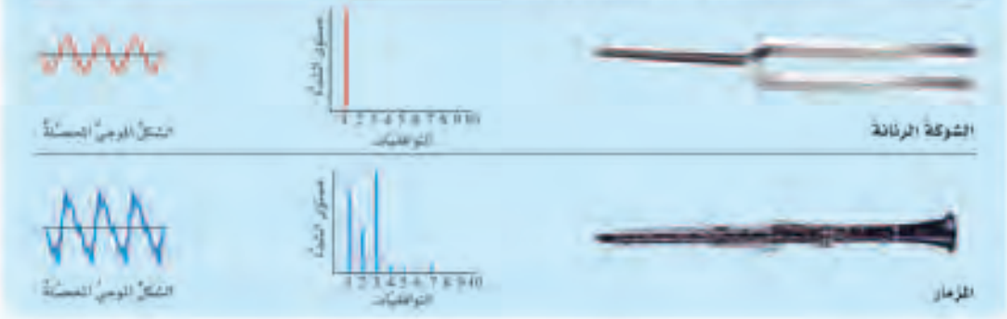
التوافقياتُ الظاهرةُ في العمود الثاني في الجدول 2-4 تُجمَعُ معًا، تبعًا لمبدأ التراكب، لتعطي شكلاً موجيًا محصِّلاً، وهو الذي يظهرُ في العمود الثالث. وبما أن الشوكة الرنّانة تهتزُّ فقط بتردُّدٍ أساسيٍّ، فيكونُ شكلُها الموجيُّ منحنى جيبيًا. الأشكالُ الموجيةُ لآلاتٍ أخرى تبدو أكثرَ تعقيدًا، لأنها تتألفُ من عدَّة توافقيات لكلٍّ منها شدَّةٌ مختلفة. الشكلُ الموجيُّ لكلِّ توافقيةٍ منفردةٍ هو منحنى جيبيٌّ، لكنَّ الموجةَ المحصِّلةَ أكثرُ تعقيدًا من أن تبدو منحنى جيبيًا، لأن لكلِّ شكلٍ موجيٍّ، بمفرده، تردُّدًا مختلفًا.

يُسمّى خليطُ التوافقيات الذي ينتجُ صوتًا مميّزًا لآلةٍ موسيقيةٍ نوعَ الصوت أو الجَرْس timbre. فصوتُ المزمار يختلفُ عن صوت الشوكة الرنّانة بسبب الجَرْس، وإن كانا يصدران النغمةَ نفسها وبالحجم نفسه. وهذا يعني أن وفرةَ توافقيات معظم الآلات تُعطي صوتًا أكثرَ غنًى من صوت الشوكة الرنّانة.

الجَرْس (نوع الصوت)

النغمةُ الذي تنتجُ عن مزيجٍ توافقياتٍ مختلفة الشدّة

الجدول 2-4 توافقيات الشوكة الرنّانة والمزمار



تتغيّرُ شدّةُ التوافقيّةِ لآلةٍ موسيقيّةٍ تبعًا للتردُّدِ وسعةِ الاهتزازةِ وعواملَ أخرى متعدّدةٍ. مع أنّ الأشكالَ الموجيّةَ للمزمارِ أكثرُ تعقيدًا من الأشكالِ الموجيّةِ للشوكةِ الرنّانةِ، فإنّنا نلاحظُ أنّ كلاً منها يتألّفُ من أنماطٍ بسيطةٍ متكرّرةٍ. تلك الأشكالُ الموجيّةُ تُسمّى دوريّةً. تتشكّلُ الأنماطُ لأنّ كلَّ تردُّدٍ هو مضاعفٌ تكامليٌّ للتردُّدِ الأساسيِّ.

التردُّدُ الأساسيُّ يحدّدُ درجةَ الصوتِ

درسْنا في القسمِ 2-1 أنّ تردُّدَ الصوتِ يحدّدُ درجتَه. ففي الآلاتِ الموسيقيّةِ، يحدّدُ التردُّدُ الأساسيُّ للاهتزازةِ، فعليًّا، درجةَ الصوتِ. التوافقيّاتُ الأخرى تُسمّى أحيانًا نغماتٍ توافقيّةً. في مقياسِ السُّلّمِ الموسيقيِّ 12 علامةً. لكلٍّ منها تردُّدُها الخاصُّ. وتردُّدُ العلامةِ الثالثةَ عشرةَ يساوي تمامًا ضعفَ تردُّدِ العلامةِ الأولى. ومعًا تشكّلُ العلاماتُ الثلاثَ عشرةَ ما يُسمّى الجواب. وفي الآلاتِ الوتريّةِ والنفميّةِ المفتوحةِ الطرفِ، يقابلُ تردُّدُ التوافقيّةِ الثانيةِ للعلامةِ تردُّدَ الجوابِ فوقَ تلك العلامةِ.

