إذا كانت الموسيقى غذاء الفيزياء، فاعزفها. ( انظر شكسبير، اللية الثانية عشرة، السطر1). تحتوي (الأوركسترا) على آلاتٍ وترتّةٍ يعتمد صوتها على الموجات الموقوفة المستعرضة في الأوتار، وتحتوي كذلك على آلات هوائية (نفخ) ينشأ صوتها من أمواج موقوفة طولية لعمود هوائي. أمّا آلات النقر، فتولّد موجاتٍ موقوفة أكثر تعقيدًا. وإلى جانب اختبار مصادر الصوت، سندرس تدريج الديسيبل لمستوى الصوت، واستجابة الأذن، وتداخل موجات الصوت، والضربات، وظاهرة دوبلر، وموجات الصدمة، والهدير (الدّوي) الصوتي، والتصوير فوق الصوتي.

# الفصل 12

# الصـّوت

يرتبط الصوت بحاستنا السمعيّة: أي، بوظيفة آذاننا وسلوك أدمغتنا التي تفسّر المؤثّرات الحسيّة التي تصل إلى آذاننا. كما يعود تعبير" الصوت" أيضًا إلى المؤثّر الفيزيائي الذي يحفز آذاننا: أي، الموجات الطولية.

ونستطيع أن نميز ثلاثة جوانب لأيّ صوت: أولا، يجب أن يكون هناك مصدر للصوت، وكأي موجة، فمصدر الموجة الصوتية هو جسم مهتز. ثانيا، تنتقل الطاقة من المصدر على صورة موجات صوتية طولية. ثالثا، يكشف عن الصوت بواسطة الأذن أو مكبر الصوت (الميكروفون). وفي هذا الفصل، سنتناول بعض سمات الموجات الصوتية ذاتها.

## 1-12 خصائص الصّوت

رأينا في الفصل 11، (الشكل 11-25)، كيف ينتج غشاء الطبل المهتز موجة صوتية في الهواء؛ لأنّ اهتزازات الهواء عادة هي التي ترغم طبلات آذاننا على الاهتزاز. ولكن موجات الصوت أيضًا تستطيع الانتقال في المواد الأخرى.

إذا ضُرب حجران معًا تحت سطح الماء، فيمكن لسابح سماع الصوت تحت السطح؛ لأنّ الاهتزازات تحمل إلى الأذن بواسطة الماء. وإذا وضعت أذنك على الأرض مباشرة ، فإنّك تستطيع سماع أيّ قطار يقترب أو شاحنة، على الرغم من أنّ الأرض لم تلامس طبلة أذنك. في هذه الحالة، تسمى الموجات الطولية المنقولة بواسطة الأرض أيضًا موجات صوتية؛ لأنّ اهتزازاتها تؤدي إلى اهتزاز الأذن الخارجية والهواء داخلها أيضا. ومن الواضح أنّ الصوت لا يستطيع الانتقال دون وجود وسط ناقل. فمثلًا، لا يمكن سماع صوت جرس يقرع داخل ناقوس مفرغ ، كما أنّ الصوت لا يستطيع الانتقال عبر الفراغ في الفضاء الخارجي.

إنّ سرعة الصوت تختلف باختلاف المواد؛ ففي الهواء عند درجة 0°C و 1atm، يسير الصوت بسرعة 331 m/s. سرعة الصوت في أوساط مختلفة مبينة في (الجدول 12-1)، حيث تعتمد هذه القيم إلى حدٍّ ما على درجة الحرارة، وخاصة للغازات. فمثلاً، في الهواء قريبًا من درجة حرارة الغرفة، تزداد السرعة تقريبًا 0.60 m/s لكلّ زيادة درجة مئوية واحدة.

$$v \approx (331 + 0.60T)\ \text{m/s}$$

حيث T درجة الحرارة بـ °C. وإن لم يذكر خلاف ذلك، فسوف نفرض في هذا الفصل أنّ $T = 20°C$، لذلك $v = [331 + (0.60)(20)]\ \text{m/s} = 343\ \text{m/s}$.

**جدول 12-1 سرعة الصوت في عدة مواد (20°C and 1 atm)**

| المادة | السرعة (m/s) |
|---|---|
| الهواء | 343 |
| الهواء (0°C) | 331 |
| الهيليوم | 1005 |
| الهيدروجين | 1300 |
| الماء | 1440 |
| ماء البحر | 1560 |
| الحديد و الفولاذ | ≈5000 |
| الزجاج | ≈4500 |
| ألمنيوم | ≈5100 |
| الخشب الثقيل الصلب | ≈4000 |
| أسمنت | ≈3000 |

سرعة الصوت في الهواء

**المثال المفاهيمي 12-1 البعد عن ومضة برق**

هناك قاعدة أساسية تخبرنا عن بعد منطقة تفريغ البرق عنّا "، إنّها ميل واحد لكلّ خمس ثوان قبل سماع صوت الرعد". ويعزى ذلك إلى أنّ سرعة الضوء كبيرة جدّا $(3 \times 10^8\ \text{m/s})$ حوالي مليون مرة أسرع من الصوت). لذا، فالزمن اللازم لوصول الضوء يكون مهملا مقارنة مع الزمن اللازم للصوت.

**الإجابة:** تبلغ سرعة الصوت في الهواء حوالي 340 m/s؛ وعليه فإنه لقطع مسافة $1\ \text{km} = 1000\ \text{m}$ يستغرق الصوت حوالي ثلاث ثوان، أي أنّ الزمن اللازم للرعد لقطع مسافة ميل واحد هو $(1.6)(3) \approx 5\ \text{sec}$.

**التمرين أ:** ماذا ستكون القاعدة التجريبية (للمثال 12-1) لو أخذنا المسافة بالكيلومترات؟

**تطبيق الفيزياء**

كم يبعد موقع حدوث البرق؟

هناك ميزتان للصوت تبرزان فورا لكلّ سامع بشري هما: "العلو" و "درجة الصوت أو طبقته "؛ فكلّ منهما يعود إلى المؤثر الحسي في السامع. إلا أنّ لكلّ من هذين المؤثّرين الموضوعيين كمية فيزيائية يمكن قياسها. يرتبط (**ارتفاع**) الصوت بالشدة (الطاقة لكلّ وحدة زمن تعبر وحدة المساحات) والموجة الصوتية، التي سنناقشها في الجزء التالي.

ارتفاع الصوت

أما درجة (**طبقة**) الصوت فتعود إلى: هل هي عالية كصوت الكمان أو الناي الصغيرة، أم منخفضة كصوت الطبل الكبير. إنّ الكمية الفيزيائية التي تحدد درجة الصوت هي التردد، كما لاحظها جاليليو أولًا. كلّما كان التردد أقلّ كانت الدرجة أخفض، وكلما كان التردد مرتفعًا كانت الدرجة أعلى* . وتعدّ أفضل أذن إنسان تستجيب للترددات هي التي تتراوح بين 20 Hz إلى حوالي 20,000 Hz.

درجة (طبقة ) الصوت

(تذكر أنّ 1 Hz=1 cycle/s). يسمى هذا المدى من الترددات "**المدى السمعي**". وهذه الحدود تتفاوت من شخص إلى آخر. ولكن هناك اتجاه عام واحد وهو أنه مع تقدم عمر الإنسان، فإنه يصبح غير قادر على سماع الترددات العالية؛ لذلك ينخفض الحد العالي للتردد إلى 10,000 Hz أو أقلّ.

مدى التردد السمعيّ

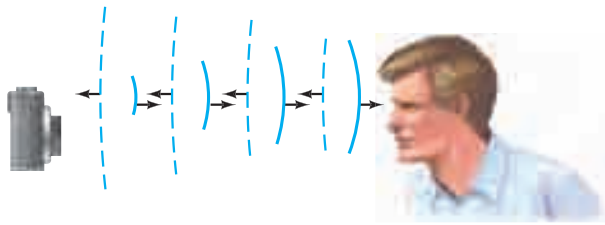
**تنويه:**

إنّ الموجات الصوتية التي تقع ترددتها خارج المدى السمعي قد تصل الأذن، ولكننا لا نشعر بها عادة. وتسمى الموجاتُ التي في حدود 20,000 Hz فوقَ السمعية (ميّز هذا من فائق الصوت الذي يعني أنّ شيئا يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الصوت). وهناك كثير من الحيوانات قد تسمع الترددات العالية؛ فالكلاب مثلا تستطيع سماع حتى 50,000 Hz، والوطواط يستطيع الكشف عن ترددات تصل إلى 100,000 Hz.

لا تخلط بين فوق السمعية (تردد عالي) مع الفائقة السرعة (سوبر سونيك)

إنّ الموجات فوق السمعية لها تطبيقاتٌ كثيرةٌ في مجال الطب ومجالات أخرى كذلك، وهذا ما سنناقشه لاحقًا في هذا الفصل.

* رغم أن درجة الصوت تتحدد بواسطة التردد بصورة رئيسية، لكنها تعتمد قليلًا على علوّ الصوت، فمثلاً، الصوت العالي جدًا يبدو ذو درجة منخفضة عن الصوت الهادي.



**الشكل 12-1** (مثال 12-2). تطلق الكاميرا( آلة التصوير) ذاتية التبئير نبضة فوق صوتية. تبين الخطوط المتصلة مقدمات الموجات المنتشرة نحو اليمين، في حين تمثل الخطوط المتقطعة مقومات الموجات المنعكسة عن وجه الشخص، والتي تعود إلى الكاميرا. وتسمح المعلومات الزمنية لهذه الآلة أن تضبط العدسة على المسافة الصحيحة.

**تطبيق الفيزياء**

تعديل البؤرة ذاتيّا.

## المثال 12-2 تعديل البؤرة ذاتيا بالموجات الصوتية

**تطلق الكاميرات التي تعدّل البؤرة ذاتيًّا نبضةً صوتيّة ذات تردّدٍ عالٍ (فوق صوتية) تنتقل إلى الجسم المراد تصويره، وتحتوي على مجسٍّ يكشف عن الموجات الصوتية الراجعة. احسب زمن الانتقال لنبضة عن جسم يبعد: (أ) 1.0 m. (ب) 20 m.**

**النّهج:** إذا افترضنا أنّ درجة الحرارة 20°C تقريبًا، فإنّ سرعة الصوت ستكون حوالي 343 m/s. وباستعمال هذه السرعة والمسافة الكلية $d$ للذهاب والإياب في كلّ حالة، يمكننا حساب الزمن $(v = d/t)$

**الحلّ:** (أ) تسير النبضة 1.0 m إلى الجسم، ومن ثم 1.0 m للعودة؛ أي أنّ المسافة الكلية 2.0 m. ونحلّ لإيجاد $t$، حيث $v = d/t$:

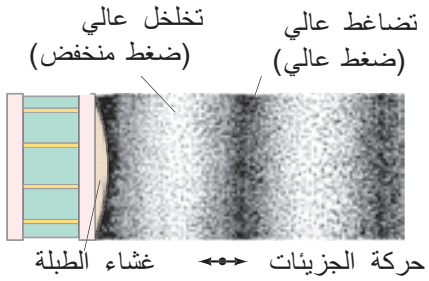
$$t = \frac{d}{v} = \frac{2.0\text{ m}}{343\text{ m/s}} = 0.0058\text{ s} = 5.8\text{ ms}$$

(ب) المسافة الكلية الآن $2 \times 20\text{ m} = 40\text{ m}$ لذلك

$$t = \frac{40\text{ m}}{343\text{ m/s}} = 0.12\text{ s} = 120\text{ ms}$$

**ملحوظة:** هذه الفترات الزمنية قليلة جدًا؛ لذلك فإنّ الانتظار لضبط الكاميرا ليس ملحوظًا

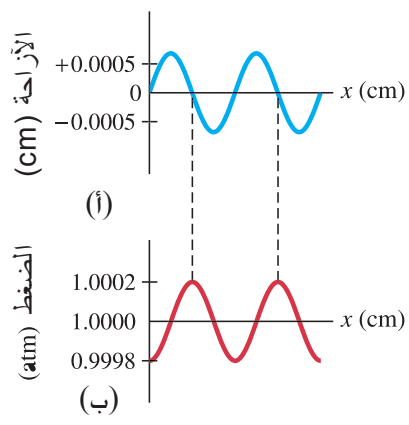
تُسَمّى الموجاتُ الصوتيّةُ التي تقع تردّداتها دون المدى السمعي (أي أقلّ من 20 Hz) **تحتَ سمعية** (infrasonic). وتتضمّن مصادر الموجات تحت السمعيّة الزلازل الأرضية، والرّعد، والبراكين، والموجات الناتجة من الآلات الضخمة المهتزّة. والمصدر الأخير هذا قد يكون مزعجًا للعاملين؛ لأنّ هذه الموجات تحت الصوتية- قد تكون غير مسموعة- قد تسبب التلف لجسم الإنسان. إنّ هذه الموجات منخفضة التردد تعمل بطريقة الرنين، مسببة حركة وأذى لأعضاء الجسم.




**الشكل 12-2** عندما يهتز غشاء الطبل، يضغط الهواء بالتتابع، وعندما يعود إلى الخلف يترك تخلخلا أو تمددا في الهواء. (انظر الشكل 11-25)

في العادة، نصف موجة صوتية بدلالة اهتزاز جزيئات الوسط الذي تنتقل فيه؛ أي بدلالة حركة الجزيئات أو إزاحتها. ولكن الموجات الصوتية يمكن تحليلها أيضًا من منظور الضغط. وفي الواقع، فإنّ الموجات الطولية تُسَمّى أحيانًا موجاتِ الضغط. ويمكن قياس تغير الضغط عادةً على نحوٍ أسهل من قياس الإزاحة. يبين (الشكل 12-2) في "**موجة التضاغط**" (حيث الجزيئات متقاربة)، أنّ الضغط أعلى من المعتاد، أمّا في التمدد (التخلخل) فالضغط أقلّ من المعتاد. ويوضح (الشكل 12-3) تمثيلا بالرسم لموجة صوتية في الهواء بدلالة (أ) الإزاحة. (ب) الضغط. لاحظ أنّ موجة الضغط: عندما يكون الضغط قيمة عظمى أو دنيا، تكون الإزاحة عن موضع الاتزان صفرا؛ وحيث تغير الضغط يكون صفرا، فإنّ الإزاحة تكون نهاية عظمى أو صغرى.

**الشكل 12-3** تمثيل موجة صوتية في الفراغ عند لحظة معينة بدلالة: (أ) الإزاحة. (ب) الضغط.



## 2-12 شدة الصوت : الديسيبل

ارتفاع الصوت

يُعدُّ ارتفاع (علو) الصوت مؤثّرًا حسيًّا في ضمير السامع مثل الطبقة (الدرجة). وترتبط كذلك بكميّةٍ فيزيائية قابلة للقياس هي **شدّة الموجة**. تُعرّف الشدّة بأنّها الطاقة المنقولة بواسطة الموجة في وحدة الزمن عبر وحدة مساحات عمودية على اتجاه تدفق الطاقة. وكما رأينا في الفصل 11، فإنّ الشدة تتناسب مع مربع اتساع الموجة. ووحدات الشدة هي وحدات القدرة لكلّ وحدة مساحة، أو $(W/m^2)$.

**تطبيق الفيزياء**

مدى واسع من سمع الإنسان

تستطيع أذنُ الإنسان كشف أصواتٍ ذات شدّةٍ منخفضةٍ قد تصل إلى $10^{-12}\ W/m^2$، وكذلك أصوات ذات شدّة عالية $1\ W/m^2$ (وربّما أعلى، وهي ضارة إذا كانت أكثر من هذا). إنّ هذا مدى واسع من الشدّة يصل إلى نسبة $10^{12}$ بين الأعلى والأدنى. وبسبب هذا المدى الواسع، فمن المحتمل أنّ ما نفهمه على أنه علو الصوت لا يتناسب طرديّا مع الشدة. ولإنتاج صوت يبدو أنه أعلى بمقدار الضعف؛ يلزمنا موجة صوتية شدتها أكبر بعشر مرّات. وهذا ينطبق بالتقريب على أيّ مستوى للصوت لترددات حول منتصف المدى السمعي. فمثلا، يبدو صوت موجة صوتية شدتها $10^{-2}\ W/m^2$ للإنسان العادي ضعف موجة شدتها $10^{-3}\ W/m^2$، وأربعة أمثال موجة شدتها $10^{-4}\ W/m^2$.

### مستوى الصوت

وحدة *dB*

بسبب هذه العلاقة بين الإحساس الموضوعي لارتفاع الصوت من جهة، والكمية الفيزيائية القابلة للقياس "الشدة" من جهة أخرى، فإنّ مستويات شدة الصوت تقاس عادة على تدريج لوغاريتمي. ووحدة هذا التدريج هي "**بل**"؛ نسبة الى مكتشفها الكسندر جراهام بل. وبعمومية أكثر "**ديسيبل**" (dB)، ويساوي $\frac{1}{10}$ bel (10 dB = 1 bel) مستوى الصوت، $\beta$ ، لأيّ صوت يعرف بدلالة شدته، $I$، مثل

مستوى الصوت (ديسيبل)

$$\beta\ (\text{in dB}) = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad \textbf{(1-12)}$$

حيث $I_0$ شدة مرجع اختياري، واللوغاريتم للأساس 10. $I_0$ تؤخذ عادةً أدنى شدة سمعية للأذن الجيدة "عتبة السمع"، وهي $I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$. فمثلًا، مستوى الصوت الذي شدته $I = 1.0 \times 10^{-10}\ W/m^2$ سيكون:

$$\beta = 10 \log\left(\frac{1.0 \times 10^{-10}\ W/m^2}{1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2}\right) = 10 \log 100 = 20\ \text{dB}$$

**تنويه:**

*dB* 0 لاتعني شدة تساوي صفرا.

لأنّ $\log 100 = 2.0$. لاحظ أنّ مستوى الصوت عند العتبة هو 0 dB؛ أي أن $\beta = 10 \log 10^{-12}/10^{-12} = 10 \log 1 = 0$ لأنّ $\log 1 = 0$. لاحظ أيضا أنّ زيادة الشدة بنسبة تساوي 10 تمثل مستوى صوت 10 *dB*. أما زيادة الشدة بنسبة 100 فتعني زيادة مستوى صوت 20 dB. وهكذا حيث 50 dB يعني 100 مرة أكبر من صوت 30 dB، وهكذا.

كل 10 *dB* تكافىء تغير مقداره 10 مرات تغير في الشدة

الشدة ومستوى الصوت لعدد من الأصوات المعروفة توجد في الجدول 12-2.

**الجدول 12-2 الشدة لأصوات مختلفة**

| مصدر الصوت | مستوى الصوت (dB) | شدة الصوت ($W/m^2$) |
|---|---|---|
| طائرة نفاثة على بعد 30 m | 140 | 100 |
| عتبة الألم | 120 | 1 |
| موسيقى صاخبة | 120 | 1 |
| صفارة على بعد 30 m | 100 | $1 \times 10^{-2}$ |
| سيارة مسرعة 90 km/h | 75 | $3 \times 10^{-5}$ |
| مواصلات عامة | 70 | $1 \times 10^{-5}$ |
| حديث على بعد 50 cm | 65 | $3 \times 10^{-6}$ |
| صوت مذياع هادىء | 40 | $1 \times 10^{-8}$ |
| همس | 20 | $1 \times 10^{-10}$ |
| حفيف أشجار | 10 | $1 \times 10^{-11}$ |
| عتبة السمع | 0 | $1 \times 10^{-12}$ |

### المثال 12-3 شدة الصوت في الطريق العام

عند ناحية شارع مكتظ بالمارة، يكون مستوى الصوت 70 dB. ما شدة الصوت هناك؟

**النّهج:** علينا حلّ (المعادلة 12 - 1)لإيجاد الشدة $I$، ونتذكر أنّ $I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2$.

**الحلّ:** من (المعادلة 12-1)

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

لذلك

$$\frac{I}{I_0} = 10^{\beta/10}$$

لكن $\beta = 70$

$$I = I_0 10^{\beta/10} = (1.0 \times 10^{-12}\ W/m^2)(10^7) = 1.0 \times 10^{-5}\ W/m^2$$

**ملحوظة:** تذكر (ملحق) $x = \log y$ هي نفسها $y = 10^x$.

تطبيق الفيزياء
استجابة السماعة ( ± 3 dB)

### المثال 12-4 استجابة السماعة

تنتج سمّاعةٌ ذاتُ نوعيّةٍ جيّدةٍ ترددّاتٍ تتراوح بين 30 Hz و 18,000 Hz بمستوى صوتٍ منتظم ± 3 dB. أي أنّ مستوى الصوت الناتج لا يتغير بأكثر من 3 dB لمستوى معيَّنٍ لشدة الصوت الداخلة ضمن هذا المدى من الترددات. بأيّ نسبةٍ تتغير الشدة لتغيِّر مستوى الصوت الأقصى ومقداره 3 dB؟

**النّهج:** نفرض أنّ متوسط الشدة هو $I_1$، ومتوسط مستوى الصوت هو $\beta_1$. وبالتالي فإنّ الشدة القصوى $I_2$ ترتبط بمستوى $\beta_2 = \beta_1 + 3\ \text{dB}$. ثم نستعمل العلاقة بين المستوى والشدة، (المعادلة 12-1).

**الحلّ:**

$$\beta_2 - \beta_1 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} - 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

$$3\ \text{dB} = 10\left(\log \frac{I_2}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$= 10 \log \frac{I_2}{I_1}$$

لأنّ $(\log a - \log b) = \log a/b$ (ملحق أ) إذن

$$\log \frac{I_2}{I_1} = 0.30$$

$y = 10^x$ تعني $x = \log y$

أو

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{0.30} = 2.0$$

لذلك ± 3 dB تكافيء مضاعفة الشدة أو تقليلها إلى النصف.

**التمرين ب:** إذا كانت زيادة 3 dB تعني "ضعف الشدة"، فماذا تعني زيادة 6 dB؟

من المهمّ ملاحظة أنّ فرق 3 dB في مستوى الصوت (يعني مضاعفة شدة الصوت كما رأينا قبل قليل) يعني تغيّرًا صغيرًا جدًّا في الإحساس بارتفاع الصوت. وفي الواقع، يستطيع الإنسان العادي أن يميّز فرقًا في مستوى الصوت بحدود 1 أو 2 dB.

وفي العادة، يقل ارتفاع (علو) الصوت أو شدته كلما ابتعدت عن مصدر الصوت. وفي الغرف الداخلية، ينخفض هذا الأثر بسبب الانعكاس من الجدران. وعلى أيّ حال، إذا كان المصدر في حيّزٍ مفتوح، بحيث ينتشر الصوت بحرية في الاتجاهات جميعها، فإنّ الشدة تقلّ مع مقلوب مربع المسافة

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

كما رأينا في (البند 11-9) . وعلى مسافاتٍ بعيدة، تتناقص الشدة بمعدّلٍ أسرع من $1/r^2$؛ لأنّ بعض الطاقة يتحول إلى حركة غير منتظمة لجزيئات الهواء. وهذا الضياع يحدث أكثر عند الترددات المرتفعة. لذا، سيكون أيّ صوتٍ مكوَّنٍ من عدّة ترددات أقلّ "وضوحًا " عند مسافةٍ كبيرة.

تطبيق الفيزياء
ضجيج طائرة نفاثة.

### المثال 12-5 ضجيج الطائرة

مستوى الصوت الذي يقاس على بعد 30 m من طائرةٍ نفّاثةٍ هو 140 dB. ما مستوى الصوت على بعد 300 m؟ (أهمل الانعكاس عن الأرض).

**النّهج:** لأننا أعطينا مستوى الصوت، يمكننا حساب شدة الصوت على بعد 30 m من (المعادلة 12-1) . ولأنّ الشدة تتناقص مع مربع البعد. لذا، نحسب الشدة $I$ على بعد 300 m، ثم نطبق (المعادلة 12-1) مرّةً أخرى لإيجاد مستوى الصوت.

**الحلّ:** الشدة $I$ على بعد 30 m تساوي

$$140\ \text{dB} = 10\log\left(\frac{I}{10^{-12}\ \text{W/m}^2}\right)$$

وبقلب معادلة اللوغارتيمات لايجاد قيمة $I$ نحصل على

$$10^{14} = \frac{I}{10^{-12}\ \text{W/m}^2}$$

ولذلك $I = (10^{14})(10^{-12}\ \text{W/m}^2) = 10^2\ \text{W/m}^2$. وعلى بعد 300 m، أي 10 مرّاتٍ أبعد، ستكون الشدة من قيمتها $(\frac{1}{10})^2 = 1/100$ عند 30 m أي $1\ \text{W/m}^2$. وهكذا:

$$\beta = 10\log\left(\frac{1\ \text{W/m}^2}{10^{-12}\ \text{W/m}^2}\right) = 120\ \text{dB}$$

حتى على بعد 300 m، فإنّ الصوت يكون عند عتبة الألم. ولهذا، يستخدم العاملون في المطارات واقيات للأذن لحماية آذانهم من الضرر (الشكل 12-4).

**ملحوظة:** هنا طريقة أسهل بدلًا من استعمال (المعادلة 12-1) لأنّ الشدة تقلّ مع مربع البعد، فعند 10 أمثال المسافة، تقلّ الشدة بنسبة $\frac{1}{100} = (\frac{1}{10})^2$. ويمكننا استعمال نتيجة أنّ 10 dB تعني تغيّرًا في شدة الصوت بنسبة 10 (انظر المثال السابق 12-3). ولذلك، فإنّ تغيرًا في الشدة بمعامل 100 يقابل تغيرًا في مستوى الصوت مقداره $(2)(10\ \text{dB}) = 20\ \text{dB}$. وهذا يؤكد النتيجة التي حصلنا عليها : $120\ \text{dB} - 20\ \text{dB} = 140\ \text{dB}$.

**الشكل 12-4** (المثال 12-5)عامل في مطار يضع واقية أذن لتقليل شدة الصوت

**التمرين جـ:** إذا ضاعفت بعدك عن مصدر الصوت الذي ينتشر في الاتجاهات جميعها ، فكيف تتغير الشدة التي تسمعها؟ كم dB يتغير مستوى الصوت؟

## *الشدة وعلاقتها بالسعة

تتناسب الشدة $I$ لموجةٍ ما مع مربّع اتساع الموجة $A$، كما ناقشنا في (البندين 9 - 11 و 10 - 11) . وبالتالي يمكن ربط الاتساع كميًّا بالشدة $I$ أو المستوى $\beta$ كما يبين المثال التالي:

### المثال 12-6 الاتساع، كم هو بالغ في الصغر!

احسب اتساع جزيئات الهواء لصوت تردده 1000 Hz عند عتبة السمع.

**النّهج:** وجدنا في (البند 10 - 11) علاقة بين الشدة $I$ واتساع الإزاحة $A$ للموجة، (المعادلة 11 - 18). والمطلوب هو معرفة اتساع الاهتزازة لجزيئات الهواء، ومعلوم معنا الشّدّة.

**الحلّ:** عند عتبة السمع $I = 1 \times 10^{-12}\ \text{W/m}^2$ (الجدول 12-2) نحلّ (المعادلة 11 - 18) لإيجاد الاتساع $A$

$$A = \frac{1}{\pi f}\sqrt{\frac{I}{2\rho v}}$$

$$= \frac{1}{(3.14)(1.0 \times 10^3\ \text{s}^{-1})}\sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-12}\ \text{W/m}^2}{(2)(1.29\ \text{kg/m}^3)(343\ \text{m/s})}}$$

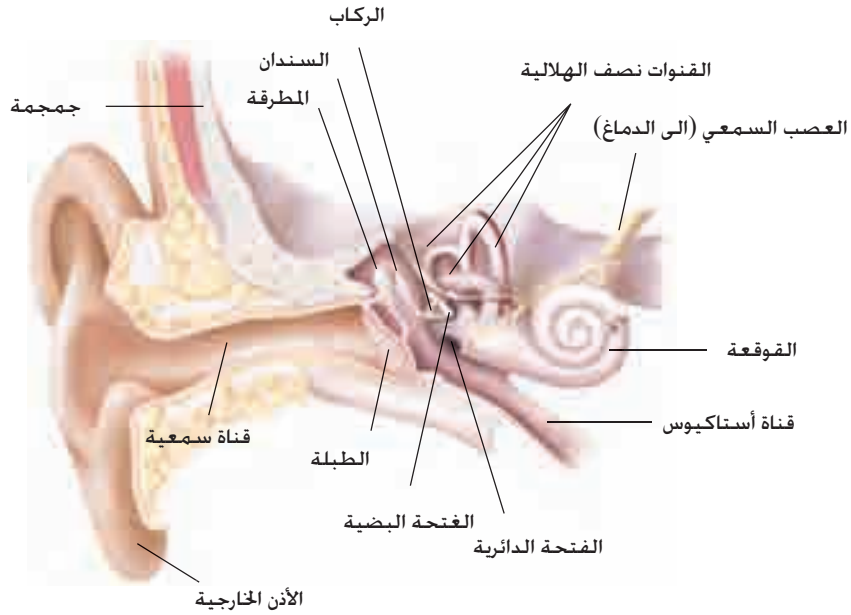
$$= 1.1 \times 10^{-11}\ \text{m},$$

حيث افترضنا كثافة الهواء $1.29\ \text{kg/m}^3$ وسرعة الصوت في الهواء 343 m/s (عند $20°\text{C}$).

**ملحوظة:** كم هي حساسة أذن الإنسان الفائقة! إنّها تستطيع الكشف عن إزاحات جزيئات الهواء التي هي في الواقع أقل من قطر الذرة (حوالي $10^{-10}$ m).

**تطبيق الفيزياء**
الحساسية الفائقة للأذن

تكشف الأذن إزاحات أقل من حجم الذرات.




**الشكل 12-5** رسم لأذن الإنسان

## * 12-3 الأذن واستجابتها : ارتفاع الصوت

إنّ أذن الانسان كاشفة للصوت لأنّها ذات حساسية فائقة. والكاشفات الميكانيكية (الميكروفون) تستطيع بالكاد منافسة الأذن في كشف الأصوات ذات الشدة القليلة.

يتلّخص عمل الأذن في تحويل الطاقة الاهتزازية للموجات إلى شارات كهربائية تُحمل إلى الدماغ بواسطة الأعصاب. وأمّا عمل الميكروفون، فهو قريبٌ من هذا: حيث تصطدم الموجات الصوتية بغشاء الميكروفون فيبدأ بالاهتزاز، ومن ثمّ تتحول هذه الاهتزازات إلى شارات كهربائية بالترددات نفسها والتي يتمّ تكبيرها، وبعد ذلك ترسل إلى السماعة أو جهاز التسجيل. سوف نناقش عمل الميكروفون عندما ندرس الكهرباء والمغناطيسية في فصول لاحقة. أمّا الآن فسنناقش تركيب الأذن وعملها.

**تطبيق الفيزياء**
أذن الانسان

يظهر (الشكل 12 - 5) رسما لأذن الإنسان؛ تتكون الأذن من ثلاثة أجزاء رئيسة هي: الأذن الخارجية، والأذن الوسطى، والأذن الداخلية. ففي الأذن الخارجية، تنتقل موجات الصوت القادمة من الخارج عبر القناة السمعية إلى طبلة الأذن فتهتز استجابة للموجات الساقطة. أمّا الأذن الوسطى، فتتكون من ثلاث عظيمات هي: المطرقة، والسندان، والركاب، التي تحول بدورها اهتزازات الطبلة إلى الأذن الداخلية عبر الفتحة البيضوية. هذا النظام الرقيق من الروافع المتصل بالطبلة ذات المساحة الكبيرة نسبة إلى مساحة الفتحة البيضوية يؤدي إلى تضخيم الضغط حوالي 40 مرة. في حين تتكون الأذن الداخلية من قنوات نصف هلالية، ودورها مهمٌّ جدًّا في ضبط التوازن، وكذلك القوقعة المملوءة بالسائل، والتي تحوّل الطاقة الاهتزازية للصوت إلى طاقة كهربائية ترسل إلى الدماغ.

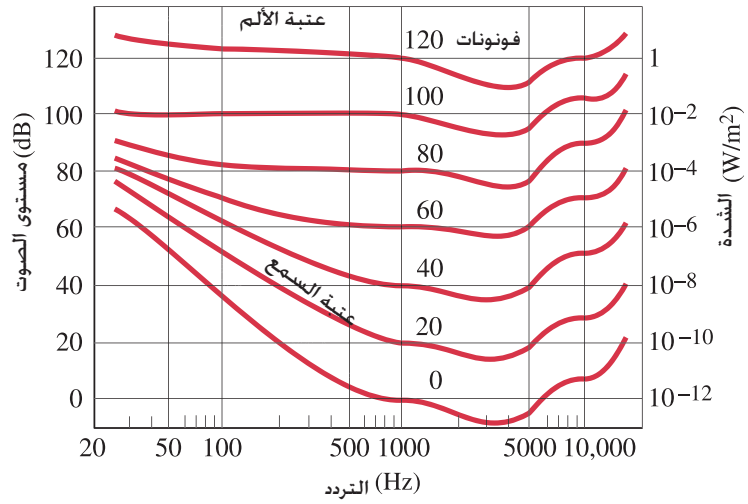
### * استجابة الأذن

حساسية الأذن

الأذن ليست حساسة بالدرجة نفسها للتردّدات جميعها؛ فسماع ارتفاع الصوت نفسه لترددات مختلفة يتطلب شدات مختلفة. وقد بينت الدراسات التي أجريت على أعدادٍ كبيرةٍ من الأفراد المنحنيات الظاهرة في (الشكل 12 - 6) . وفي هذا الرسم يمثل كلّ منحنى أصواتا بدت متساوية الارتفاع.

ارتفاع الصوت (بـ phons).

يمثّل الرقم المبيّن على كلّ منحنىً مستوى الارتفاع (وحداته تُسَمَّى Phons)، والذي يساوي عدديًّا مستوى الصوت بـ dB عند 1000 Hz. فمثلا المنحنى المشار اليه بِـ 40 يمثّل أصواتًا تسمع من الشخص المتوسط لها الارتفاع نفسه كصوت تردده 1000 Hz ومستواه الصوتي 40 dB. ومن هذا المنحنى ذي 40 phon نرى أنّ نغمة ترددها 100 Hz يجب أن يكون مستواها الصوتي 62 dB كي تدرك ارتفاع نغمة ترددها 1000 Hz وارتفاعها 40 dB.




**الشكل 12-6**
حساسية أذن الانسان كدالة في التردد (انظر النّص). لاحظ أنّ تدريج التردد " لوغاريتمي" لتغطية مدى واسع من الترددات.

يمثّل المنحنى السفليُّ في (الشكل 12-6 المشار إليه بـ 0) مستوى الصوت كدالة بالتردد لعتبة السمع، وأنّ أرهف صوت سيسمع بأذن جيّدةٍ جدًّا. لاحظ أنّ حساسيّة الأذن كبيرةً للتردّدات بين 2000 و 4000 هيرتز، وهذه شائعة في الحديث والموسيقى. لاحظ أيضًا أنّه حيث يكون صوت تردده 1000 Hz مسموعًا وارتفاعة 0 dB، فإنّ صوتًا تردّده 100 Hz ولكن بارتفاع حوالي 40 dB سيكون مسموعًا أيضًا. يمثّل المنحنى الأعلى في (الشكل 12-6) المشار اليه بِـ 120 phons عتبةَ الألم. والأصوات الأعلى من هذا المستوى يمكن الشعور بها، ولكنّها تسبب ألما.

(الشكل 12 - 6) يوضّح أنّه عند الأصوات ذات المستوى المنخفض، تكون آذاننا أقلّ حساسية للترددات العالية والمنخفضة مقارنة مع الترددات المتوسطة. إنّ جهاز التحكم في الارتفاع في أنظمة المجسم مصممة لتعويض قلّة الحساسية هذه. وعندما يقلّ الحجم، فإنّ جهاز تحكم الارتفاع يرفع الترددات المنخفضة والعالية نسبة إلى الترددات المتوسطة، بحيث يكون تردد الصوت متوازنا. إلا أنّ كثيرًا من المستمعين يجدون أنّ الصوت أكثر إمتاعا إن لم يتم التحكم بالارتفاع.

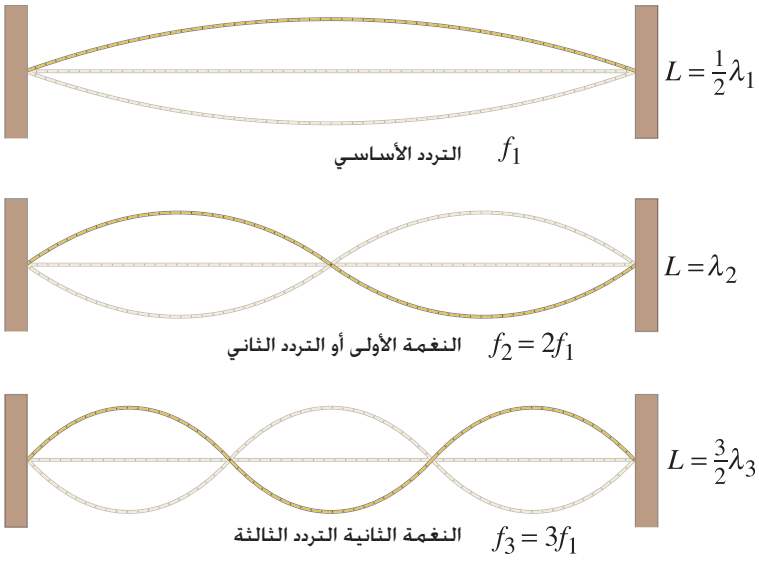
## 4-12 مصادر الصوت: الأوتار المهتزة والأعمدة الهوائية

إنّ مصدر أيِّ صوتٍ هو جسمٌ مهتز. وعلى الأغلب، فإنّ أيّ جسم يمكن أن يهتز ويصبح مصدرًا للصوت. وسنناقش الآن بعض المصادر البسيطة للصوت، خاصة الأدوات الموسيقية: ففي الآلات الموسيقية يوضع الجهاز في حالة اهتزاز عن طريق: الضرب، أو النقر، أو التقوس، أو النفخ. تنتج موجات واقفة، ويهتز المصدر بترداداته الطبيعة. ويكون المصدر المهتز على اتصال مع الهواء (أو أيّ وسط آخر) ويدفعه لإنتاج موجات صوتية تنتشر نحو الخارج. وتكون ترددات الموجات مساويةً لتردّد المصدر، ولكن مع اختلاف السرعة وطول الموجة. الطبل له غشاءٌ مشدودٌ يهتز. الكسايلوفون والمرمبة (Xylophone and marimbas) لهما قضبان خشبيّة أو فلزيّة تجعلها تهتز. كما أنّ الأجراس وغيرها تستعمل المعادن المهتزة أيضًا. إلّا أنّ أكثر الأدوات المستعملة تستخدم الأوتار المهتزة، كالكمان، والقيثارة، والبيانو. أمّا بعضها الآخر فيستخدم الأعمدة الهوائية المهتزة، كالناي، والبوق، وأنابيب الأرغون. وقد رأينا سابقًا أنّ التردّد يحدّد درجة الصوت. بعض التردّدات النموذجيّة للنغمات الموسيقية على " السلم الموسيقي" مبينة في (الجدول 12-3) للجواب الثماني الذي يبدأ بـ $C$ الوسطى. لاحظ أنّ ثماني واحد يعني مضاعفة التردد. فمثلًا تردد C الوسطى هو 262 Hz، ولكن $C'$ ( C فوق C الوسطى) لها ضعف التردد، 524 Hz. [الوسطى هي نغمة "do" على لوحة مفاتيح البيانو].