نافذةٌ على الموضوع
التـردِيد

تُصمَّمُ مبانِي الاجتماعاتِ العامّةِ والمساجدُ وقاعاتُ الحفلاتِ والكنيساتُ لأهدافٍ مختلفةٍ. فبينما تهدفُ إحداها لإحياءِ حفلةٍ، تصمَّمُ الأخرى للمستخدمِ كقاعةِ محاضراتٍ تسمحُ للجميعِ بسماعِ المُحاضِرِ من مكانِه.

وغالبًا ما تصمَّمُ الغرفُ بشكلٍ يسمحُ لصوتِ الخطيبِ أو المتحدّثِ أن يرتدَّ بعدَ اصطدامِه بالسقفِ والجدرانِ والأرضِ. هذا الصدى المتكرّرُ يُسمّى ترديدًا. أمّا زمنُ الترديدِ فهو الزمنُ اللازمُ لينخفضَ مستوى شدّةِ الصوتِ بـ 60 dB.

من أجلِ إلقاءٍ خطبةٍ يجبُ أن تصمَّمَ القاعةُ بشكلٍ يكونُ فيه زمنُ الترديدِ قصيرًا نسبيًّا، فقد يؤدّي الصدى المتكرّرُ إلى تشويشٍ عندَ المستمعينَ.

لهذه الأسبابِ جميعِها نلاحظُ غرفًا في استخدامِ الغرفِ أو القاعاتِ. فالسقوفُ المصمَّمةُ لترديدٍ عالٍ هي عادةً مسطّحةٌ وصلبةٌ. أمّا سقوفُ المكتباتِ والأماكنِ الهادئةِ، فهي غالبًا ما تكونُ ناعمةَ الملمسِ ومغطّاةً بمادةٍ ممتصّةٍ للصوتِ. الأثاثُ المبطّنُ والنباتاتُ الداخليّةُ يتمُّ أيضًا توزيعُها في الداخلِ لامتصاصِ الصوتِ. تؤدّي جميعُ هذه العواملِ المختلفةِ إلى توفيرِ وظيفةٍ سمعيّةٍ للغرفةِ.

مراجعةُ القسمِ 2-3

1. للنغمةِ C الوسطى على وترٍ تردُّدٌ أساسيٌّ يساوي 264 Hz. ما تردُّدُ التوافقيّةِ الثانيةِ لهذه النغمةِ؟
2. إذا كانَ طولُ الوترِ في السؤالِ 1 يساوي 66.0 cm، فما سرعةُ الموجاتِ على هذا الوترِ؟
3. يُعدُّ طرفُ لسانِ المزمارِ عقدةً، وأوّلُ ثقبٍ غيرِ مسدودٍ بطنًا. أمّا المزمارُ فيُعدُّ أنبوبًا مغلقَ الطرفِ الواحدِ. ما المتسلسلاتُ التوافقيّةُ المتكوّنةُ في المزمارِ؟
4. **تفكيرٌ ناقدٌ** أيٌّ مما يلي يختلفُ بين البوقِ والمزمارِ عند عزفِهما نغماتٍ لها التردُّدُ الأساسيُّ نفسُه؟
   أ. الطولُ الموجيُّ للتوافقيّةِ الأولى في الهواءِ.
   ب. التوافقيّاتُ الموجودةُ.
   ج. شدّةُ كلِّ توافقيّةٍ.
   د. سرعةُ الصوتِ في الهواءِ.
   هـ. الطولُ الموجيُّ.

القسم 2-3

نافذةٌ على الموضوع
التردِيد

يتناول نقاش التوافقيات في هذا القسم تداخل الموجات الصوتية الصادرة عن آلة موسيقية فريدة، ويتعرَّض الموضوع إلى التداخل الحاصل بين الصدى وموجات الصوت الأصلية.

إضافات

قد يستغرب المتعلِّمون لدى معرفتهم أهمية الترديد في تصميم الأبنية. ويمكن استغلال هذه المناسبة لمناقشة هندسة الصوت كخيار لمهنة المستقبل لدى المتعلِّمين الذين يرغبون في علم الصوت.

مراجعة القسم
أجـــوبة

1. 528 Hz
2. 348 m/s
3. التوافقيات المفردة
4. ب، ج

اختم: 10 دقائق

– مراجعة القسم، **ك ت ط**، ص 16، «التوافقيات».

واجب منزلي

– تطبيق 2 (ب)، **ك ط**، ص 58، «التوافقيات»، عيِّن الأسئلة 1-4.
– **ك ط**، مراجعة القسم، ص 59، عيِّن الأسئلة 1-4.
– **ك ت ط**، نماذج مسائل «التوافقيات»، ص 40، يستعين المتعلِّم بالمسألة النموذجية لحل تمارين إضافية.
– **ك ط**، مراجعة الفصل، ص 62. عيِّن الأسئلة 22-28.

ملخص الفصل 2

مراجعة وتقويم

الوقت المطلوب: حصتان (90 دقيقة)

الحصة 8

(45 دقيقة)

الفصل 2 مراجعة

يراجع المتعلِّمون محتوى الفصل من خلال أسئلة المراجعة والمفاهيم والتطبيق والمراجعة العامة. تخصَّص الحصة لحل المسائل التي صعبت على المتعلِّمين.