**جدول 12ـ3 السّلّم الموسيقي ***

| النغمة | التردد (Hz) |
|---|---|
| C | 262 |
| C# أو D♭ | 277 |
| D | 294 |
| D# أو E♭ | 311 |
| E | 330 |
| F | 349 |
| F# أو G♭ | 370 |
| G | 392 |
| G# أو A♭ | 415 |
| A | 440 |
| A# أو B♭ | 466 |
| B | 494 |
| $C'$ | 524 |

*تم أخذ أوكتان واحد فقط بالحسبان




**الشكل 12-7** موجات موقوفة في وتر - الترددات الثلاثة المنخفضة هي المبينة فقط.

## الآلات الموسيقية الوترية

تطبيق الفيزياء
الآلات الوترية.

رأينا في الفصل 11، (الشكل 11 - 40) كيف تتكوّن الموجات الواقفة في وتر، وسنبيّن ذلك مرة أخرى في (الشكل 12 - 7) . وهذه الموجات الواقفة في الأساس هي للآلات الوتريّة جميعها. تُحدّد الدرجة عادةً بتردد الرنين الأصغر الأساسي الذي يتضمن تكوين عقد عند الأطراف فقط. إنّ الوتر الذي يهتزّ كاملًا نحو الأعلى والأسفل يكافىء نصف طول موجة، كما هو مبين في أعلى (الشكل 12 - 7) ؛ ولذلك يكافىء طول الموجة للنغمة الأساسية مثلي طول الوتر. إذن، فالتردد الأساسي هو $f_1 = v/\lambda = v/2L$، حيث $v$ سرعة الموجة في الوتر. والترددات الممكنة للموجات الواقفة في وتر مشدود هي أعداد صحيحة من النغمة الأساسية

$$f_n = nf_1 = n\frac{v}{2L}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

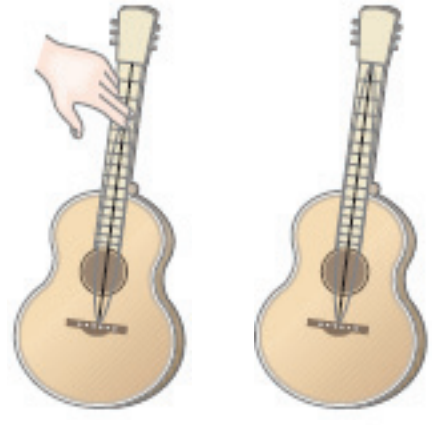
(تمامًا كما في المعادلة 11 - 19 ب)، حيث $n$=1 تعود للتردد الأساسي و $n = 2, 3, \cdots$ هي الحل. الموجات الواقفة كلها, $n = 1, 2, 3, \cdots$ تسمى التوافقيات*، كما رأينا في (البند 11-13) .

عند وضع الأصبع على وتر قيثارة أو كمان، فإنّ الطول الفاعل للوتر يقصر. لذلك، فإنّ تردده الأساسي ودرجته يصبحان أعلى لأنّ طول الموجة يصبح أقصر (الشكل 12-8).

إنّ طول الأوتار جميعها في القيثارة أو الكمان متساوية، ولكنّها تصدر أصواتًا مختلفة الدرجة؛ لأنّ الأوتار لها كتلة لكلّ وحدة طول $m/L$ ، مختلفة، وهي تؤثر في السرعة $v$، (المعادلة 11-13) ،

$$v = \sqrt{F_T/(m/L)} \qquad \text{[وتر مشدود]}$$

وعليه، تكون السرعة في وتر أثقل أقلّ، وكذلك فإنّ التردد لطول الموجة نفسها أقلّ، كما قد يختلف الشد $F_T$ كذلك. ويعدّ تغيير الشد الوسيلةَ لتنغيم الدرجة لكلّ وتر. أما في البيانو والقيثارة، فإنّ الأوتار لها أطوال مختلفة. وللنغمات المنخفضة، تكون الأوتار أثقل وليس فقط أطول، وسبب هذا موضح في المثال التالي.




**الشكل 12-8** طول الموجة (أ) الوتر غير المحترك أطول منه. (ب) وتر موضوع عليه أصبع. لذا، فإن تردد الوتر الذي عليه الأصبع أكبر. هنا وتر واحد مبين على هذه القيثارة والموجة الواقفة الأبسط، الأساسية، هي الوحيدة الموضحة.

### المثال 12-7 أوتار البيانو.

المفتاح الأعلى على البيانو يعني ترددا مقداره نحو 150 مرةً مقدار تردد المفتاح السفلي. إذا كان طول الوتر للنغمة العليا 5.0 cm، فما الطول الذي يكون لوتر النغمة السفلية إذا كانت الكتلة لكلّ وحدة طول متساوية وتحت الشد نفسه؟

**النّهج:** بما أنّ $v = \sqrt{F_T/(m/L)}$ فإنّ السرعة تكون متساوية في كلّ وتر.
لذلك يكون التردد متناسبا عكسيّا مع الطول $(f = v/\lambda = v/2L)$ .

* عندما تكون ترددات الرنين فوق الأساسي (أي الحل) أعدادًا صحيحة من النغمة الأساسية، كما هو الحال هنا، فإنّها تُسَمّى توافقيّات. ولكن إذا كانت هذه الترددات (الحل) ليست أعدادًا صحيحةً من النغمة الأساسية، كاهتزاز الطبل، فلا تُدعى عندئذٍ توافقيات.

**الحلّ:** يمكننا كتابة النسبة للنغمات الأساسية لكلّ وتر كما يلي:

$$\frac{L_L}{L_H} = \frac{f_H}{f_L}$$

حيث تشير L وH إلى أخفض النغمات وأعلاها على التردد. وهكذا

$$L_L = L_H(f_H/f_L) = (5.0\,\text{cm})(150) = 750\,\text{cm}$$

أو

$$= 7.5\,\text{m}$$

وهذا طول غير مناسب لبيانو.

**ملحوظة:** تصنع الأوتار الطويلة للترددات المنخفضة بصورة ثقيلة. ولذلك حتى في البيانو العملاق، فإنّ الأوتار تكون أقلّ من 3 m.

(أ)

(ب)

**الشكل 12-9** (أ) البيانو يبين الصفيحة التي تثبت فيها الأوتار.(ب) صندوق المصوات (القيثار).

**المثال 12-8** **الترددات والأطوال الموجية في الكمان**

وتر كمان طوله 0.32 m ينغم ليعزف النغمة A فوق النغمة الوسطى C عند تردد 440 Hz. (أ) ما طول موجة الاهتزازة الأساسية للوتر؟ (ب) ما طول الموجة والتردد للموجات الصوتية الناتجة؟ (جـ) لِمَ هذا الاختلاف؟

**النّهج:** طول موجة الاهتزازة الأساسية للوتر تساوي ضعف طول الوتر (الشكل 12-7). عند اهتزاز الوتر، يدفع الهواء، وهو بدوره يجبر على الاهتزاز عند تردد الوتر نفسه.

**الحلّ:** (أ) من (الشكل 12-7) ، طول موجة النغمة الأساسية هو

$$\lambda = 2L = 2(0.32\,\text{m}) = 0.64\,\text{m} = 64\,\text{cm}$$

وهذا هو طول الموجة الواقفة في الوتر.

(ب) موجة الصوت التي تنتشر بعيدا في الهواء (للوصول إلى الأذن) لها التردد 440 Hz نفسه. وطول موجتها هو

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\,\text{m/s}}{440\,\text{Hz}} = 0.78\,\text{m} = 78\,\text{cm}$$

حيث $v$ سرعة الصوت في الهواء (عند درجة 20°C) ، (البند 12-1)

(جـ) يختلف طول موجة الصوت عن طول الموجة الواقفة في الوتر؛ لأنّ سرعة الصوت في الهواء 343 m/s، وهي تختلف عن سرعة الموجة في الوتر ($= f\lambda = 440\,\text{Hz} \times 0.64\,\text{m} = 280\,\text{m/s}$) التي تعتمد على كلّ من الشد في الوتر وكتلة وحدة الأطوال فيه.

**ملحوظة:** إنّ الترددات في الأوتار وفي الهواء هي ذاتها: الوتر والهواء في حالة تماس، والوتر "يجبر" الهواء على الاهتزاز عند التردد نفسه. ولكن الأطوال الموجيه مختلفة؛ لأنّ سرعة الموجة في الوتر تختلف عنها في الهواء.

**تنويه:**

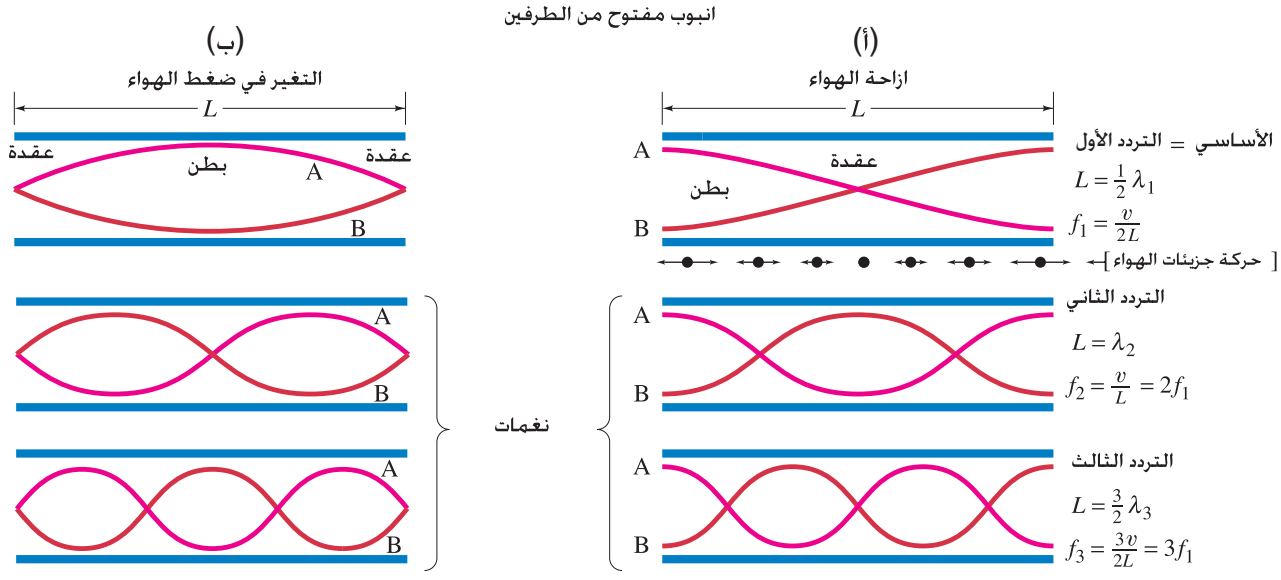
سرعة الموجة في الوتر المشدود ≠ سرعة الموجة الصوتية في الهواء.

إنّ الآلات الوترية لن تكون عالية الصوت إذا اعتمدت على أوتارها المهتزة للحصول على الموجات الصوتية؛ لأنّ الأوتار رفيعة لتضغط الهواء وتمدّده. لذا، فإنّ الآلات الوترية تستفيد من مكبرات ميكانيكية تعرف بـ "لوحة المصوات (البيانو) أو صندوق المصوات (القيثارة ، الكمان) التي تعمل على تكبير الصوت بوضع مساحة سطح أكبر على اتصال مع الهواء (الشكل 12-9) وعندما تهتز الأوتار، تبدأ الصفيحة المصوات أو الصندوق المصوات بالاهتزاز أيضًا. ولأنّ لها مساحة سطح واسعة على اتصال بالهواء، يمكنها توليد موجة صوتية أكبر شدّة. أمّا في القيثارة الكهربائية، فليست هناك أهمية لصندوق المصوات؛ لأنّ الموجات تكبر إلكترونيا.

## آلات النفخ الموسيقية

تنتج الآلات الموسيقية كآلات النفخ النحاسية، وأنابيب الأرغون الصوتَ من اهتزازات الموجات الواقعة في عمود من الهواء داخل أنبوب، (الشكل 12 - 10). وهنا، يمكن أن تتكون الموجات الواقفة في الهواء في أيّ تجويف، إلا أنّ الترددات الواقفة تكون معقدة حتى لأبسط الأشكال مثل أنبوب الناي المنتظم أو أنبوب الأرغون. في بعض الآلات كالمزمار المهتز، وشفتا العازف تساعد في تكوين اهتزازات في العمود الهوائي. وفي آلات أخرى، يوجه تيار هواء نحو حافة الفتحة أو الفم مما يؤدّي إلى اضطراب يولّد الاهتزازات. وبسبب هذا الاضطراب، وبصرف النظر عن مصدره، فإنّ الهواء يهتز في الأنبوب بترددات متنوعة، ولكن الترددات التي تأتي من موجات واقفة هي التي ستدوم فقط.

**الشكل 12-10** من آلات النفخ: المزمار والناي




**الشكل 12-11** رسومات لثلاث اهتزازات بسيطة ( موجات واقفة) لأنبوب منتظم مفتوح الطرفين ("أنبوب مفتوح"). هذه الاهتزازات الأبسط مبينة في: (أ) إلى اليسار بدلالة إزاحات الهواء. (ب) إلى اليمين بدلالة ضغط الهواء. كلّ رسم يبيّن هيئة الموجة في لحظتين A، و B ، بينهما نصف الزمن الدوري. الحركة الحقيقية للجزيئات لإحدى الحالات، النغمة الأساسية، مبينة مباشرة تحت الأنبوب إلى قمة اليسار.

**في الوتر مثبت الطرفين، (الشكل 12-7) ، تتكون موجات واقفة لها عُقَدٌ (دون حركة) عند نهايتي الوتر، وواحد أو اكثر من البطون (اتساع كبير للاهتزاز) بينهما. والعقدة تفصل بطنين متتاليين. تحوي الموجة الواقفة ذات التردد الأقلّ الأساسية بطنا واحدا. وتُسَمّى الموجات الواقفة ذات الترددات الأكثر (الحل) أو التوافقيات، كما رأينا في (البند 11 - 13). بالتحديد، فإنّ التوافقي الأول هو الأساسي، والتوافقي الثاني (هو الجواب الأول) وله ضعف تردد الأساسي، وهكذا.**

**إنّ الوضع مشابه لعمود من الهواء في أنبوب منتظم القطر، ولكن علينا تذكّر أنّ الهواء نفسه هو الذي يتذبذب. ويمكننا وصف الموجات إما بدلالة تدفق الهواء؛ أي بدلالة إزاحات جزيئات الهواء، أو بدلالة الضغط في الهواء. (انظر الشكلين 12-2 و12-3). بدلالة الإزاحة، الهواء عند الطرف المغلق للأنبوب هو عقدة إزاحة حيث الهواء ليس حرّ الحركة هناك، أما بالقرب من النهاية المفتوحة للأنبوب فسيكون هناك بطن؛ لأنّ الهواء يستطيع الحركة بحرية نحو الداخل والخارج. والهواء داخل الأنبوب يتحرك بشكل موجات طولية واقفة. يبين (الشكل 12-12) أنماط الاهتزاز المحتملة لأنبوب مفتوح من طرف واحد ومغلق في الطرف الآخر (يسمى أنبوبا مغلقا). ] إذا كان الأنبوب مغلق الطرفين وليس له اتصال بالهواء الخارجي فهو عديم الفائدة كآلة موسيقية[ . الأشكال في الفرع (أ) من الرسم (على باليمين) تمثل اتساع الإزاحة للهواء المهتز في الأنبوب. لاحظ أنّ هذه رسومات، أما جزيئات الهواء الحقيقية فتهتز أفقيا موازية لطول الأنبوب، كما هو مبين بالأسهم الصغيرة في الرسم العلوي (بالشكل 12-2 أ) على اليمين. يعتمد الموقع الحقيقي للبطن قرب طرف الأنبوب المفتوح على قطر الأنبوب، ولكن إذا كان القطر صغيرا مقارنة بالطول، وهي الحالة المعتادة، فإنّ البطن يحدث قريبًا جدًّا من الطرف كما هو مبين. وسوف نفرض أنّ هذه هي الحالة في ما سيتبع. (قد يعتمد موقع البطن على طول الموجة وعوامل أخرى).**

**دعنا ننظر بالتفصيل إلى الأنبوب المفتوح، في (الشكل 12-11أ) ، والذي قد يكون أنبوب أرغون أو ناي. الأنبوب المفتوح له بطن إزاحة عند كلتا النهايتين لأنّ الهواء حرّ الحركة عند النهايات المفتوحة. ويجب أن تكون هناك عقدة واحدة على الأقلّ في الأنبوب المفتوح إذا كانت هناك موجة واقفة. تمثل عقدة واحدة التردد الأساسي للأنبوب. ولأنّ المسافة بين عقدتين متتاليتين، أو بين بطنين متتاليين هي $\frac{1}{2}\lambda$، فإنّ هناك نصف طول موجة ضمن طول الأنبوب للحالة البسيطة الأساسية (الشكل العلوي 12-11 أ): $L = \frac{1}{2}\lambda$ أو $\lambda = 2L$ إذن، فالتردد الأساسي هو $f_1 = v/\lambda = v/2L$، حيث $v$ هي سرعة الصوت في الهواء (الهواء في الأنبوب).**

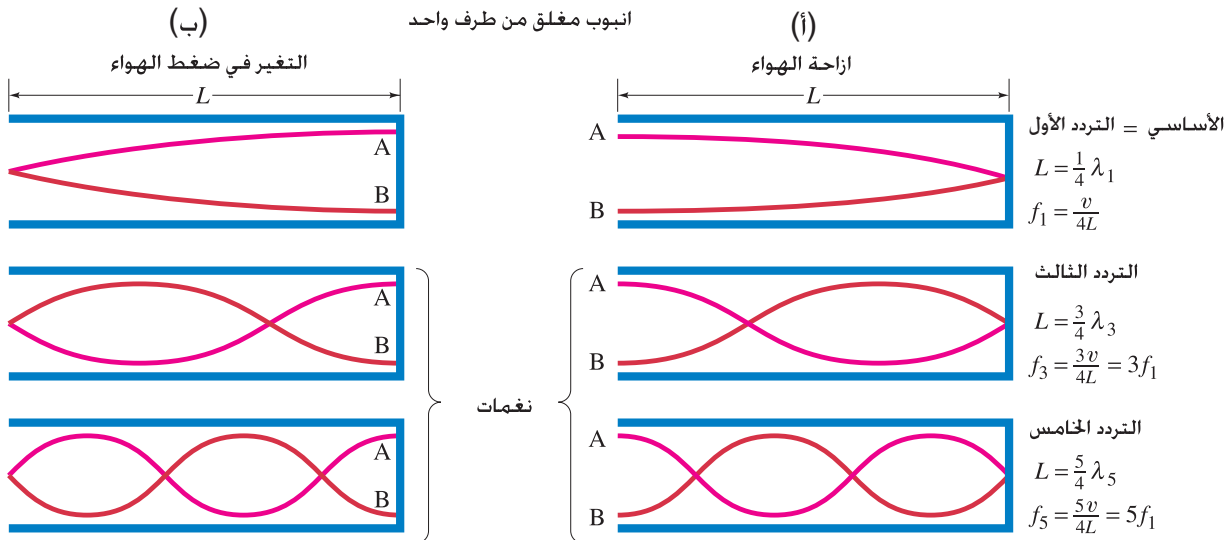
**إنّ الموجة الواقفة بعقدتين هي الجواب الأول أو التوافقي التالي، وله نصف طول الموجة $(L = \lambda)$ وضعف التردد الأساسي. وبالفعل، فإنّ تردد كلّ جواب هو عدد صحيح من تردد النغمة الأساسية في أنبوب منتظم مفتوح الطرفين، كما هو مبين في (الشكل 12-11أ) . وهذا هو نفسه ما نجده في حالة الوتر.**

**تطبيق الفيزياء**

آلات النفخ

الأنبوب المفتوح

تنتج الأنابيب المفتوحة التوافقيات جميعها.