ملخَّصُ الفصل 2

مصطلحاتٌ أساسيَّة

الانضغاط Compression (ص 40)

التخلخل Rarefaction (ص 40)

درجة الصوت Pitch (ص 41)

تأثير دوبلر Doppler effect (ص 44)

شدة الموجة الصوتية Intensity (ص 46)

الديسيبل Decibel (ص 49)

الرنين Resonance (ص 51)

التردد الأساسي Fundamental frequency (ص 53)

المتسلسلات التوافقية Harmonic series (ص 54)

الجرس (نوع الصوت) Timbre (ص 58)

أفكارٌ أساسيَّة

القسم 2-1 موجاتُ الصوت

- تردُّدُ الصوت يحدِّدُ درجته.
- سرعةُ الصوت تعتمدُ على الوسط.
- الحركةُ النسبيَّةُ بين مصدر الموجات والمراقب تُحدثُ تغيُّرًا ظاهريًّا في التردُّد يُسمَّى تأثير دوبلر.

القسم 2-2 شدَّةُ الصوت والرنين

- شدَّةُ الصوت لموجة كرويَّة تساوي القدرة لكل وحدة مساحة.
- شدَّةُ الصوت عند نقطة تتناسبُ عكسيًّا مع مربع المسافة من مصدر الصوت.
- الشدَّةُ والتردُّدُ يحدِّدان أيَّ الأصوات مسموعة.
- مستوى شدَّة الصوت قياسٌ للشدَّة النسبيَّة على مقياس لوغاريتميٍّ.
- الاهتزازةُ القسريَّةُ ذاتُ التردُّد الذي يتطابقُ مع التردُّد الطبيعيِّ للنظام تنتجُ رنينًا.

القسم 2-3 التوافقيات

- التوافقيَّاتُ مضاعفاتٌ تكامليَّةٌ من التردُّدات الأساسيَّة.
- الخيطُ المهتزُّ أو الأنبوبُ المفتوحُ الطرفين ينتجان جميع التوافقيات.
- الأنبوبُ المغلقُ الطرف الواحد ينتجُ التوافقيات المفردة فقط.
- عددُ التوافقيات وشدَّتُها يحدِّدان نوعيَّةَ صوت الآلة التي تُعرفُ أيضًا بالجرس.

رموزُ المتغيِّرات

الكمِّيَة	الوحدة
شدَّة الصوت	W/m^2
مستوى شدَّة الصوت	dB
تردُّد التوافقية n ، f_n	Hz
طولُ خيطٍ مهتزٍّ أو عمودٍ هوائيٍّ L	m

حلِّ مسائل

انظر الملحق (أ) معادلات ملخَّص للمعادلات الواردة في هذا الفصل. عند الحاجة إلى المزيد من التدرين على حلِّ المسائل، راجع الملحق أ: مسائل إضافية.

إجابات

1. لأن جزيئات الهواء تتأرجح في اتجاه موازٍ لاتجاه حركة الموجة.
2. المخطَّطات يجب أن تظهر منحنًى جيبيًّا يبدأ وينتهي عند أدنى نقطة ويتضمن 3 قمم و 3 قيعان.
3. التردُّد قياس موضوعي لمعدل اهتزازة الجسيم، أما درجة الصوت فهي ميزة شخصية تعتمد على المستمع.
4. الموجات تحت السمعية ترددُها أقل من 20 Hz، والموجات المسموعة ترددُها بين 20 Hz و 20 000 Hz، أما الموجات فوق السمعية فترددُها أعلى من 20 000 Hz.
5. الجزيئات ذات الحركة الأكثر (ودرجة حرارة الأعلى) تستطيع نقل الطاقة بسهولة أكثر. وهذا التأثير ليس ظاهرًا بالقدر الكافي في السوائل والأجسام الصلبة، لأن الجزيئات متقاربة.
6. درجة الصافرة تنخفض.
7. لأن أطوالها الموجية تستطيع تصوير الأجسام الصغيرة.
8. يتضاعف التردُّد، السرعة تبقى ثابتة.
9. الصوت ينتقل أسرع عبر الأرض.
10. سائق الحافلة.
11. أكثر من 40 kHz.
12. الشدَّة هي القدرة لكل وحدة مساحة؛ مستوى الشدَّة: الديسيبل هو قياس الشدَّة النسبية.
13. 90 dB، 30 dB، 20 dB، 60 dB (قد تتباين الأجوبة قليلاً.)
14. لأن عتبة السمع تعتمد على التردُّد والشدَّة معًا.
15. عندما تتساوى الاهتزازة القسرية مع التردُّد الطبيعي للنظام المهتز.
16. 9 آلات.
17. لأن الشدَّة تنقص مع المسافة، ولأن الصوت قد انتقل من المصدر إلى السطح العاكس ورجوعًا (وبسبب الانعكاس غير المكتمل).
18. تزداد سعة التأرجح إلى حدِّها الأقصى لدى تطابق معدل الدفعات مع التردُّد الطبيعي للتأرجح.

مراجعةُ الفصل 2

راجعْ وقيِّمْ

موجات الصوت

أسئلة مراجعة

1. لماذا تُعدُّ موجاتُ الصوت في الهواء طوليةً؟
2. ارسم المنحنى الجيبيَّ لموجة الصوت التالية.

3. ما الفرقُ بين التردُّد ودرجة الصوت؟
4. ما الفروقُ بين موجات الصوت تحت السمعيَّة والمسموعة وفوق السمعيَّة؟
5. فسِّر اعتمادَ سرعة الصوت على درجة حرارة الوسط. لماذا يُعدُّ هذا الاعتمادُ لافتًا للنظر في الغاز أكثرَ منه في السائل أو الصلب؟
6. تسمعُ سيارة الإسعاف وأنت واقفٌ على الرصيف. كيف تحدِّدُ، دون أن تنظر، متى تمرُّ بك سيارةُ الإسعاف؟
7. لماذا تكونُ صورُ الأشياء التي تنتجُها الموجاتُ فوق السمعيَّة داخلَ الجسم أكثرَ فاعليَّةً من تلك التي تنتجُها موجاتُ الصوت المسموعة؟

أسئلة حول المفاهيم

8. إذا خُفِّضَ الطولُ الموجيُّ لمصدر صوت إلى نصف ما كانَ عليه، فماذا يحصلُ لتردُّد الموجة؟ وماذا يحصلُ لسرعتها؟
9. نتيجةَ لانفجارٍ بعيد يتحسَّسُ مراقبٌ ارتجاجًا أرضيًّا، ثم يسمعُ دويَّ الانفجار. كيف تفسِّرُ هذا التباطؤ الزمنيَّ؟
10. سيارةُ إطفاء، تُطلقُ صافرتَها، وهي تتحرَّكُ بسرعة 40 m/s. تسيرُ أمامَها سيارةٌ بسرعة 30 m/s. وأمامَها أيضًا حافلةٌ متوقِّفةٌ إلى جانب الطريق. أيُّ المراقبَيْن يسمعُ الصافرةَ بدرجة أعلى، سائقُ السيارة أم سائقُ الحافلة؟
11. خفَّاشٌ يطيرُ في اتجاه جدار، يُصدرُ صوتًا بتردُّد 40 kHz. هل تردُّدُ الصدى الذي يلتقطُهُ الخفَّاشُ أكثرُ من 40 kHz أم أقلُّ منه أم يساويه؟

شدَّةُ الصوت والرنين

أسئلة مراجعة

12. ما الفرقُ بين الشدَّة ومستوى شدَّة الصوت؟
13. استخدم الجدول 2 (القسم 2-2) كدليل إلى تقدير مستوى شدَّة الصوت للأصوات التالية: هتاف الجمهور في مباراة كرة قدم، صوت أوراق هذا الكتاب عند قلبها.
14. لماذا يمثِّلُ عتبةُ السمع منحنى كما في الشكل 2-8 (القسم 2-2)، وليس نقطةً؟
15. تحت أيِّ شروطٍ يحدثُ الرنينُ؟

أسئلة حول المفاهيم

16. آلةٌ في مصنع تصدرُ ضجيجًا بمستوى 80 dB. كم آلةً مماثلةً باستطاعتك إضافتها إلى المصنع دون أن تُجاوزَ 90 dB، الحدَّ المسموحَ به؟
17. لماذا تكونُ شدَّةُ صوت الصدى أقلَّ من الصوت الأصليِّ؟
18. لماذا تكونُ الدفعاتُ على أرجوحة أكثرَ فاعليَّةً إذا أُعطيَتْ على فتراتٍ زمنيَّةٍ معيَّنةٍ ومنتظمة، مما لو أُعطيَتْ عشوائيًّا خلالَ دورة الأرجوحة؟
19. بالرغم من الطلب إلى الجنود السيرَ بخطوٍ واحدٍ، فإنهم يخرقون ذلك عند عبورهم جسرًا. اشرح الخطرَ المحتمل، فيما لو لم يلتزمِ الجنودُ الحيطة.

مسائل تطبيقية

تحلُّ المسألتين 20-21، انظر المثال (1)، ص 46

20. مدرِّبُ فريقٍ رياضيٌّ ينادي بصوتٍ مرتفعٍ حكمَ المباراة الذي يقفُ بعيدًا عنه مسافة 5.00 m. إذا كانتْ قدرةُ

مراجعة الفصل 2

19. الاهتزازات قد تدفع الجسر إلى الحركة، إذا تطابقت مع واحد من التردُّدات الطبيعية للجسم.

20. 70 dB

21. $7.96 \times 10^{-2}\ \text{W/m}^2$

22. التردُّد الأدنى المحتمل للنظام المهتز، يكون أضعافًا كاملة للتردُّد الأساسي.

23. أ. 4.0 m

ب. 2.0 m

ج. 1.3 m

د. 1.0 m

24. لأن الطرف المغلق يكون عقدة، ويكون الطرف المفتوح بطنًا.

25. تُنقل اهتزازات الوتر بفاعلية أكثر إلى الهواء، مما يزيد من شدَّة الصوت.