**الشكل 12-12** أنماط الاهتزاز (موجات موقوفة) لأنبوب مغلق من طرف واحد (" أنبوب مغلق). انظر التعليق على (الشكل 12-11).

## الأنبوب المغلق

تنتج الأنابيب المغلقه توافقيات فردية فقط.

في حالة الأنبوب المغلق المبيّن في (الشكل 12-12 أ) ، والذي قد يكون أنبوب أرغون، هناك دائمًا عقدة إزاحة عند الطريق المغلق (الهواء ليس حرّ الحركة) وهناك بطنٌ عند الطرف المفتوح (الهواء حرّ الحركة). وبما أنّ المسافة بين العقدة والبطن الذي يليها هي $\frac{1}{4}\lambda$، فإننا نرى أنّ التردد الأساسي في الأنبوب المغلق يقابل ربع طول موجة ضمن طول الأنبوب: $L = \lambda/4$ و $\lambda = 4L$. وعليه، فإنّ التردد الأساسي يساوي $f_1 = v/4L$، أو نصف ذلك للأنبوب المفتوح ذي الطول ذاته. وهناك فرق آخر نراه في (الشكل 12-12 أ)، وهو أنّ التوافقيات الفردية موجودة فقط في الأنبوب المغلق: الحل لها ترددات ..., 7 , 5 , 3 مضروبة في التردد الأساسي. ليس هناك أيّ مجال موجات بـ ..., 6 , 4 , 2 مضروبة في التردد الأساسي، لأنّ هذا يتطلب عقدة عند أحد الطرفين، وبطنا عند الطرف الآخر، ولذلك لا يمكن أن تكوّن موجات موقوفة في أنبوب مغلق.

وهناك طريقة أخرى لتحليل الاهتزازات في أنبوب منتظم عن طريق وصف الاهتزازة بدلالة الضغط في الهواء، المبين في الفرع (ب) من (الشكلين 12 - 11 و 12-12) (الجوانب على اليسار). إذا كان الهواء مضغوطا، فسيكون الضغط أكبر، أما في تخلّل (تمدّد) الموجة، فيكون الضغط أقلّ من الضغط العادي. النهاية المفتوحة للأنبوب مفتوحة على الضغط الجوي. لذا، يجب أن يكون التغيرُ في الضغط عند النهاية المفتوحة عقدةً؛ الضغط لا يتغير، ولكنه يبقى مساويا للضغط الجوي الخارجي. وإذا كان للأنبوب طرف مغلق، فإنّ الضغط عند هذا الطرف يتفاوت ليكون أعلى من الضغط الجوي أو أقلّ. لذا، هناك "بطن" ضغط عند النهاية المغلقة للأنبوب. ويمكن أن يكون هناك عقد وبطون داخل الأنبوب. يبين (الشكل 12 - 11ب) بعض الاهتزازات الممكنة بدلالة الضغط لأنبوب مفتوح . في حين يبين (الشكل 12-12ب). هذا لأنبوب مغلق.

### المثال 12-9 أنابيب الأرغون

ماذا سيكون تردد النغمة الأساسية، وأول ثلاثة أجوبة لأنبوب أرغون طوله 26 *cm* عند درجة 20°C إذا كان (أ) مفتوحا؟ (ب) مغلقا؟

**النّهج:** حساباتنا جميعها مبنيّة على (الشكل 12-12أ) .

**الحلّ:** (أ) للأنبوب المفتوح، (الشكل 12-11أ) ، التردد الأساسي هو

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{343\ \text{m/s}}{2(0.26\ \text{m})} = 660\ \text{Hz}$$

السرعة $v$ هي سرعة الصوت في الهواء (الهواء المهتز في الأنبوب). وتتضمّن الحلّ التوافقيات : 1320 Hz، و 1980 Hz، و 2640 Hz وهكذا.

(ب) للأنبوب المغلق، (الشكل 12-12 أ) ، التردد الأساسي هو

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{343\ \text{m/s}}{4(0.26\ \text{m})} = 330\ \text{Hz}$$

الحل الفرديّة فقط هي التي تكون موجودة: الحل الثلاثة الأولى هي 990 Hz ، و 1650 Hz، و 2310 Hz.

**ملحوظة:** يعزف الأنبوب المغلق 330 Hz والذي- من (الجدول 12 - 3) - يكون $E$ فوق $C$ الوسطى، أمّا الأنبوب المفتوح الذي له الطول نفسه فيعزف 660 Hz، أي أعلى بنغمة ثمانية.

تُستعمل أنابيب الأرغون مفتوحةً ومغلقةً بأطوالٍ من سنتمتراتٍ قليلةٍ إلى 5 m أو أكثر. والتصّرف في الناي كأنبوب مفتوح؛ لأنّها مفتوحة من الطرف الذي ينفخ فيه، ومن الطرف المقابل كذلك. ويمكن الحصول على نغمات مختلفة في الناي بتقصير طول عمود الهواء المهتز، من خلال عدم تغطية الفتحات على امتداد الأنبوب(لذا، يحصل بطن إزاحة عند الفتحة). وعليه، كلّما كان طول عمود الهواء المهتز أقصر، كان التردّد الأساسي أكبر.

### المثال 12-10 الناي (الشَّبَّابة)

تُصمّم الناي بحيث تعزف نغمةً (262 Hz) C كنغمةٍ أساسيّةٍ عندما تكون الفتحات كلّها مغلقة (مغطاة). تقريبًا، كم يجب أن يكون طول المسافة من الفم (المزمار) إلى الطرف البعيد؟ (هذا تقريبي فقط؛ لأنّ البطن لا يحدث تمامًا عند المزمار). افرض أنّ درجة الحرارة 20°C.

**النّهج:** عندما تكون الفتحات كلّها مغلقة (مغطاة). يكون طول عمود الهواء المهتز هو الطول الكلي للناي. سرعة الصوت في الهواء عند 20°C هي 343 m/s. ولأنّ النّاي مفتوحة الطرفين، نستعمل (الشكل 12-11) : التردد الأساسي $f1$ يرتبط بالطول $L$ من خلال $f = v/2L$

**الحلّ:** نحلّ لإيجاد $L$، نجد

$$L = \frac{v}{2f} = \frac{343\ \text{m/s}}{2(262\ \text{s}^{-1})} = 0.655\ \text{m}$$

**التمرين د:** لمعرفة سبب قيام عازفي آلات النفخ بـ "تسخين" آلاتهم (كي تكون في تناغم)؛ أوجد تردّد الناي الأساسي في (المثال السابق 12 - 10) عندما تكون الفتحات كلّها مغلقة، ودرجة الحرارة 10°C بدلًا من 20°C.

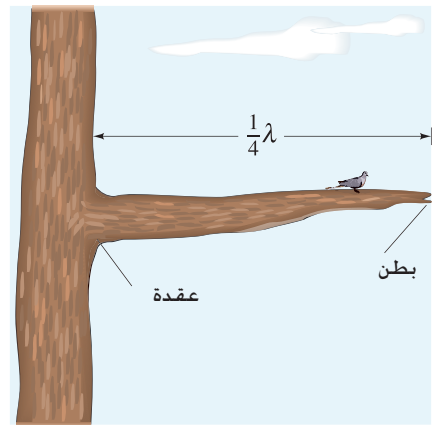
### المثال 12-11 قدّر ترددات ضجيج الرياح

قد تكون الرياح مزعجة: فتعصف بالأشجار، وتخرج من المداخن أصواتًا كالعويل، فما الذي يسبب هذا الضجيج؟ وحول أيّ مدى من الترددات يتوقّع سماعه؟

**النّهج:** يسبّب هبوب الرياح اهتزازات أغصان الأشجار وتأرجحها. (أو عمود الهواء في المدخنة)، حيث تنتج موجات الصوت بالتردّد نفسه . تشكل نهايةُ غصن الشجرة المثبتة بالجذع عقدةً، أما النهاية الثانية فحرّة الحركة. لذا، فستكون بطنًا. إذن، غصن الشجرة حوالي $\frac{1}{4}\lambda$ (الشكل 12-13).

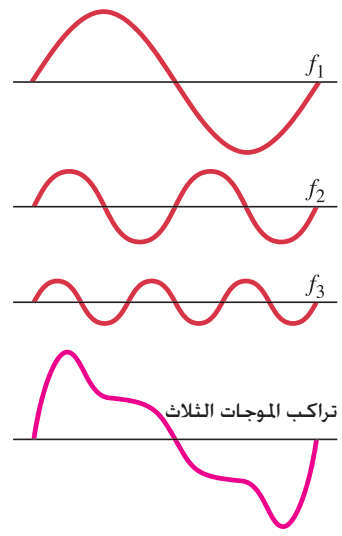
الحلّ: نقرب $v \approx 4000\ \text{m/s}$ لسرعة الصوت في الخشب (الجدول 12-1). افرض أنّ طول غصن الشجرة $L \approx 2\ \text{m}$. وبالتالي، $\lambda = 4L = 8\ \text{m}$ و $f = v/\lambda = (4000\ \text{m/s})/(8\ \text{m}) \approx 500\ \text{Hz}$

ملحوظة: يمكن أن تبدأ الريح بهزّ الهواء داخل المدخنة، وهذا يشبه إلى حدّ كبير أنبوب الأرغون أو الناي. المدخنة أنبوب طويل، وقد يصل طولها إلى 3m، وتعمل كأنبوب مفتوح عند طرف واحد أو طرفين. فإذا كانت مفتوحة الطرفين $(\lambda = 2L)$، ومع $v \approx 340\ \text{m/s}$ نجد أنّ $f_1 \approx v/2L \approx 56\ \text{Hz}$ وهي عبارة عن نغمة منخفضة؛ فلا غرابة إذن إنْ أصدرت المدخنة هذا الدّويّ.



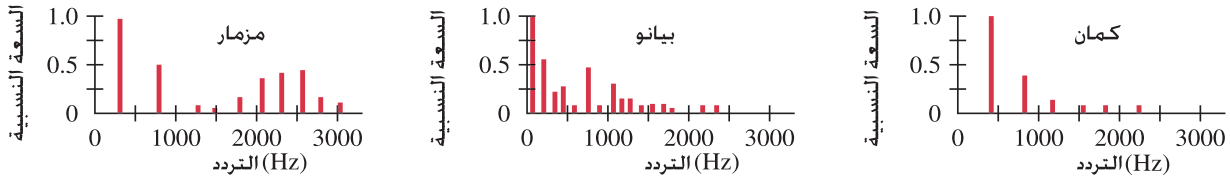

الشكل 12-13 (المثال 12-11)

الشكل 12-14 اتساعات التردد الأساسي وأول جوابين يضافان عند كلّ نقطة للحصول على "المجموع" أو شكل الموجة المركبة.




## * 12-5 نوع الصوت، والضجيج؛ التراكب

عندما نسمع صوتًا، وخاصةً الصوت الموسيقي، فإنّنا نكون على علمٍ بارتفاعه ودرجته، ومجال ثالث كذلك يدعى "النوع". فمثلًا، عندما يعزف بيانو وناي نغمةً ذات الارتفاع والدرجة نفسيهما (مثلا C)، نجد أنّ هناك فرقًا واضحًا في الصوت بصورة عامة، حيث نستطيع التمييز بسهولة بينهما. وهذا ما يقصد بنوع الصوت. ومن هنا نستعمل كلمتي "جرس" "ولون النغمة" للآلات الموسيقية. ويمكن ربط كلّ من الارتفاع والدرجة بكميّات فيزيائية، ويمكن كذلك قياسهما، وينطبق هذا على نوع الصوت أيضًا، حيث يعتمد نوع الصوت على وجود الحل: عددها واتساعها النسبي. وبصورةٍ عامة، عند عزف نغمة ما على آلة موسيقية، فإنّ النغمة الأساسية والحل تكونان موجودتين في الوقت نفسه. يوضح (الشكل 12 - 14) كيف ينطبق (البند 12 - 11) مبدأ التراكب لثلاثة أشكال من الموجات، ففي هذه الحالة، النغمة الأساسية وجوابان (مع اتساعات محددة) يضافان معًا عند كلّ نقطة لإعطاء شكل موجة حركية. وهناك في العادة أكثر من جوابين يكونان موجودين.




**الشكل 12-15** أطيافٌ صوتيّةٌ لآلاتٍ موسيقيّةٍ مختلفة. تتغيّر الأطياف عندما تعزف الآلات نغماتٍ مختلفة. أمّا المزمار فمعقد نوعًا ما؛ فهو يعمل كأنبوب مغلق عند الترّدّدات المنخفضة بوجود التوافقة الفردّية فقط. ولكن عند الترّدّدات العالية توجد التوافقيات كلّها كما في الأنبوب المفتوح.

(يمكن تحليل أيّ موجةٍ معقّدةٍ إلى تركيبٍ من موجاتٍ جيبيّة باتساعات، وأطوال موجة وترددات مناسبة. ويُسَمّى مثل هذا التحليل **تحليل فوريه**).

تختلف الاتساعات النسبية لنغمة معينة باختلاف الآلات الموسيقة، وهي التي تميز نوع الصوت الخاص لكلّ آلة وجرسه. يبين الرسم بالأعمدة الاتساعات النسبية للتوافقيات لنغمة ما في آلة موسيقية معينة، والتي تسمى طيف الصوت. وهناك أمثلة نموذجية متعددة لآلات موسيقية مختلفة موضحة في (الشكل 12 - 15) . إنّ أكبر اتساع يكون عادة للنغمة الأساسية، وترددها هو الذي يسمع ويحدّد الدرجة.

إنّ الطريقة التي تعزف بها الآلة الموسيقية تؤثر بقوة في نوع الصوت؛ فجذب وتر القيثار على سبيل المثال يعطى صوتا مختلفا تماما عن سحب قوس عليه. كما نلاحظ أنّ طيف الصوت عند البداية (أو النهاية) لنغمة (عند ضرب وتر بيانو) يكون مختلفا تمامًا عمّا هو عليه في النغمة اللاحقة. وهذا يؤثر أيضًا في نوع نغمة الآلة الموسيقية.

إنّ الصوت العادي كالصوت الناتج من ضرب حجرين معًا يعدّ ضجيجًا له نوعٌ معيّن، ولكن درجته ليست واضحةً تمامًا؛ والسبب هو أنّ مثل هذه الضجة مزيج من الترددات ذات علاقة ضعيفة فيما بينها. كما أنّ الطيف الصوتي المكون من هذه الضجة سوف لا يبني خطوطا كالتي في (الشكل 12 - 15). بل سيعطي طيفًا متصلًا من الترددات أو قريبًا من ذلك. مثل هذا الصوت ندعوه "ضجيجا" بالمقارنة مع الأصوات التوافقية التي تحتوي ترددات هي مضاعفات بسيطة من النغمة الأساسية.

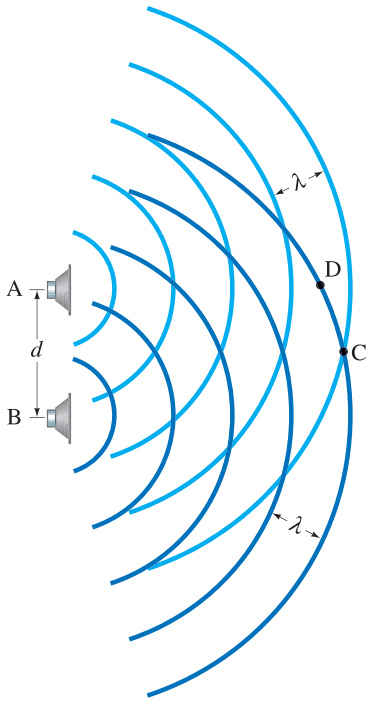
**الشكل 12-16** موجات صوتية من سماعتين تتداخل مع بعضها بعضا.

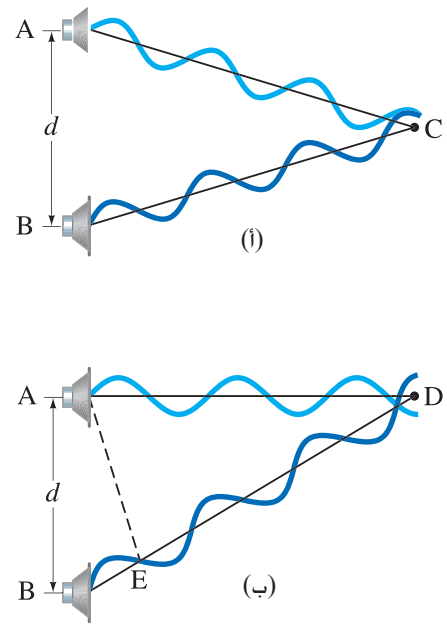
## 6-12 تداخل موجات الصوت؛ الضربات

### التداخل في الفراغ.

رأينا في (البند 12-11) أنه عندما تعبر موجتان آنيّا في منطقة من الحيز، فانّهما تتداخلان معًا. كما يحدث التداخل في موجات الصوت أيضًا.

افترض وجود سمّاعتين كبيرتين A و B، البعد بينهما $d$ على منصّة مسرح كما يوضّح (الشكل 12-16) . دعنا نفترض أنّ السمّاعتين تطلقان موجات لهما التردد المنفرد نفسه، كما أنّهما في الطور نفسه؛ أي عندما يكون أحد المصدرين تضاغطًا وكذلك يفعل المصدر الثاني. (نهمل الانعكاس من الجدران، الأرض، وهكذا ... ). الخطوط المنحنية في الشكل تمثل قمة الموجات الصوتية؛ فالقمة تعني التضاغط في الهواء، أمّا القاع الذي يقع بين تضاغطين (قمتين)، فهو تخلخل . السامع أو الكاشف عند نقطة مثل C التي تقع على البعد نفسه من المصدرين كليهما سوف تنتج صوتا مرتفعا؛ لأنّ التداخل سيكون بناءً؛ يصلها قمتان في لحظة واحدة ، كما يصلها تخلخلان في لحظة لاحقة أيضا. ولكن عند نقطة مثل D في الشكل، فسوف يسمع صوت ضعيف أو لا يسمع أيّ شيء؛ لأنّه سيحدث هناك تداخل هدّام؛ هناك تضاغطات من موجة معينة تلتقي مع تخلخلات من موجة أخرى، والعكس صحيح أيضا (انظر الشكل 11-37) والمناقشة المتعلقة بموجات الماء في البند 11-12).