26. نعم. يساوي هذا الفرق التردُّد الأساسي إذا كان الأنبوب مفتوح الطرفين ويساوي ضعف التردُّد الأساسي إذا كان الأنبوب مغلق أحد الطرفين.

27. الطول الموجي الأول المحتمل للبوق يساوي $2L$ وللمزمار $4L$. بما أن سرعة الصوت هي نفسها، وتبعًا للمعادلة $v = \lambda f$، يصبح التردُّد الأساسي للبوق ضعف التردُّد الأساسي للمزمار.

28. عندما ترتفع درجة الحرارة تزداد سرعة الصوت في الهواء، وبما أن f_1 تتناسب طرديًّا مع v يزداد التردُّد الأساسي بشكل مشابه.

29. 443 Hz، 886 Hz، 1330 Hz

30. 3.0×10^3 Hz

31. أ. 0.52 m

ب. 640 Hz، 960 Hz

32. 20 m ، 2×10^{-2} m

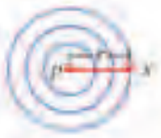
33. 0.20 s

34. أ. 70.1 Hz

ب. 285

صوت المدرّب 3.1×10^{-3} W، فما مستوى شدّة الصوت الذي يصلُ إلى الحكم؟ (ملاحظة: استخدم الجدول 2 في هذا الفصل.)

21. مكبّرُ الصوت P الظاهرُ في الشكل يُصدرُ موجاتٍ صوتيّةً قدرتُها 100.0 W. ما شدّةُ موجاتِ الصوت على النقطة x حيث $r = 10.0$ m؟

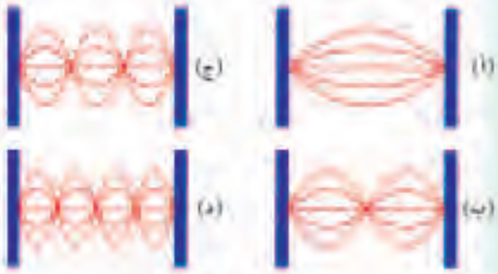


التوافقيات

أسئلة مراجعة

22. ما التردُّدُ الأساسيُّ؟ ما علاقةُ التوافقيّات بالتردُّد الأساسيّ؟

23. الأشكالُ التاليةُ تظهرُ خيطًا مشدودًا ومهتزًّا بعدّة أشكال. إذا كان طولُ الخيط 2.0 m، فما الطولُ الموجيُّ للموجة على الخيط في (أ) و (ب) و (ج) و (د)؟



24. لماذا تختلفُ المتسلسلاتُ التوافقيّةُ لأنبوبٍ مغلق الطرف الواحد عن أخر مفتوح الطرفين؟

أسئلة حول المفاهيم

25. لِمَ يكونُ صوتُ اهتزازِ الوترِ على آلةٍ أعلى مما لو كان مشدودًا على طاولة؟

26. يسجّلُ متعلّمُ التوافقيات العشر الأولى لأنبوب. هل يمكنُهُ تحديدُ ما إذا كان الأنبوبُ مفتوحًا أم مُغلقًا، من خلال مقارنة فرقِ التردُّدِ بين التوافقيّات المتجاورة والتردُّد الأساسيّ؟ أوضحْ ذلك.

27. يشبهُ البوقُ أنبوبًا مفتوحَ الطرفين، بينما يشبهُ المزمارُ أنبوبًا مغلقَ الطرف الواحد. لماذا يكونُ التردُّدُ الأساسيُّ للبوق حوالي ضعفِ التردُّدِ الأساسيِّ للمزمار، علمًا أن لهما الطول نفسه تقريبًا؟

28. التردُّدُ الأساسيُّ لأيِّ نغمةٍ تصدرُ عن البوق تتغيّرُ قليلاً بتغيُّراتِ درجة حرارة الهواء. هل الارتفاعُ في درجة الحرارة، حيال نغمةٍ معيّنةٍ، يُصدرُ تردُّدًا أساسيًّا أعلى قليلاً أم أدنى قليلاً؟

مسائل تطبيقية

لحلّ المسألتين **29-30**، انظر المثال (ب)، ص **57**

29. ما تردُّدُ التوافقيّاتِ الثلاثِ الأولى لنغمةٍ أُحدثَتْ على وترٍ طولُه 31.0 cm، إذا كانت سرعةُ الموجات على هذا الوتر 274.4 m/s؟

30. يبلغُ طولُ قناةِ الأذنِ البشريّةِ حوالي 2.8 cm، ويمكنُ اعتبارُها أنبوبًا مفتوحَ الطرفِ الواحد، ومغلقًا عند طبلة الأذن. حولَ أيِّ تردُّدٍ تتوقّعُ أن يكونَ السمعُ هو الأفضلُ، إذا كانت سرعةُ الصوت في الهواء 340 m/s؟ (ملاحظة: حدِّد التردُّدَ الأساسيَّ لقناة الأذن.)