**الشكل 12-17** موجات الصوت ذات التردد نفسه من المصدرين A، و B (انظر الشكل 12-16) تتداخل تداخلا بنّاء عند C وتداخلا هدّاما عند D. [المبين هنا رسومات توضيحية وليست الموجات الصوتية الطولية].

قد يكون تحليل هذا الموقف أوضح إذا مثّلْنا شكلي الموجتين بالرسم كما في (الشكل 12-17) . في (الشكل 12-17أ) يمكن ملاحظة أنّه ينتج تداخل بناء عند النقطة C لأنّ كلتا الموجتين وفي الوقت نفسه لهما قمة أو قاع عند وصولهما إلى النقطة C. وفي (الشكل 12-17 ب) نرى أنّه للوصول إلى النقطة D، على الموجة من المصدر B أن تقطع مسافة أطول من تلك التي تحتاج إليها الموجة من المصدر A. لذلك، فإنّ الموجة من B سوف تتأخر عن الموجة القادمة من A. في هذا الشكل تم اختيار النقطة E بحيث تتساوى المسافتان ED، وAD. لذلك نرى أنّه إذا كانت المسافة BE تساوي طول موجة الصوت تمامًا، فستكون الموجتان تمامًا مختلفتين في الطور عند الوصول إلى النقطة D، وبالتالي يحدث تداخل هدّام. وهكذا، فإنّ هذا يعدّ معيارًا لتحديد أيّ النقاط يكون عندها تداخل هدّام: يحدث التداخل الهدّام عند أيّ نقطة يكون بعدها عن أحد المتكلمَين أكبر من بعدها عن المتكلم الآخر بمقدار نصف طول موجة. لاحظ أنّه إذا كانت هذه المسافة الزائدة BE في (الشكل 12-17أ) تساوي طول موجة كـ$0, 2, 3, \cdots$ ,$0, 3, 2, \cdots$ طول الموجة)، فستكون الموجتان في الطور نفسه، ويحدث تداخل بنّاء عند ذلك. ولكن إذا كانت المسافة BE $\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, \cdots$ ,$\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, \cdots$ طول موجة، فسيحدث تداخل هدّام.

ومن المهم إدراك أنّ شخصا يجلس عند النقطة D في (الشكل 12-16 أو 12-17) لا يسمع شيئًا على الإطلاق (أو تقريبًا كذلك)، رغم أنّ الصوت يأتي من المتكلمَين الاثنين. في الواقع، إذا توقف أحد المصدرين، فإنّ الصوت من المصدر الثاني سيكون مسموعا بوضوح.

وإذا أطلق أحد المصدرين مدى واسعًا من الترددات، فإنّ أطوالًا موجيةً محدّدةً فقط سوف تتداخل تداخلًا هدّامًا عند نقطةٍ معيّنة.

### المثال 12-12 تداخل السماعات

**البعد بين سماعتين 1.00 m. يقف شخص على بعد 4.00 m من إحداهما. فعلى أيّ بعد من المصدر الآخر يجب أن يكون هذا الشخص للكشف عن تداخلٍ هدّامٍ عندما تُطلق السماعتان صوتًا تردده 1150-Hz؟ افرض أنّ درجة الحرارة 20°C.**

**النّهج:** للكشف عن تداخل هدّام: يجب أن يكون الشخص أقرب أو أبعد بمقدار نصف طول موجة لأحد المصدرين عنه للآخر، أي على بعد $4.00\ \text{m} \pm \lambda/2$ ، ويمكننا تحديد $\lambda$ لأننا نعرف التردد $f$ والسرعة $v$.

**الحلّ:** سرعة الصوت عند 20°C هي 343 m/s. لذا، فإنّ طول موجة هذا الصوت هي (معادلة 12-11)

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\ \text{m/s}}{1150\ \text{Hz}} = 0.30\ \text{m}$$

وللحصول على تداخل هدام: يجب أن يكون بعد المستمع مسافة قدرها مره ونصف قدر طول الموجه من احدى السماعتين دون الأخرى أو0.15m. وهكذا. يجب أن يكون المستمع على بعد 3.85 m من السماعة الثانية.

**ملحوظة:** إذا كانت المسافة بين المصدرين أقلّ من $0.15\ m$، فلن تكون هناك نقطة تبعد أكثر من 0.15 m عن أحد المصدرين عنه للآخر، وسوف لا تكون هناك نقطة يحدث عندها تداخل هدّام.

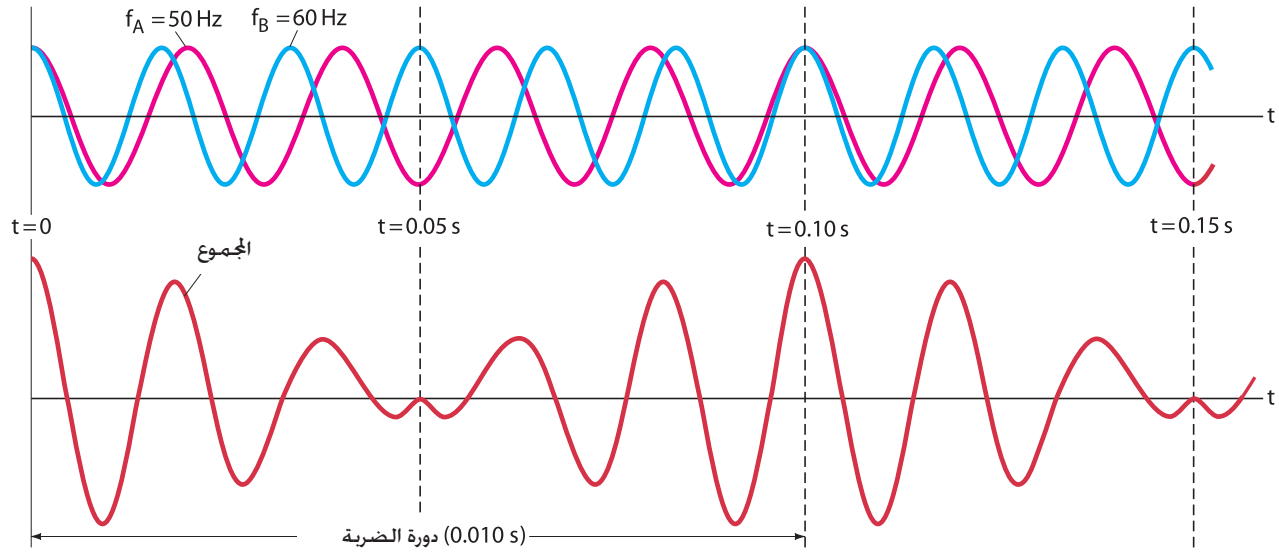
## الضربات – التداخل في الزمن

الضربات

ناقشنا تداخل موجات الصوت الذي يحدث في المكان (الفضاء). وتعدّ ظاهرة الضربات مثالًا مهمًّا ومثيرًا على التداخل في الزمن وهي: إذا كان هناك مصدران للصوت- كشوكتين رنانتين- قريبين في التردد لكنهما غير متساويين، فإنّ الموجات الصوتية الناتجة منهما تتداخل. إنّ مستوى الصوت في مكان معين يرتفع وينخفض بصورة متناوبة في الزمن: لأنّ الموجتين تكونان أحيانًا في الطور نفسه، وأحيانًا أخرى مختلفتين في الطور بسبب اختلاف أطوالهما الموجية. تُسَمّى التغيراتُ في الشدة التي تحدث بصورة منتظمة الضربات.

كي ترى كيف تحدث الضربات، خذ موجتين صوتيتين لهما الاتساع نفسه، ولكن تردّد كلٍّ منهما هو $f_A = 50\ \text{Hz}$، و $f_B = 60\ \text{Hz}$ على الترتيب. في ثانية واحدة، يعمل المصدر الأول 50 اهتزازة، أمّا الثاني فيقوم بـ 60 اهتزازة . والآن، تتفحص الموجات عند نقطة تبعد المسافة نفسها عن المصدرين.

شكل الموجات كدالة في الزمن، عند مكان معين مبين في (الشكل العلوي 12-18) ، يمثّل الخطّ الأرجواني 50-Hz، في حين يمثّل الخطُّ الأزرق موجة 60-Hz.




**الشكل 12-18** تحصل الضربات نتيجة تراكب موجتي صوت بينهما فرق طفيف في التردد.

يبيّن الرسم السفلي في (الشكل 12-18)مجموع الموجتين كدالة في الزمن. عند الزمن $t = 0$، يتضح أنّ الموجتين في الطور نفسه، وتتداخلان تداخلًا بنّاءً. ولأنّ الموجتين تتذبذبان بمعدلين مختلفين عند الزمن $t = 0.05$ s، فستكونان مختلفتين في الطور من جديد، ويكون الاتساع الناتج كبيرا. وهكذا، فإنّ الاتساع الناتج يكون كبيرا كلّ $t = 0.10$ s ويهبط بصورة ملموسة بينهما. وهذا الارتفاع والانخفاض في الشدة هو ما يسمى ظاهرة الضربات*. في هذه الحالة، تتباعد الضربات زمنيا بـ 0.10 s. أي أنّ تردد الضربات هو 0.10 s في الثانية، أو 10 Hz. وهذه النتيجة، أي تردد الضربات، يساوي الفرق في التردد بين الموجتين. وينطبق هذا بصورة عامة.

تردد الضربات = الفرق بين ترددي الموجتين.

**تطبيق الفيزياء**
ضبط أنغام البيانو

يمكن أن تحصل ظاهرة الضربات لأيّ نوع من الموجات، وهي طريقة دقيقة لحساب الترددات. فمثلًا، لتنغيم البيانو؛ ينصت العازف للضربات بين شوكته الرنانة العيارية ونغمة وتر محدد في البيانو، ويعرف أنهما متناغمان عندما تختفي الضربات. وينغم أعضاء الفرقة الموسيقية (الأوركسترا) أدواتهم بالاستماع للضربات بينهم وبين نغمة عيارية ( عادة A فوق C الوسطى عند 440 Hz) الناتجة من البيانو.

### المثال 12-13 الضربات

تصدر شوكة رنانة نغمة ثابته 400 Hz. عند ضرب هذه الشوكة وتقريبها من وتر قيثار مهتز، تمّ عدّ عشرين ضربة في خمس ثوان. ما الترددات المحتمل الحصول عليها من وتر القيثار المهتز؟

**النّهج:** كي تحدث الضربات؛ يجب أن يهتزّ الوتر عند تردّدٍ يختلف عن 400 Hz بمقدار تردّد الضربات.
**الحلّ:** تردد الضربات يساوي

$$f_{\text{beat}} = 20 \text{ vibrations}/5 \text{ s} = 4 \text{ Hz}$$

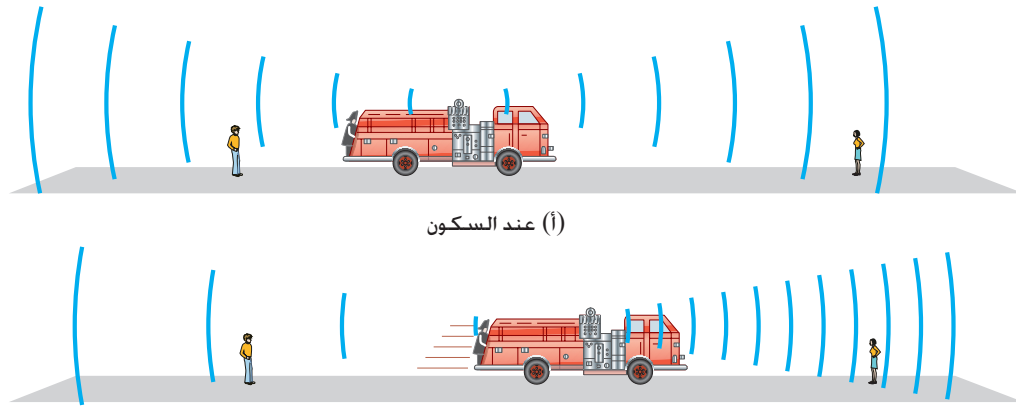
وهذا هو الفرق بين تردّد الموجتين؛ لأنّ إحدى الموجتين معروفة وتساوي 400 Hz. وعليه، يجب أن تكون الثانية 404 Hz أو 396 Hz.

**التمرين هـ:** ما تردّد الضربات للشوكة الرنانة والقيثار في (المثال 12-13)عندما نسمع الترددين 500-Hz و 506-Hz معا؟

* سوف تسمع الضربات حتى لو لم تكن الاتساعات متساوية، ما دام الاختلاف في التردد ليس كبيرًا.

## 7-12 ظاهرة دوبلر

قد تكون لاحظت أنّك تسمع جرس صوت صفارة الإنذار لسيارة إطفاء مسرعة ينخفض فجأةً عندما تمرّ أمامك. أو ربّما تكون لاحظت التغيّر في جرس (درجة) الصوت لبوق سيارة عند مرورها مسرعة أمامك. وكذلك درجة صوت سيارة سباق عند مرورها أمام المشاهد.عندما يتحرك مصدر الصوت نحو السامع، فإنّ الدرجة التي يسمعها المراقب تكون أكبر ممّا لو كان المصدر ساكنًا. وعندما يكون المصدر متحركًا بحيث يبتعد عن السامع فستكون درجة الصوت أقلّ. هذه الظاهرة تُسَمّى ظاهرة دوبلر* . وتحصل في الموجات جميعها. وسنرى الآن سبب حدوث هذه الظاهرة، ونحسب الفرق بين تردد كلّ من الصوت المسموع والمصدر عندما تكون هناك حركة نسبيه بين المصدر والملاحظ.



(أ) عند السكون

(ب) عند حركة سيارة الأطفاء

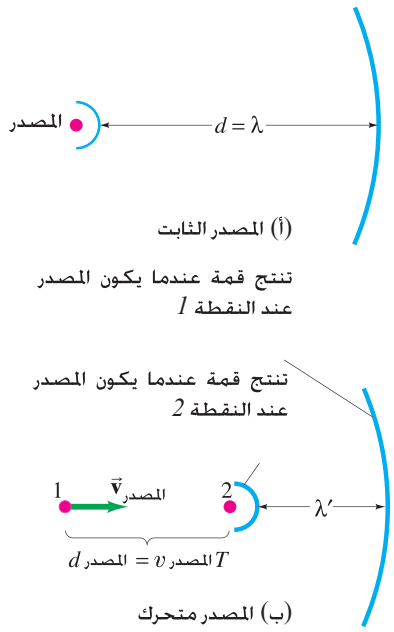
**الشكل 12-19** (أ) كلا المراقبين يسمعان التردد نفسه من سيارة الإطفاء الساكنة .(ب) ظاهرة دوبلر: السامع الذي تتحرك السيارة نحوه يسمع صوتا ذا تردد أعلى، أما السامع خلف السيارة فيسمع صوتا ذا تردد أقلّ.

افترض صفارة الإنذار الساكنة التي تصدر صوتًا ذا تردد معين في الاتجاهات جميعها كما هو مبين في (الشكل 12 - 19أ). تسير موجات الصوت بسرعة الصوت في الهواء $v_{\text{snd}}$ ، وهي لا تعتمد على سرعة المصدر أو السامع. إذا كان مصدر الصوت (السيارة) متحركًا، فإنّ الصفارة تصدر صوتا عند التردد نفسه كما لو كانت ساكنة. لكن قدمات موجات الصوت التي تطلقها إلى الأمام تكون متقاربة أكثر مما لو كانت السيارة ساكنة، كما هو مبين في (الشكل 12 - 19ب). يعود ذلك إلى أنّ سيارة الإطفاء عندما تتحرك، "تطارد" مقدمات الموجات السابقة، وتطلق كلّ قمة أقرب إلى سابقتها. لذلك، فإنّ السامع على جانب الطريق أمام السيارة سيكشف عن قمم موجات أكثر تمر به في الثانية الواحدة. وهكذا، فإنّ التردد المسموع يكون أكبر. وفي المقابل، تكون مقدّمات الموجات الصادرة خلف السيارة متباعدة أكثر ممّا لو كانت السيارة ساكنة؛ لأنّ السيارة تتسارع مبتعدةً عنها. لذا، تمرّ قمم موجات أقلّ أمام الملاحظ خلف السيارة (الشكل 12 - 19 ب) وتكون درجة الصوت المسموعة أقلّ.

ويمكننا حساب اختلاف التردد المسموع باستعمال (الشكل 12 - 20)، ونفرض أنّ الهواء ( أو أيّ وسط آخر) ساكن في مجموعة محاورنا. (المراقب الساكن على اليمين). في (الشكل 12 - 20أ)، مصدر الصوت موضح كبقعه حمراء وهو ساكن. يبين الشكل قمّتي موجة متتاليتين، ولأنّ الثانية أطلقت قبل قليل، فإنها تبدو قريبة من المصدر. إنّ البعد بين هاتين القمتين يساوي $\lambda$، طول الموجة. وإذا كان تردد المصدر هو $f$، فإنّ الزمن بين إصدار الموجتين يكون

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v_{\text{snd}}}$$

في (الشكل 12-20 ب)، المصدر يتحرك بسرعة $v_{\text{source}}$ نحو الملاحظ




**الشكل 12-20** تحديد انزياح التردد بظاهرة دوبلر (انظر النص). البقعة الحمراء هي المصدر.

* نسبة إلى After J. C. Doppler (1803–1853)

تغير التردد، مصدر متحرك ومشاهد ثابت.

في زمن $T$ (كما عرفناه قبل قليل)، أول قمة موجة تكون قد تحركت مسافة $d = v_{\text{الصوت}}T = \lambda$ حيث $v_{\text{الصوت}}$ هي سرعة موجة الصوت في الهواء ( ثابتة، بصرف النظر أكان المصدر متحركًا أم لا). في هذا الوقت نفسه، يتحرك المصدر مسافة $d_{\text{المصدر}} = v_{\text{المصدر}}\ T$ . لذلك، تكون المسافة بين قمم الموجات، وهي طول الموجة $\lambda'$ التي يستقبلها الملاحظ

$$\begin{aligned}\lambda' &= d - d_{\text{المصدر}} \\ &= \lambda - v_{\text{المصدر}}\ T \\ &= \lambda - v_{\text{المصدر}}\ \frac{\lambda}{v_{\text{الصوت}}} \\ &= \lambda\left(1 - \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)\end{aligned}$$

نطرح $\lambda$ من جانبي هذه المعادلة، ونجد أنّ الإزاحة في طول الموجة $\Delta\lambda$ ، هي

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = -\lambda\frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}$$

لذا، تتناسب الإزاحة في طول الموجة طرديّا مع سرعة المصدر $v_{\text{المصدر}}$ التردد $f'$ الذي سيستقبله الملاحظ الثابت على الأرض، ويعطي بالعلاقة (المعادلة 11-12).

$$f' = \frac{v_{\text{الصوت}}}{\lambda'} = \frac{v_{\text{الصوت}}}{\lambda\left(1 - \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)}$$

بما أنّ $f = v_{\text{الصوت}}/\lambda$، فإنّ

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)} \qquad \text{[المصدر يتحرك نحو الملاحظ الثابت]} \qquad \textbf{(12-2 أ)}$$

ولأنّ المقام أقلّ من 1، فإنّ التردد الظاهري $f'$ يكون أكبر من تردد المصدر $f$؛ أي أنّ $f' > f$، فمثلاً، إذا أطلق المصدر صوتًا بتردد 400 Hz عندما يكون ساكنًا، ثم عندما يتحرك المصدر نحو سامع ثابت بسرعة 30 m/s، فسوف يسمع الملاحظ ترددا (عند 20°C).

$$f' = \frac{400\ \text{Hz}}{1 - \frac{30\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}} = 438\ \text{Hz}$$

والآن، افترض مصدرًا مبتعدًا عن الشاهد الساكن بسرعة $v_{\text{المصدر}}$ باستعمال المناقشة نفسها أعلاه، طول الموجة $\lambda'$ كما يستقبلها الملاحظ، سيكون لها الإشارة السالبة نفسها على بعد المصدر $d_{\text{المصدر}}$ (عند أعلى الصفحة هذه) تتغير للموجة

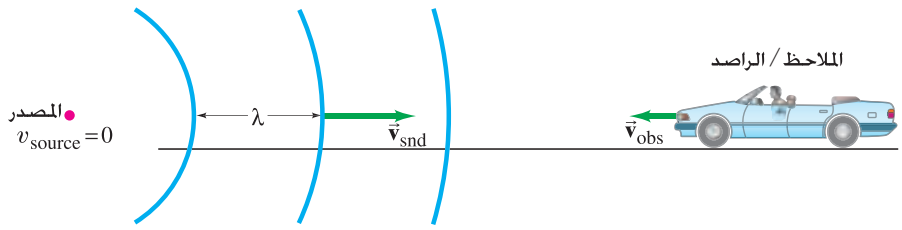
$$\begin{aligned}\lambda' &= d + d_{\text{المصدر}} \\ &= \lambda\left(1 + \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)\end{aligned}$$

وسيكون الفرق بين الموجات المنبعثة $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = +\lambda(v_{\text{المصدر}}/v_{\text{الصوت}})$
أما التردد الملاحظ للموجة فسيكون $f' = v_{\text{الصوت}}/\lambda'$ وبالتالي

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)} \qquad \text{[ المصدر متحرك بعيدا عن الملاحظ الساكن]} \qquad \textbf{(12-2 ب)}$$

إذا كان المصدر يطلق 400 Hz ويتحرك بعيدا عن مشاهد ثابت بسرعة 30 m/s، فسوف يسمع ترددًا

$$f' = (400\ \text{Hz})/\left[1 + (30\ \text{m/s})/(343\ \text{m/s})\right] = 368\ \text{Hz}$$




**الشكل 12-21** الملاحظ يتحرك بسرعة $v_{obs}$ نحو مصدر ساكن يكشف قمم موجات تعبر بسرعة $v' = v_{snd} + v_{obs}$ حيث $v_{snd}$ هي سرعة الصوت في الهواء.

تغيـر التـردد، مصـدر ثابت، ملاحظ متحرك.

تحصل ظاهرة دوبلر كذلك عندما يكون المصدر ساكنًا والملاحظ متحركًا. إذا كان الملاحظ متحركًا نحو المصدر، فالدرجة المسموعة تكون أعلى من درجة تردد مصدر الصوت. وإذا كان الملاحظ يتحرك بعيدًا عن المصدر، فالدرجة المسموعة تكون أقلّ. ومن الناحية الكمية، يكون التغيّر في التردد مختلفًا عن التغير في حالة المصدر المتحرك. وأمّا في حالة مصدر ثابت وملاحظ متحرك، فإنّ المسافة بين قمم الموجات، أي طول الموجة $\lambda$ ، لا تتغير. إذا كان الملاحظ متحركا نحو المصدر، (الشكل 12-21)، فالسرعة $v'$ للموجات نسبة إلى الملاحظ هي جمع بسيط للسرعات: $v' = v_{\text{الصوت}} + v_{\text{الملاحظ}}$، حيث $v_{\text{الصوت}}$ هي سرعة الصوت في الهواء (على افتراض أنّ الهواء ساكن) و $v_{obs}$ هي سرعة الملاحظ. لذا، فإنّ التردد المسموع هو

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v_{\text{الصوت}} + v_{\text{الملاحظ}}}{\lambda}$$

ولأنّ $\lambda = v_{\text{الصوت}}/f$، فإنّ

$$f' = \frac{(v_{\text{الصوت}} + v_{\text{الملاحظ}})f}{v_{\text{الصوت}}}$$

أو

$$f' = \left(1 + \frac{v_{\text{الملاحظ}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)f \quad \text{[الملاحظ متحرك نحو المصدر الثابت]} \quad \textbf{(12-3 أ)}$$

وإذا كان الملاحظ متحركًا بعيدًا عن المصدر، فالسرعة النسبية هي $v' = v_{\text{الصوت}} + v_{\text{الملاحظ}}$

$$f' = \left(1 - \frac{v_{\text{الملاحظ}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)f \quad \text{[الملاحظ يتحرك بعيدا عن المصدر الثابت]} \quad \textbf{(12-3ب)}$$

**المثال 12-14 صفارة إنذار متحركة**

تطلق صفارة سيارة شرطة ساكنة صفيرًا بتردد 1600 Hz. ما التردد الذي سوف تسمعه إذا كنت ساكنًا وسيارة الشرطة تتحرك بسرعة (أ) 25.0 m/s نحوك؟ (ب) 25.0 m/s بعيدًا عنك؟

**النّهج**: بما أنّ الملاحظ ساكن والمصدر متحرك، فسنستعمل (المعادلتين 2.12) . إن التردد الذي تسمعه (الملاحظ) هو التردد المنبعث $f$ مقسوما على المعامل $(1 \pm v_{\text{المصدر}}/v_{\text{الصوت}})$، حيث $v_{\text{المصدر}}$ سرعة سيارة الشرطة. استعمل الإشارة السالبة عندما تقترب السيارة منك ( لتعطي ترددًا أعلى)؛ استعمل الإشارة الموجبة عندما تتحرك السيارة بعيدا عنك (تردد أقلّ).

**الحلّ**: (أ) السيارة تتحرك نحوك، (المعادلة 12-2 أ)

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)} = \frac{1600\ \text{Hz}}{\left(1 - \frac{25.0\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}\right)} = 1726\ \text{Hz}$$

(ب) السيارة تتحرك بعيدا عنك

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)} = \frac{1600\ \text{Hz}}{\left(1 + \frac{25.0\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}\right)} = 1491\ \text{Hz}$$

**التمرين و:** افرض أنّ سيارة الشرطة في (المثال 12-14)كانت ساكنة وتطلق التردد 1600 Hz. ما التردد الذي سوف تسمعه إذا كنت متحركًا بسرعة 25.0 m/s (أ) نحو السيارة؟ (ب) بعيدًا عنها؟

عندما تنعكس موجةٌ صوتيَّةٌ عن حاجزٍ متحرّك، فإنّ تردّد الموجة المنعكسة وبسبب ظاهرة دوبلر سوف يختلف عن تردّد الموجة الساقطة. وهذا موضح في المثال التالي.

### المثال 12-15 انزياح دوبلر المزدوج

تطلق موجة صوتية ذات تردد 5000-Hz من مصدر ساكن. تنعكس هذه الموجة عن جسمٍ يتحرك بسرعة 50 m/s نحو المصدر (الشكل 12-22). ما تردد الموجة المنعكسة عن الجسم المتحرك عند الكشف عنها بواسطة كاشف ساكن قرب المصدر؟

**النّهج:** في الواقع هناك انزياحان في التردد بسبب ظاهرة دوبلر في هذا الوضع: أولاً، الجسم المتحرك يمثل ملاحظا متحركا نحو المصدر بسرعة $v_{\text{الملاحظ}} = 3.50\ \text{m/s}$ (الشكل 12-22 أ) وبالتالي "يكشف" موجات صوتية ترددها (معادلة 12-3 أ) ، $f' = f[1 + (v_{\text{الملاحظ}}/v_{\text{الصوت}})]$ ثانيًا، انعكاس الموجة عن الجسم المتحرك $f''$، يعني أنّ الجسم يعيد إطلاق الموجة، ويلعب دور مصدر متحرك بسرعة $v_{\text{المصدر}} = 3.50\ \text{m/s}$، (الشكل 12-22 ب). وهكذا، يكون التردد النهائي الذي يكشف عنه $f'$، يعطى بالعلاقة الآتية:

$$f'' = f'/[1 - v_{\text{المصدر}}/v_{\text{الصوت}}]$$

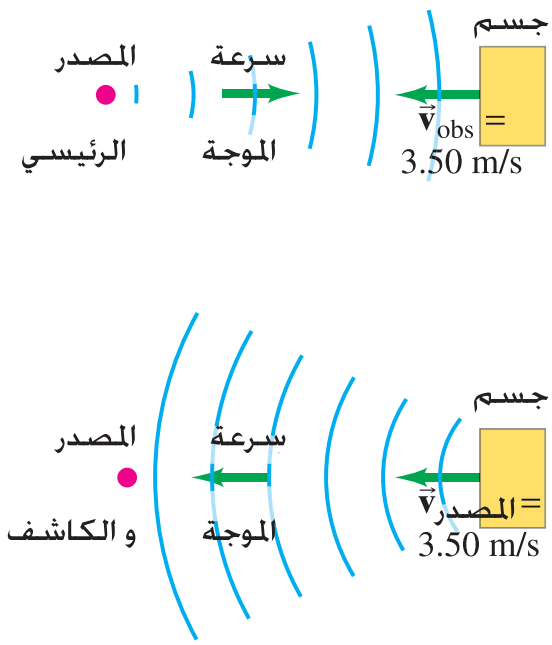
**الحلّ:** التردد $f'$ ، الذي يكشف عنه بالجسم المتحرك هو (معادلة 12-3 أ)

$$f' = \left(1 + \frac{v_{\text{الملاحظ}}}{v_{\text{الصوت}}}\right) f = \left(1 + \frac{3.50\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}\right)(5000\ \text{Hz}) = 5051\ \text{Hz}$$

الجسم المتحرك الآن "يمكن" (يعكس) ترددا صوتيا (معادلة 12-2 أ):

$$f'' = \frac{f'}{\left(1 - \frac{v_{\text{المصدر}}}{v_{\text{الصوت}}}\right)} = \frac{5051\ \text{Hz}}{\left(1 - \frac{3.50\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s}}\right)} = 5103\ \text{Hz}$$

وهكذا ينزاح التردد بـ 103 Hz.




الشكل **12-22** مثال 12-15

تتداخل كلتا الموجتين الساقطة والمنعكسة في (المثال 12 - 15)، عندما تمتزجان معا (إلكترونيا) وتنتجان الضربات.

تردد الضربات يساوي الفرق بين الترددين، 103 Hz. تستعمل ظاهرة دوبلر هذه في كثير من التطبيقات الطبية، عادة بالموجات فوق السمعية في مدى ملايين وحدات التردد. فمثلا، الموجات فوق السمعية المنعكسة عن كريّات الدّم الحمراء يمكن أن تحدّد سرعة جريان الدّم. وبصورة مشابهة، يمكن استعمال هذه الطريقة للكشف عن حركة صدر الجنين ورسم نبضات قلبه.

**تطبيق الفيزياء**
مقياس جريان الدم بأثر دوبلر، واستعمالات طبية أخرى

وللسهولة: يمكن كتابة (المعادلتين 12-2 و 12-3) في معادلة منفردة تشمل وللسهولة: يمكن كتابة (المعادلتين 12 - 2 و 12 - 3)في معادلة منفردة تشمل الحالات جميعها عندما يكون كلّ من المصدر والملاحظ في حالة حركة

$$f' = f\left(\frac{v_{\text{الصوت}} \pm v_{\text{الملاحظ}}}{v_{\text{الصوت}} \mp v_{\text{المصدر}}}\right) \qquad \textbf{(4-12)}$$

المصدر والملاحظ متحركان.

وللحصول على الإشارات الصحيحة: تذكّر من تجربتك الشخصية أنّ التردد يكون أكبر عندما يقترب المصدر والملاحظ من بعضهما، في حين ينقص عندما يبتعدان. وهكذا، فالإشارات العليا في البسط والمقام تنطبق إذا تحرك المصدر و/ أو السامع نحو بعضهما، أمّا الإشارات السفلية فتنطبق إذا تحركا مبتعدين

**حل المسألة**
الحصول على الإشارات الصحيحة.

### *ظاهرة دوبلر في الضوء.

تحدث كذلك ظاهرة دوبلر في الأنواع الأخرى من الموجات. الضوء والأنواع الأخرى من الموجات الكهرومغناطيسية (مثل موجات الرادار) تبدي ظاهرة دوبلر. وعلى الرّغم من أنّ معادلات انزياح التردد ليست (كمعادلتي 12-2 و 12 - 3). كما سنرى في الفصل 33، إلا أنّ الأثر مشابه. ومن التطبيقات المهمة لهذه الظاهرة هو استخدامها في التنبؤات الجوية باستعمال الرادار: فالتأخير في الوقت بين الموجات المرسلة والموجات المستقبلة بعد انعكاسها عن قطرات المطر يعطي موقع الترسب. ويخبرنا قياس انزياح دوبلر في التردد(كما في المثال 12-15) عن سرعة تحرك العاصفة واتجاهها.

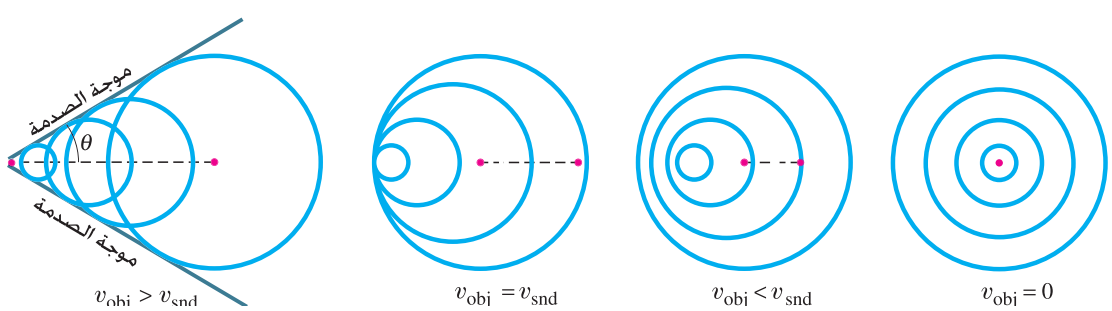
**تطبيق الفيزياء**
ظاهرة دوبلر في الموجات الكهرمغناطيسية والتنبؤات الجوية.

**تطبيق الفيزياء**
الانزياح الأحمر في علم الفلك.

وهناك تطبيقٌ آخر مهمٌّ في الفلك، حيث يمكن تحديد سرعة الأجرام السماوية البعيدة من انزياح دوبلر. ينزاح الضوء من النجوم البعيدة نحو الترددات المنخفضة، مما يشير إلى أنّ هذه النجوم تتحرك بعيدًا عنّا. وهذا مايُدعى **الانزياح الأحمر**؛ لأنّ للأحمر أقلّ تردد في الضوء المرئي. كلّما كان التغير في التردد أكبر، تكون سرعة الابتعاد أكبر كذلك. وقد وجد أنه كلّما كانت الأجرام السماوية بعيدة عنا، فإنها تتحرك بسرعة أكبر بعيدا عنا. إنّ هذه المشاهدة هي الأساس للفكرة القائلة إنّ الكون يتمدد، وكذلك قاعدة للفكرة التي تشير إلى أنّ الكون بدأ بانفجار عظيم يدعى" Big Bang "،(انظر الفصل 44 ).

## 8-12 موجات الصدمة والدويّ الصوتي *

الجسم كالطائرة: فالجسم الذي يسير أسرع من الصوت يُقال إنّه يملك سرعةً فوق صوتيةٌ. وتُعطى هذه السرعة **عدد ماخ** * الذي يُعرف كنسبة بين سرعة الجسم إلى سرعة الصوت في الوسط المحيطً. مثلا ، طائرة بسرعة 600 m/s عالية في الجو، حيث سرعة الصوت 300 m/s فقط، لها سرعة 2 ماخ.




**الشكل 12 - 23** موجات الصوت الصادرة عن جسم (أ) ساكن. أو (ب ، ج ، د) متحرك. (ب) إذا كانت سرعة الجسم أقلّ من سرعة الصوت، تحدث ظاهرة دوبلر. (د) إذا كانت سرعة الجسم أكبر من سرعة الصوت، تتكون موجة الصدمة.

موجات الصدمة

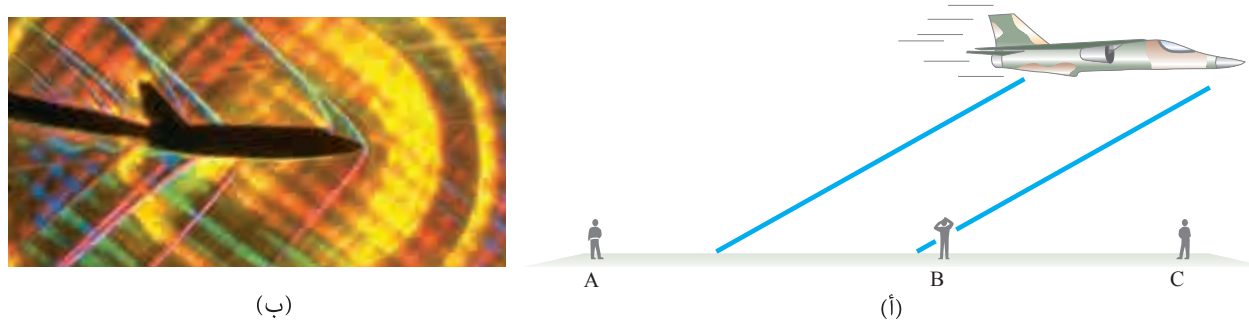
**الشكل 12-24** موجات القوس الناتجة من قارب.

**تطبيق الفيزياء**
الدويّ الصوتي

وعندما يتحرك مصدر الصوت بسرعات تحت صوتية (أقلّ من سرعة الصوت)، تتغير درجة الصوت كما لاحظنا (ظاهرة دوبلر). انظر كذلك (الشكل 12 - 23أ و ب). ولكن إذا تحرك المصدر بأسرع من سرعة الصوت فسينتج أثر مثير يعرف بموجة الصدمة. وفي هذه الحالة، فإنّ المصدر "يسبق" الموجات التي ينتجها. كما هو مبين في (الشكل 12 - 23ج)، عندما يسير المصدر بسرعةٍ مساويةٍ لسرعة الصوت، فإنّ مقدمات الموجات التي يطلقها في اتجاه الأمام "تتراكم" مباشرة أمام المصدر. وعندما يتحرك المصدر بسرعة تفوق سرعة الصوت تتراكم مقدمات الموجات فوق بعضها على الجانبين، كما يوضح (الشكل -23 12ب) . تتراكب قمم الموجات فوق بعضها وتشكّل قمةً واحدةً كبيرةً جدًّا. في الواقع، إنّ موجة الصدمة هي نتيجة تداخل بنّاء لعدد كبير من مقدمات الموجات. وتشبه موجة الصدمة في الهواء موجة القوس لقارب يسير أسرع من موجات الماء التي ينتجها ، (الشكل 12-25) .