أسئلة مراجعة

31. لأنبوبٍ مفتوحِ الطرفين تردُّدٌ أساسيٌّ يساوي 320 Hz عندما تكونُ سرعةُ الصوت في الهواء 331 m/s؟

أ. ما طولُ الأنبوب؟

ب. ما التوافقيّتان التاليتان؟

32. يتراوحُ مدى السمعِ البشريِّ بين 20 Hz و 20 000 Hz تقريبًا. جِدِ الطولَين الموجيَّين لهذين التردُّدَين إذا كانت سرعةُ الصوت في الهواء 343 m/s؟

33. يسبحُ دلفينٌ في مياهٍ بحرٍ درجةُ حرارتِها 25°C، فيُصدرُ صوتًا في اتجاهِ القاعِ على عمقِ 150 m. كم يمرُّ من الوقتِ حتى يُسمعَ الصدى؟ (انظرْ سرعةَ الصوت في الجدول 1.)

34. أنبوبٌ مفتوحُ الطرفين طولُه 2.46 m، وسرعةُ الصوت في الهواء داخلَ الأنبوب 345 m/s.

أ. ما التردُّدُ الأساسيُّ لهذا الأنبوب؟

ب. ما عددُ التوافقيّات المحتملة في المدى المسموع؟

35. أنبوبٌ مفتوحُ الطرف، يقابلُ تردُّدهُ الأساسيُّ النغمة المتوسّطة C ($f = 261.6$ Hz)، وأنبوبٌ آخرُ مغلقُ الطرف الواحد يصدرُ توافقيّةً ثالثةً بالتردُّد الأساسيِّ للأنبوب الأول. قارنْ بين طولَي الأنبوبَين.

36. تفيدُ بعضُ الدراساتِ أن الحدَّ الأعلى للتردُّدِ المسموعِ يحدِّدُه قطرُ طبلةِ الأذن، الذي يتساوى عندَ هذا التردُّدِ، مع الطولِ الموجيِّ لموجةِ الصوتِ تقريبًا. إذا كانَ ذلك صحيحًا فكم يكونُ قطرُ طبلةِ أذنِ شخصٍ يمكنُه أن يسمعَ تردُّدًا مقدارُه 2.0×10^4 Hz؟ افترضْ سرعةَ الصوتِ داخلَ الأذنِ 378 m/s.

37. يبلغُ مستوى شدَّةِ الصوتِ لهديرِ طائرةٍ نفّاثةٍ 130 dB على بعدِ 20.0 m من الطائرة.
   أ. ما قدرةُ الصوتِ الذي تحدثُه الطائرةُ؟
   ب. ما شدَّةُ الصوتِ الذي تلتقطُه طبلةُ أذنِ شخصٍ يقفُ عندَ مدرجِ المطارِ على بُعدِ 20.0 m من الطائرة؟ (استخدمْ قيمةَ القطرِ الذي وجدتَه في السؤال 42 لحسابِ مساحةِ طبلةِ الأذن.)

التقارير والمشاريع

1. تمَّ بناءُ مطارٍ يبعدُ مسافةَ 750 m عن مدرستك. يبلغُ مستوى شدَّةِ ضجيجِ الطائرةِ التي تحطُّ على مسافةِ 50 m منها، 130 dB. في الأماكنِ المفتوحةِ كالحقولِ التي تفصلُ بين المدرسةِ والمطارِ، ينخفضُ المستوى 20 dB كلما ازدادت المسافةُ عشرةَ أمثالٍ. قمْ بالانضمامِ إلى فريقٍ متعاونٍ للقيامِ ببحثٍ حولَ الخياراتِ التي من شأنِها الحفاظُ على مستوى محتملٍ من الضجيجِ في المدرسة. إلى أيِّ مسافةٍ يجبُ إبعادُ المدرسةِ ليصبحَ الصوتُ مقبولًا؟ ناقشْ أسعارَ الأراضي قربَ مدرستِك. ما الخياراتُ المتوفّرةُ لعزلِ الصوتِ في مبنى المدرسة؟ كم هي مكلفةُ تلك الخيارات؟ دعْ كلَّ مشاركٍ في المجموعةِ يقدّمُ إيجابياتِ تلك الخياراتِ وسلبيّاتِها.

2. استخدمْ قنانيَ المياهِ لصنعِ آلةِ أنابيبَ هوائيّة. عدِّلْ كميّةَ المياهِ في القنانيِ المختلفةِ لإصدارِ نغماتٍ موسيقيّةٍ. استعملْها كآلاتِ طَرْقٍ أو نفخٍ. ما الوسطُ المهتزُّ في كلِّ حالة؟ ما الذي يؤثّرُ في التردُّدِ الأساسيِّ؟ استخدمِ الميكروفونَ والأوسيلوسكوبَ (مرسمةَ التذبذبات) لتحليلِ أدائك.

3. أجرِ مقابلاتٍ مع أطبّاءَ لتتعلّمَ عن السمعِ. اذكرْ بعضَ أنواعِ الأجهزةِ السمعيّةِ المساعدة، وأوضحْ علاقتَها بالمرضِ والعمرِ والمهنةِ وأخطارِ البيئة. ما الطرقُ والآلاتُ المستخدمةُ لفحصِ السمع؟ كيفَ تعملُ آلاتُ السمعِ المساعدة؟ ما حدودُ إمكانيّاتِ آلاتِ السمعِ المساعدة؟ قدّمْ نتائجَك إلى زملائِك في الصفّ.

4. قمْ ببحثٍ حولَ الصوتيّاتِ المعماريّةِ الخاصّةِ بمعلمٍ. ما بعضُ المشكلاتِ الصوتيّةِ في أماكنَ يتجمّعُ فيها الناسُ؟ ما تأثيرُ الأسقفِ الغريبةِ الشكلِ والأثواحِ الزخرفيّةِ والستائرِ والنوافذِ الزجاجيّةِ في الصدى والضجيج؟ حدِّدِ الأطوالَ الموجيّةَ الأقصرَ للأصواتِ التي يجبُ امتصاصُها، معتبرًا أن أصواتَ المحادثةِ يتراوحُ تردُّدُها بين 500 Hz و 5000 Hz. حضّرْ مخطّطًا أو نموذجًا لكافيتريا مدرستِك، وضمّنْه توصيةً حولَ المقارباتِ التي تستخدمُها للحفاظِ على المستوى الأدنى للضجيج.

التقارير والمشاريع
أجوبة

1. يجب أن تراعي الخطط عتبة الألم (120 dB)، لتحقيق المستويات من 90 dB إلى 70 dB يجب أن تنتقل المدرسة بين 5 km و 50 km، وعزل الصوت يتطلب ورشة عمل على بناء المدرسة وساحاتها.
2. عند القرع على القنّينة تتأرجح المياه. كمية أكبر من المياه تتوافق مع درجة صوت أقل، وعند نفخ الهواء فوق فوهة القنّينة، يتأرجح الهواء، كمية مياه أكبر (هواء أقل) تتوافق مع درجة أعلى.
3. يجب أن تربط تقارير المتعلّمين فيزياء الصوت بالتكوين الفيزيولوجي للأذن وعمل آلات السمع المساعدة وأجهزة الفحص.
4. السطوح الناعمة وغير المنتظمة تخفف من الضجيج، لأنها لا تعكس الموجات الصوتية. الخطط الهادفة إلى تخفيف تأثيرات الصدى قد تتضمن استخدام مسنّنات لتفكيك السطوح الناعمة، أو استخدام مواد عازلة.

مراجعة الفصل 2

35. $L_{\text{مغلق}} = 1.5\,(L_{\text{مفتوح}})$
36. 1.9×10^{-2} m
37. أ. 5.0×10^{4} W
    ب. 2.8×10^{-3} W

الحصة 10

تقويم

- تقويم الفصل، ص 64، يسترشد المتعلِّم بهذا الاختبار لتطوير قدراته في تناول الاختبارات ومراجعة مفاهيم الفصل.
- اختبار الفصل 2، **د ت**، ص 12.
- لائحة أسئلة تقويمية، الفصل 2، **د ت**، ص 42.
- التقارير والمشاريع، **ك ط**، ص 63. راجع المعايير في كتاب التقويم ص 81، ودع المتعلّم يختر للإجابة سؤالاً من الأسئلة الأربعة ويقدم تقريره بعد فترة زمنية يتم الاتفاق عليها.

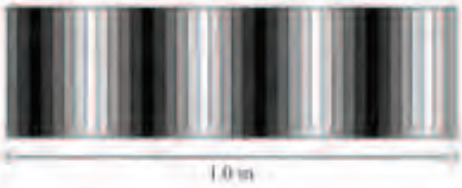
إجابات

1. ب
2. د
3. د
4. د
5. ج
6. أ
7. ب
8. ب

اختيارٌ من متعدد

1. عندما يعبرُ جزءٌ من موجةٍ صوتيّةٍ من الهواءِ إلى الماء، فأيُّ خاصيّةٍ للموجة تبقى نفسها؟
   - أ. السرعة
   - ب. التردُّد
   - ج. الطولُ الموجيُّ
   - د. السعة

2. ما الطولُ الموجيُّ للموجة الصوتيّة الظاهرة في الشكل التالي؟
   - أ. 1.00 m
   - ب. 0.75 m
   - ج. 0.50 m
   - د. 0.25 m



3. إذا تبيَّنَ أن الصوت يرتفعُ، فأيٌّ مما يلي يُحتملُ أنه يزدادُ؟
   - أ. سرعةُ الصوت
   - ب. التردُّد
   - ج. الطولُ الموجيُّ
   - د. الشدَّة

4. تزدادُ شدَّةُ صوتٍ معيَّنٍ بمقدارِ $1000\ w/m^2$، ما الزيادةُ في مستوى شدَّةِ الصوتِ بوحدةِ الديسيبل؟
   - أ. 10
   - ب. 20
   - ج. 30
   - د. 150

5. في أيٍّ مما يلي لا يحدثُ تأثيرُ دوبلر؟
   - أ. مصدرُ الصوتِ يتحرَّكُ في اتِّجاهِ المراقب.
   - ب. المراقبُ يتحرَّكُ في اتِّجاهِ مصدرِ الصوت.
   - ج. المراقبُ والمصدرُ ساكنان أحدُهما بالنسبة إلى الآخر.
   - د. المراقبُ والمصدرُ يتقاربان أو يتباعدان.