عندما تسير طائرة بسرعات فوق صوتية، فإنّ الضجة التي تحدثها والاضطراب الناجم عنها في الهواء تشكل موجة صدمة تحتوي على كمّ هائل من الطاقة الصوتية. وعندما تمر موجة الصدمة بسامع، فإنّها تُسمع كدويٍّ صوتيٍّ كبير. ويدوم هذا الدوي الصوتي جزءًا من الثانية، ولكنّ الطاقة التي يحملها تكون كافية لكسر زجاج النوافذ، وكذلك العديد من الأعطال والتلف. وفي الحقيقة، فإنّ الدوي الصوتي يتكون من اثنين أو أكثر لأنّ موجات الصدمة يمكن أن تتكون في المقدمة وفي الخلف بالنسبة للطائرة ، وكذلك قرب الجناحين وغيرها، (الشكل 12-25). كذلك موجات القوس في القارب قد تكون متعدّدة أيضًا، كما يمكن مشاهدته في (الشكل 12-24).

* نسبة إلى العالِم الفلكي النمساوي ماخ (1838-1916).




(أ) (ب)

**الشكل 12 - 25** (أ) الدوي الصوتي (المزدوج) تم سماعه من قبل الشخص A إلى اليسار، ويسمع الآن من قبل الشخصB في الوسط. وبعد قليل سوف يسمعه الشخص C إلى اليمين. (ب) صورة خاصة لطائرة فوق صوتية تبين موجات الصدمة الناتجة في الهواء. (موجات صدمة متعددة نتجت من الأجزاء المختلفة للطائرة).

عندما تقترب طائرةٌ من سرعة الصوت، فإنّها تواجه حاجزًا من الموجات الصوتية أمامها (انظر الشكل 12 - 23 جـ). ولكي تتجاوز الطائرة سرعة الصوت، فإنّها تحتاج إلى دفع أكبر لتمّر عبر هذا " الحاجز الصوتي". وهذا ما يُسَمّى "اختراق حاجز الصوت". وعندما تتحقّق سرعة فوق صوتية، فإنّ هذا الحاجز لا يعود يشكّل عائقًا للحركة. أحيانًا، يعتقد خطأً أنّ دويًّا صوتيًّا يتشكّل فقط في اللحظة التي تخترق فيها الطائرة حاجز الصوت، ولكن الصحيح هو أنّ موجة صدمة تتبع الطائرة طوال الوقت الذي تطير فيه الطائرة وبسرعة فوق صوتية. سلسلة من الملاحظين على الأرض سوف يسمع كلّ منهم " دويًّا" قويًا عند مرور موجة الصدمة، (الشكل 12 - 25) . تتكون موجة الصدمة من مخروط رأسه عند الطائرة. زاوية هذا المخروط، $\theta$ (انظر الشكل 12 - 23 د)، تعطى بـ

$$\sin\theta = \frac{v_{\text{الصوت}}}{v_{\text{الجسم}}} \qquad \textbf{(5-12)}$$

حيث $v_{\text{الجسم}}$ سرعة الجسم (الطائرة)، و $v_{\text{الصوت}}$ سرعة الصوت في الوسط. البرهان متروك للمسألة 63)

## 9-12 تطبيقات: السونار، فوق السمعية، والتصوير الطبي *

### * السونار

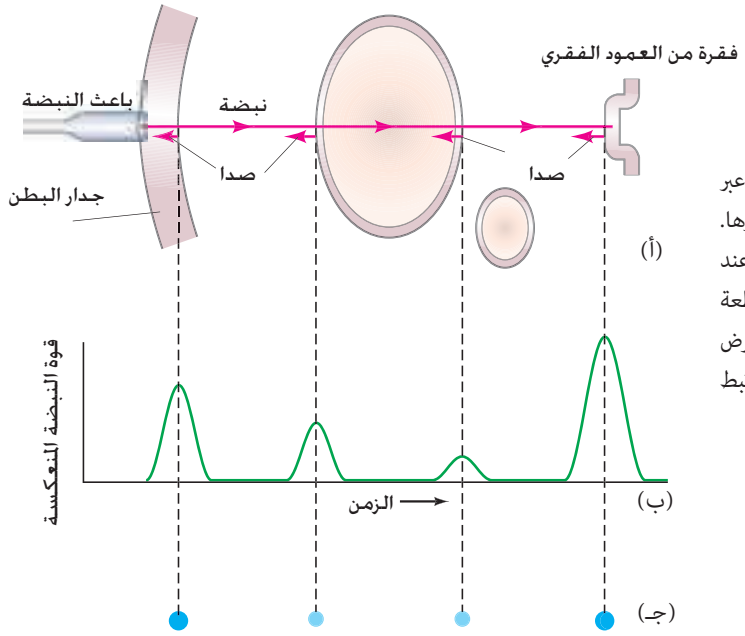
هو انعكاس الصوت، ويستعمل كثيرًا في تحديد المسافات. يستعمل السونار* أو تقانة النبضة- الصدى لتحديد أماكن الأجسام تحت الماء. يرسل المصدر نبضة صوتية خلال الماء، ويستقبل كاشف انعكاسها، أو صداها بعد مضي وقت قصير. تقاس هذه الفترة الزمنية بدقة كبيرة، ومنها تحسب المسافة إلى الجسم العاكس لأنّ سرعة الصوت في الماء معلومة. وتساعدنا هذه الطريقة في تحديد عمق البحر، ومكان السلاسل الصخرية، والسفن الغارقة، والغواصات، أو تجمعات الأسماك. كما أنّ التركيب الداخلي للأرض يدرس بالطريقة نفسها من خلال الكشف عن انعاكسات الموجات التي تتحرك عبر الأرض والتي يكون مصدرها انفجارات (تدعى "مصوتات" أو مسبارات). إنّ تحليل الموجات المنعكسة من تركيبات مختلفة وحدود فاصلة داخل الأرض يؤدي إلى أنماط لخصائص الأرض، كما تفيد أيضا في التنقيب عن النفط والمعادن.

يستعمل السونار عادة ترددات **فوق سمعية**: أي موجات ترداتها أكثر من 20 kHz، خارج نطاق سمع الأنسان؛ لأنّ الترددات النموذجية للسونار تقع بين 20 kHz و 100 kHz.

أحد أسباب استخدام الموجات القصيرة هو أنّ حيودها قليل إضافة إلى أنها غير مسموعة. (البند 11-5) ولذلك تنتشر الحزمة على نحو أقل ويمكن بذلك الكشف عن الأجسام الصغيرة.

**تطبيق الفيزياء**
السونار: إيجاد العمق، مسبارات الأرض.

* يشير السونار إلى "تحديد المدى في البحار بواسطة الصوت".




**الشكل 12-26** (أ) نبضات فوق الصوتية تمّر عبر البطن، وتنعكس من على السطوح خلال مسارها. (ب) ترسم النبضات المنعكسة كدالة في الزمن عند استلامها من الكاشف. الخطوط العمودية المتقطعة تبين أيّ نبضةٍ منعكسةٍ تعود لأيّ سطح. (ج) عرض البقع للأصداء نفسها: سطوع كلّ بقعة يرتبط بشدة الإشارة.

## التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية

**الاستعمال التشخيصي للموجات فوق الصوتية في الطب، بصورة أخيلةٍ أحيانًا تُسَمّى "صورة صوتية" وهو تطبيقٌ مهمٌّ ومدهشٌ للمبادىء الفيزيائية. تستعمل تقانة النبضة-الصدى مثل السونار، ما عدا أنّ التردّدات المستعمله تقع في المدى من 1 MHz إلى 10 MHz $(1\ \text{MHz} = 10^6\ \text{Hz})$. تُوَجَّه نبضةٌ صوتيّةٌ ذاتُ تردّدٍ عالٍ إلى داخل الجسم، ثم يُكشف على انعكاساتها على الحدود الفاصلة، أو الفواصل بين الأعضاء، أو أيّ أضرار في الجسم، مثل السرطانات، أو أيّ نموٍّ غير طبيعي، أو جيوب سوائل يمكن أيضًا تمييزها؛ ويمكن فحص عمل صمّامات القلب أو تطور الجنين، و كذلك الحصول على معلومات عن الأعضاء المختلفة للجسم، مثل الدماغ، والقلب، والكبد، والكلى. وعلى الرّغم من أنّ الموجات فوق الصوتية لا تحلّ محلَّ الأشعة السينية، إلا أنّ تشخيصها لبعض حالات يكون مساعدًا كبيرًا. وهناك بعض أنواع من الأنسجة أو السوائل لا تستطيع الأشعة السينية الكشف عنها، في حين تقوم الموجات فوق الصوتية بذلك، حيث تنعكس عن جوانبها. صور الموجات فوق الصوتية"الزمن الحقيقي" هي بمثابة شريط سينمائي لجزء من داخل الجسم.**

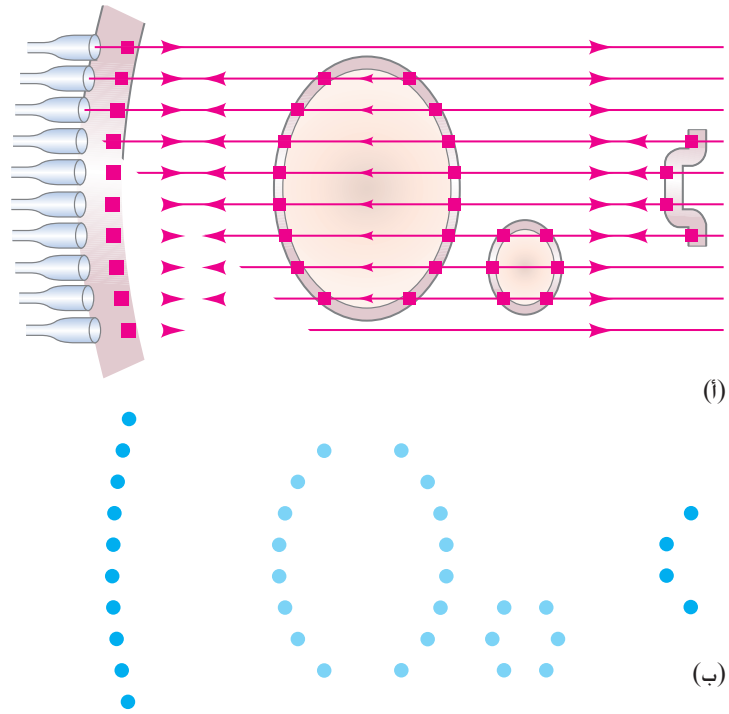
**تعمل تقانة النبضة – الصدى للتصوير الطبي كما يلي: تبعث نبضة قصيرة فوق صوتية من محول للطاقة يحول الطاقة الكهربائية إلى نبضة موجة – صوتية. ثم ينعكس جزءٌ من النبضة كصدى عند كلّ حدّ فاصل في الجسم، ومعظم النبضة (عادة) يستمر، (الشكل 12 - 26 أ) . إنّ الكشف عن النبضات المنعكسة بواسطة الباعث نفسه يمكن عرضه على شاشة عرض أو جهاز عرض. كما أنّ الزمن الذي يمرُّ بين لحظة إرسال النبضة وكلّ جزءٍ منعكس يتناسب مع المسافة عن السطح العاكس. فمثلا، إذا كانت المسافة بين الباعث والعمود الفقري 25 cm، فإنّ النبضة تسير في رحلة ذهاب وإياب مسافة $2 \times 25\ \text{cm} = 0.50\ \text{m}$. إنّ سرعة الصوت في أنسجة جسم الإنسان حوالي 1540 m/s (قريبة من تلك في البحر). لذا، فإنّ الزمن الذي تستغرقة هو**

$$t = \frac{d}{v} = \frac{(0.50\ \text{m})}{(1540\ \text{m/s})} = 320\ \mu\text{s}$$

**تعتمد شدة النبضة المنعكسة بصورة رئيسة على الفرق في كثافة المادتين على جانبي السطح الفاصل، ويمكن عرضه بصورة نبضة أو بقعة (شكل 12-26 ب، جـ) . ويمكن تمثيل كلّ بقعة صدى (الشكل 12-26 جـ) بنقطةٍ موقعها يعبّر عن زمن الصدى، ولمعانها يعتمد على شدة هذا الصدى. كما يمكن تشكيل صورةٍ في بعدين من خلال هذه البقع لسلسة من المسوحات.**

**تطبيق الفيزياء**

التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية.



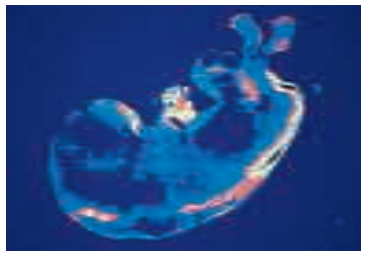
(أ)

(ب)

يتحرك المحوّل، أو يمكن استعمال سلسلة من المحوّلات، كلٌّ منها يرسل نبضته عند كلّ موقع ويستقبل الأصداء كما هو مبين في (الشكل 12 - 27) . كلّ أثر يمكن رسمه، ثم توضع تحت بعضها لتشكل صورة على جهاز عرض كما في (الشكل 12 - 27 ب). تم بيان عشرة خطوط فقط في (الشكل 12 - 27) . لذلك، فالرسم غير واضح. وهناك خطوط أكثر تعطي صورة أكثر دقة* . وهناك صور فوق صوتية مبينة في (الشكل 12 - 28) .

**الشكل 12-27** (أ) عشرة خطوط مرّت عبر البطن بتحريك الباعث، أو باستعمال سلسلة من البواعث. (ب) رسمت الأصداء كبقع للحصول على الصورة. الآثار المتقاربة تعطي نتائج مفصلة أكثر.

(أ)



(ب)

**الشكل 12-28** (أ) صورة فوق صوتية لجنين آدمي (رأسه إلى اليسار) داخل الرحم. (ب) صورة فوق صوتية عالية التحليل لجنين. (الألوان المختلفة تمثل أكثر من شدّة مختلفة للنبضات المنعكسة).

* يستعمل رادار الطائرات تقانة مشابهة لتقانة النبضة- الصدى، ما عدا أنّه يستعمل موجات كهرومغناطيسية (EM) تسير بسرعة $3 \times 10^8\ \text{m/s}$ كما هو الحال في الضوء.

## ملخص

ينتقل الصوت كموجات طولية في الهواء وفي أوساط أخرى. تزداد سرعة الصوت في الهواء مع درجة الحرارة، وعند درجة 20°C، فإنها حوالي 343 m/s.

تتحدد درجة الصوت بواسطة التردد؛ فكلّما زاد التردد زادت الدرجة.

يتراوح مدى السمع عند الإنسان بين 20 Hz إلى 20,000 Hz (1هيرتز = 1 دورة / ثانية).

يتصل علو الصوت أو شدته بمربع اتساع الموجة. ولأنّ أذن الإنسان تستطيع أن تكشف عن شدة الصوت من $10^{-12}\ \text{W/m}^2$ إلى أكثر من $1\ \text{W/m}^2$، فإنّ شدة الصوت تحدد على تدريج لوغاريتمي.

مستوى الصوت $\beta$ يحدد بـ ديسيبل، ويُعرف بدلالة الشدة $I$ بـ:

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \textbf{(1-12)}$$

حيث الشدة المرجعية $I_0$ تؤخذ عادة $10^{-12}\ \text{W/m}^2$.

الآلات الموسقية هي مصادر بسيطة للصوت حيث تنتج فيها موجات واقفة. قد تهتز الأوتار في الآلات الوترية ككل بوجود عقدتين عند النهايتين فقط. يسمى التردّدُ الذي تتكون عنده هذه الموجة الواقفة الترددَ الأساسيَّ. يقابل التردد الأساسي طول موجة مساو لضعف طول الوتر، $\lambda_1 = 2L$. يمكن للوتر كذلك أن يهتز بترددات أعلى تسمى الحل أو التوافقيات، وفيها تتكون عقدة إضافية أو أكثر. تردد كلّ جواب هو عدد صحيح من مضاعفات النغمة الأساسية.

في الآلات الهوائية ، تتكون الموجات الواقفة في العمود الهوائي ضمن الأنبوب.

يكوّن الهواء المهتز في **الأنبوب المفتوح** (مفتوح الطرفين) بطنين للإزاحة عند طرفي الأنبوب. يقابل التردد الأساسي طول موجة تساوي ضعف طول الأنبوب $\lambda_1 = 2L$.

التوافقيات لها ترددات تساوي $4,3,2,1$... مضاعفات التردد الأساسي، مثل الأوتار تماما.

في الأنبوب المغلق (مغلق طرف واحد) يقابل التردد الأساسي طول موجة تساوي أربعة أمثال طول الأنبوب: $\lambda_1 = 4L$. وتوجد الترددات الفردية فقط، وتساوي $7,5,3,1$... مضاعفات التردد الأساسي.

قد تتداخل الموجات الصوتية من مصادر مختلفة. إذا كان هناك صوتان يختلفان قليلا في التردد، يمكن عندها سماع الضربات بتردد يساوي الفرق في تردد المصدرين.

ظاهرة (أثر) دوبلر تعود إلى اختلاف درجة الصوت بسبب حركة المصدر أو السامع. إذا اقترب المصدر والسامع من بعضهما، فإنّ الدرجة المستقبلة تكون أعلى. ولكن إذا تحركا مبتعدين، فستكون الدرجة أقلّ.

[ *موجات الصدمة والدوي الصوتي تحدثان عندما ينتقل جسم بسرعة فوق صوتية – أعلى من سرعة الصوت. تستعمل موجات الصوت فوق السمعية (أكبر من 20 kHz) في تطبيقات كثيرة من بينها السونار والتصوير الطبي].

## أسئلـــة

**1.** ما الدليل على أنّ الصوت ينتقل كموجات؟

**2.** ما الدليل على أنّ الصوتَ شكلٌ من الطاقة؟

**3.** يلعب الأطفال أحيانًا بهاتف مُصنّع منزليًّا، وذلك بتثبيت خيط في قعر فنجانين من الورق. عندما نشدّ الخيط ويتكلّم طفل في أحد الفنجانين، يمكن سماع الصوت في الفنجان الثاني (الشكل 12-29). فسّر بوضوح كيف ينتقل الصوت من الفنجان الأول إلى الآخر؟

الشكل 12-29 (السؤال 3)

**4.** عند مرور موجةٍ صوتيّةٍ من الهواء إلى الماء، هل تتوقّع تغيّر التردد أو طول الموجة؟

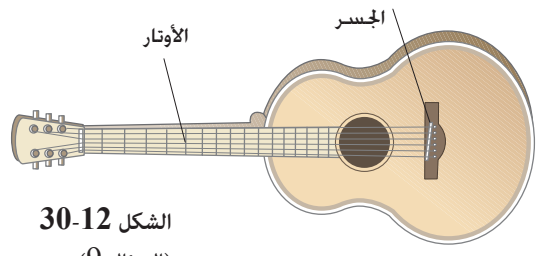
**5.** ما دليلك على أنّ سرعة الصوت في الهواء لا تعتمد بصورة ملموسة على التردد.