6. إذا تضاعفَت المسافةُ عن المصدرِ ثلاثةَ أمثالٍ، فأيُّ عاملٍ تتغيَّرُ شدَّةُ الصوت؟
   - أ. $\frac{1}{9}$
   - ب. $\frac{1}{3}$
   - ج. 3
   - د. 9

7. كيف يستطيعُ كلبُ سماعِ الصوتِ الذي تصدرُه صافرةُ الكلب، ولا يستطيعُ صاحبُه ذلك؟
   - أ. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ شدَّةٍ أقلَّ من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.
   - ب. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ تردُّدٍ أعلى من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.
   - ج. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ تردُّدٍ أدنى من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.
   - د. تلتقطُ الكلابُ أصواتًا ذاتَ سرعةٍ أعلى من الأصواتِ التي يلتقطُها البشرُ.

8. أعلى قيمةٍ تحقَّقَت لسرعةِ الصوتِ في الهواءِ تبلغُ حوالي $1.0 \times 10^2\ m/s$، وأعلى تردُّدٍ يبلغُ حوالي $2.0 \times 10^{10}\ Hz$. ما الطولُ الموجيُّ لموجةٍ صوتيّةٍ واحدةٍ بالسرعةِ والتردُّدِ السابقَين؟
   - أ. $5.0 \times 10^{-6}\ m$
   - ب. $5.0 \times 10^{-7}\ m$
   - ج. $2.0 \times 10^{9}\ m$
   - د. $2.0 \times 10^{14}\ m$

تقويم الفصل 2

9. د

10. ب

11. 750 Hz

12. 0.33 m

13. 0.47 W/m^2

14. 5.0×10^{-5} W

15. 5.0×10^{-17} W

16. 0.363 m

17. 912 Hz

18. 506 Hz

9. تركبُ حافلةٌ تمرُّ بالقرب من سيارةٍ متوقفةٍ. وقد أطلق سائقُ السيارةِ المتوقفةِ صوت المنبِّه، كما يظهرُ في الشكل أدناه. ما طبيعةُ الصوتِ الذي تسمعُه؟

أ. الصوتُ الأصليُّ للمنبِّه بدرجةٍ ترتفعُ.

ب. الصوتُ الأصليُّ للمنبِّه بدرجةٍ تنخفضُ.

ج. صوتٌ يرتفعُ من درجةٍ منخفضةٍ إلى درجةٍ أعلى.

د. صوتٌ ينخفضُ من درجةٍ مرتفعةٍ إلى درجةٍ أقلَّ.

10. للتواقيةِ الثانيةِ لوترٍ آلةٍ ترددٌ قيمتُه 165 Hz. إذا كانت سرعةُ الموجاتِ على الوترِ 120 m/s، فما طولُ الوتر؟

أ. 0.36 m

ب. 0.73 m

ج. 1.1 m

د. 1.4 m

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ قصيرة

11. إذا نفخْتَ على عرضِ فوهةِ قنينةٍ فأحدثْتَ نغمةً بترددٍ 250 Hz، فما ترددُ التواقيةِ الثانيةِ المسموعةِ إذا نفخْتَ بقوةٍ أكبر؟

12. يُظهرُ الشكلُ التالي وترًا مهتزًّا في التواقيةِ السادسة. ما الطولُ الموجيُّ إذا كانَ طولُ الوترِ 1.0 m؟

13. القدرةُ الصادرةُ عن مكبِّرِ صوتٍ 250.0 W. ما شدةُ الصوتِ الذي يسمعُه شخصٌ يجلسُ بعيدًا عن المكبِّرِ مسافةَ 96.5 m؟

أسئلةٌ ذاتُ إجابةٍ مطوّلة

استخدمِ المعلومةَ التاليةَ لحلِّ المسألتين **14-15** مع إظهارِ طريقةِ الحل:

لطبلةِ الأذنِ مساحةٌ تساوي تقريبًا 5.0×10^{-5} m^2.

14. ما قدرةُ الصوتِ الساقطِ على طبلةِ الأذنِ عندَ عتبةِ الألمِ ($1.0\ W/m^2$)؟

15. ما قدرةُ الصوتِ الساقطِ على طبلةِ الأذنِ عندَ عتبةِ السمعِ ($1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$)؟

استخدمِ المعلوماتِ التاليةَ لحلِّ المسائلِ **16-18** مع إظهارِ طريقةِ الحل:

لأنبوبٍ مفتوحِ الطرفين ترددٌ أساسيٌّ يساوي 456 Hz، عندما تكونُ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ 331 m/s.

16. ما طولُ الأنبوب؟

17. ما ترددُ التواقيةِ الثانيةِ للأنبوب؟

18. ما الترددُ الأساسيُّ لهذا الأنبوبِ إذا ارتفعَتْ سرعةُ الصوتِ في الهواءِ إلى 367 m/s نتيجةَ الارتفاعِ في درجةِ حرارةِ الهواء؟