**6.** إذا استنشق شخصٌ الهيليوم، فإنّ صوته يبدو عاليًا، لماذا؟

**7.** كيف تؤثّر درجة حرارة الهواء الغرفة في درجة صوت أنابيب الأرغون؟

**8.** فسّر كيف يمكن استخدام أنبوب كمرشح لتخفيف الاتساع لترددات صوتية. (كاتم صوت السيارة).

**9.** لماذا تتقارب عتب القيثار (الشكل 12 - 30) عندما تتحرك على لوحة الأصابع نحو الجسر.




الشكل **12-30**
(السؤال 9).

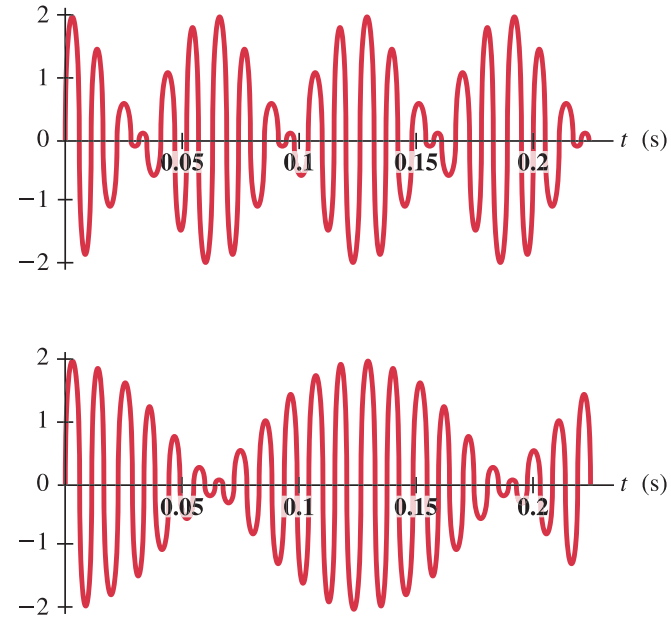
**10.** شاحنة ذات ضجيج تقترب منك خلف بناية. في البداية كنت تسمعها دون أن تراها. ولكن عندما تظهر وتراها، فإنّ صوتها يبدو أكثر "وضوحًا"-إنك تسمع جزءًا أكبر من الضجة عالية التردد. فسر ذلك [ مساعدة: انظر البند 11 - 15 عن الحيود].

**11.** يقال إنّ الموجات الواقفة تعود إلى "تداخل الموجات في الحيز" أمّا الضربات فتعود إلى "تداخل الموجات في الزمن". فسّر ذلك.

**12.** في (الشكل 12 - 16)، إذا تم تخفيض تردد المتكلمين، هل تقترب النقطتان $D$ و $C$ من بعضهما أم تبتعدان (حيث يحصل تداخلان: هدّام وبنّاء؟)

**13.** تلجأ الطرق التقليدية لحماية سمع الأشخاص الذين يعملون في مناطق ذات مستويات عالية من الضجيج بصورة رئيسة إلى تخفيض مستوى الضجيج. بتقانة جديدة، يضع الأشخاص سماعات أذن لا تحجب الضجة المحيطة. بدلًا من ذلك، تستعمل أداة تكشف عن الضجة وتحولها إلكترونيا، ثم تغذيها إلى السماعات بالإضافة إلى الضجة المحيطة. كيف يمكن لإضافة ضجة أكثر أن تخفض مستويات الصوت التي تصل الأذنين؟

**14.** افترض الموجتين المبينتين في (الشكل 12 - 31) . يمكن اعتبار كلّ موجةٍ على أنّها مكوّنة من تراكب موجتين صوتيتين بتردد مختلف قليلًا، كما في (الشكل 12 - 18) . في أيٍّ من الموجتين (أ) أم (ب) تكون ترددات الموجتين متباعدة أكثر؟ فسّر ذلك.

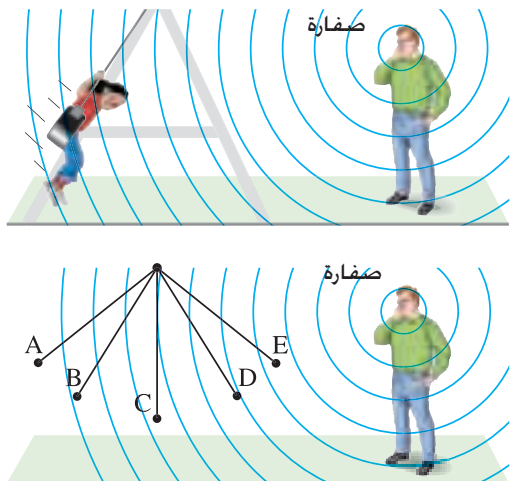



الشكل **12-31** (السؤال 14).

**15.** هل يحدث انزياح دوبلر إذا كان المصدر والملاحظ يتحركان بالسرعة نفسها و الاتجاه نفسه؟ فسّر ذلك.

**16.** إذا هبت رياح، فهل سيغيّر ذلك تردّد الصوت الذي يسمعه شخصٌ ساكن بالنسبة إلى المصدر؟ هل تغيّرت السرعة أو طول الموجة؟

**17.** يبين (الشكل 12 - 32) مواضع مختلفة لطفل في حالة حركة على أرجوحة. يطلق المرشد صفيرًا أمام الطفل على الأرض. في أيّ موقع A إلى E سوف يسمع الطفل أعلى تردّدٍ لصوت الصافرة؟ فسّر تحليلك.




الشكل **12-32** (السؤال 17).

# مسائـل

[ افرض أنّ درجة الحرارة $T = 20°C$ وسرعة الصوت في الهواء $v_{snd} = 343\ m/s$، إلا إذا نصّ على غير ذلك].

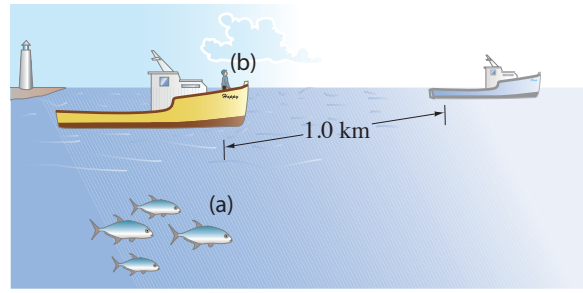
## 12-1 خصائص الصوت

**1.** (I) تقيس متنزهة طول بحيرة بالاستماع إلى صدى صرختها المنعكسة عن جرف في النهاية البعيدة للبحيرة. فإذا كانت تسمع الصدى بعد ثانيتين من إطلاق الصرخة. احسب طول البحيرة.

**2.** (I) يضرب بحّارٌ جانب سفينته مباشرة تحت خط الماء، فيسمع صدى الصوت المنعكس عن أرض المحيط مباشرة في الأسفل بعد 2.5 s. ما عمق المحيط عند هذه النقطة؟ افرض أنّ سرعة الصوت في ماء المحيط هي 1560 m/s (الجدول 12-1) ولا تتغير بصورة ملموسة مع العمق.

**3.** (I) (أ) احسب الأطوال الموجية في الهواء عند 20°C لأصوات في أقصى مدى السمع للإنسان، 20 Hz إلى 20,000 Hz.(ب) ما طول الموجة لموجة فوق صوتية ترددها 10-MHz؟

**4.** (II) يتحرك قارب صيد في المحيط فوق مجموعة من سمك التونة في يوم يغطيه الضباب. دون تحذير، حصلت نار خلفية في محرك قارب آخر على بعد 1.0 km (الشكل 12-33). كم يمضي من الوقت قبل أن تسمع النار الخلفية من قبل: (أ) السمك؟ (ب) الصياد؟




**الشكل 12 - 33** (المسألة 4).

**5.** (II) إذا ألقي حجر من قمة جرف، وسُمع صوت ارتطامه بالماء بعد 3.5 s، فما ارتفاع الجرف؟

**6.** (II) يضع شخص أذنه ملامسة لسطح الأرض، يرى هذا الشخص حجرًا يرتطم بالأرض الأسمنتية. وبعد برهة سمع صوتين من الارتطام؛ أحدهما يسير في الهواء والآخر يسير في الأرض الأسمنتية، والفاصل الزمني بينهما 1.1 s. ما بعد مكان حدوث الارتطام؟ انظر (الجدول 12-1) .

**7.** (II) احسب الخطأ المئوي على مسافة ميل واحد والناتج من* "قاعدة الخمس ثوان" لتقريب مسافة حدوث البرق إذا كانت درجة الحرارة (أ) 30°C. (ب) 10°C *

## 12-2 شدة الصوت؛ ديسبل

**8.** (I) ما شدة الصوت عن مستوى الألم 120 dB؟ قارن ذلك بالهمس 20 dB.

**9.** (I) ما مستوى الصوت لصوت شدته $2.0 \times 10^{-6}\ W/m^2$؟ *

**10.** (II) مفرقعتان ناريتان تنتجان مستوى صوت 95 dB إذا اطلقتا في اللحظة نفسها وفي مكان معين، ماذا سيكون مستوى الصوت لو فجرت إحداهما فقط؟ [ مساعدة: اجمع الشدة وليس dB]. *

**11.** (II) يقف شخصٌ على مسافةٍ معيّنةٍ من طائرة بأربعة محركات متساوية الضجيج، وتعطي صوتًا بمستوى حافة الألم، 120* dB. ما مستوى الصوت الذي يعانيه هذا الشخص لو أطفأ قائد الطائرة المحركات ما عدا واحدا؟ [ مساعدة : اجمع الشدة وليس الـ dB].

**12.** (II) مسجل أشرطة يُقال إنّ له نسبة إشارة – ضجيج 58 dB، ولكنها لجهاز CD تساوي 95 dB. ما نسبة شدة الإشارة إلى ضجيج الخلفية لكلّ جهاز؟

**13.** (II) (أ) بالتقريب، احسب القدرة الناتجة لصوت شخص يتكلم في محادثة عادية. استعمل (الجدول 12-2) . افرض أنّ الصوت ينتشر بانتظام، ويتوزع على كرة مركزها الفم. (ب) ما عدد الأشخاص الذين يلزمون لإنتاج قدرة صوت كلية مقدارها 100 W لمحادثة عادية؟ [ مساعدة: اجمع الشدة وليس dB].

**14.** (II) تضرب موجة صوتية ذات 50-dB طبلة أذن مساحتها $5.0 \times 10^{-5}\ m^2$ (أ) ما مقدار الطاقة الممتصة من الطبلة في الثانية؟ (ب) بهذا المعدل، ما الزمن اللازم لحصول الأذن على طاقة 1J؟

**15.** (II) المكبر غالي الثمن A قدرته 250 W، أما المكبر الأحدث B فقدرته 40 W.(أ) احسب مستوى الصوت بـ dB الذي تتوقعه عن نقطة تبعد 3.5 m عن سماعة توصل مع كلّ منهما على انفراد. (ب) هل سيكون علو الصوت في المكبر غالي الثمن ضعف علو الصوت من المكبر الأقلّ ثمنا؟

**16.** (II) في حفل موسيقى الروك، سجل مقياس dB على بعد 2.8 m من سماعة 130 dB.(أ) ما القدرة الناتجة من السماعة بفرض انتشار كروي منتظم للطاقة، وإهمال امتصاص الصوت في الهواء؟(ب) على أيّ بعد سيكون مستوى الصوت معقولًا، 90 dB؟

**17.** (II) يستطيع الإنسان العادي التمييز بين مستويين في الصوت يختلفان بـ 2.0 dB. ما النسبة بين اتساع صوتين يختلف مستواهما بهذا القدر؟ [ مساعدة: انظر البند 11-9].

**18.** (II) إذا زاد اتساع موجةٍ صوتيّةٍ إلى ثلاثة أمثال قيمته. (أ) بأيّ نسبةٍ ستزداد الشدة؟ (ب) كم dB سوف يزداد مستوى الصوت؟

**19.** (II) موجتان صوتيتان لهما اتساعا إزاحة متساويان، ولكن تردد إحداهما ضعف تردد الأخرى. ما النسبة بين شدتيهما؟

**20.** (II) ماذا سيكون مستوى الصوت (dB) لموجة صوتية في الهواء تقابل اتساع إزاحة جزيء مهتز من الهواء 0.13 mm عند 300 Hz؟

## * 12-3 ارتفاع الصوت

**21.** (I) ماذا يجب أن يكون عليه مستوى الصوت لنغمة 6000 Hz لكي يبدو ارتفاعها كنغمة 100 Hz ومستواها 50 dB؟ (انظر الشكل 12-6).

**22.** (I) ما أقلّ وأعلى ترددين يمكن للأذن سماعهما إذا كان مستوى الصوت 30 dB ( انظر الشكل 12 - 6).

**23.** (II) يستطيع جهازك السمعي أن يتواءم مع مدى هائل من مستويات الصوت. ما النسبة بين أعلى وأخفض شدّتين عند: (أ) 100 Hz ؟(ب) 5000 Hz؟ (انظر الشكل 12 - 6).

## 12-4 مصادر الصوت؛ الأوتار والأعمدة الهوائية

**24.** (I) الذبذة الرئيسية للوتر *a* على آلة الكمان هي 440 Hz وطول الجزء المهتز منه هو 32 cm، وكتلة هذا الجزء هي 0.35 g. ما مقدار الضغط الذي يجب وضعه على هذا الوتر؟ ؟

**25.** (I) أنبوب أرغون طوله 112 cm. ما تردد النغمة الأساسية والإجابات الثلاث الأولى إذا كان الأنبوب:(أ) مغلق الطرف؟ (ب) مفتوح الطرفين؟

**26.** (I) (أ) ما تردد الرنين الذي تتوقعة عند النفخ في زجاجة صودا فارغة عمقها 18 cm على فرض أنّها أنبوب مغلق؟ (ب) كيف سيتغير ذلك إذا كان ثلثها مملوءًا بالصودا؟

**27.** (I) إذا كنت ترغب في صنع أنابيب أرغون مفتوحة بحيث تعطي المدى السمعي للإنسان (20 Hz إلى 20 kHz)، مامدى أطوال الأنابيب المطلوبة؟

**28.** (II) وتر قيثار مشدود، التردد التوافقي الثالث له 540 Hz. ماذا سيكون تردد النغمة الأساسية إذا استعمل 60% فقط من طوله الأصلي؟

**29.** (II) طول وتر قيثار 0.73 m، وينغم ليعطي E فوق C الوسطى (330 Hz).(أ) على أيّ بعد من نهاية الوتر يجب أن توضع عتبة القيثار ليعطي نغمة A فوق C الوسطى (440 Hz)؟ (ب) ما طول الموجة لهذا الوتر 440-Hz؟ (جـ) ما تردد الموجة الصوتية الناتجة في الهواء وطولها عند 20°C من هذا الوتر؟

**30.** (II) (أ) حدّد طول أنبوب أرغون مفتوح يعطي نغمة c الوسطى (262 Hz) عندما تكون درجة الحرارة 21°C. (ب) ما طول الموجة والتردد للنغمة الأساسية للموجة الواقفة في هذا الأنبوب؟ (ج) ما قيمة $\lambda$ والتردد f للموجة الصوتية المنتقلة في الهواء الخارجي؟

**31.** (II) أنبوب أرغون في حالة تنغيم عند 20°C. بأيّ نسبة سوف يختلف التردد عند 5.0°C؟

**32.** (II) على أيّ بعد من مزمار الناي في (المثال 12-10) ستكون الفتحة المكشوفة تعطي D فوق C الوسطى عند 294 Hz؟

**33.** (II) (أ) عند درجة حرارة $T = 20°C$، ما طول أنبوب أرغون مفتوح لإعطاء نغمة أساسية 294 Hz؟ (ب) إذا ملىء أنبوب بالهيليوم، ماذا سيكون تردد نغمته الأساسية؟

**34.** (II) أنبوب أرغون خاص يعطي نغمات عند 264 Hz، و 440 Hz، و 616 Hz ولكن بعدم وجود ترددات أخرى بينها. (أ) بين لماذا هذا الأنبوب مفتوح أو مغلق. (ب) ما التردد الأساسي لهذا الأنبوب؟

**35.** (II) أنبوب منتظم ضيق طوله 1.80 m مفتوح الطرفين. يعطي الترددين المتتابعين 275 Hz، و 330 Hz.(أ) ما النغمة الأساسية له؟ (ب) ما سرعة الصوت في الغاز داخله؟

**36.** (II) أنبوب في الهواء عند درجة 20°C يراد تصحيحه بحيث يعطي ترددين متتابعين عند 240 Hz، و 280 Hz. ما طول هذا الأنبوب؟ هل الأنبوب مفتوح أم مغلق؟

**37.** (II) كم جواب موجود ضمن المدى السمعي لأنبوب أرغون طوله 2.14-m ودرجة 20°C إذا كان: (أ) مفتوحًا؟ (ب) مغلقًا؟

**38.** (III) طول قناة أذن الإنسان حوالي 2.5 cm، وهي مفتوحة للخارج، ومغلقة عند النهاية الأخرى بواسطة غشاء الطبلة. احسب الترددات (في مدى السمع) للموجات الواقفة في قناة الأذن. ما علاقة إجابتك مع المعلومات الموجودة في (الشكل 6-1)؟

## 6-12 التداخل؛ الضربات

**39.** (I) عازف بيانو يسمع ضربةً واحدةً كلّ ثانيتين عند محاولته ضبط وترين، أحدهما يطلق صوتًا بتردد 440 Hz. ما بعد الوتر الآخر من حيث التردد؟

**40.** (I) ماتردد الضربات عند عزف النغمتين (262 Hz)، و (277 Hz) C♯ معا؟ ماذا لو عزفت كلّ منهما بتردد أقلّ بمعامل يساوي 4؟

**41.** (I) صفارة كلب تعمل على 23.5 kHz، ولكن هناك صفارة أخرى (موسومة X) تعمل على تردد غير معلوم. فإذا كانتا غير مسموعتين من الإنسان عندما تعملان منفردتين، ولكن عواءً حادًا ترددة 5000 Hz يحدث عندما تعملان معًا، احسب تردد الصفارة الموسومة X.

**42.** (II) وتر قيثار ينتج 4 ضربات/ ثانية عندما يعمل مع شوكة رنانة ترددها 350 Hz، في حين يعمل 9 ضربات/ ثانية إذا عمل مع شوكة رنانة ترددها 355 Hz. ما تردد الوتر؟ فسر استنتاجك.

**43.** (II) وترا قيثار نغما ليعطيا التردد 294 Hz نفسه، تم إنقاص الشد في أحدهما بنسبة 2.0%. ماذا سيكون تردد الضربات عندما يعزفان معًا؟ [مساعدة: تذكّر المعادلة 11-13].

**44.** (II) ماعدد الضربات التي سوف تسمع عند عمل نايَيْن متشابهين كلّ منهما تعزف 262 Hz، لكن إحداهما عند 5.0°C، والأخرى عند 25.0°C؟

**45.** (II) لديك ثلاث شوكات رنانة؛ A، B و C. الشوكة B ترددها 441 Hz، وعند عمل A،B معا يسمع تردد ضربات 3 Hz. ولكن عند عمل B و C معا يكون تردد الضربات 4 Hz. ما الترددات الممكنة لـ A و C؟

**46.** (II) البعد بين سماعتين 1.80 m. يقف شخص على بعد 3.00 m من إحداهما و 3.50 m من الأخرى.(أ) ما أقلّ تردد يحدث عنده تداخل هدّام في هذا المكان؟(ب) احسب ترددين آخرين يحدث عندهما تداخل هدّام في هذا المكان(أعط الترددين الأعلى). افرض أنّ درجة الحرارة $T = 20°C$.

**47.** (III) وترا بيانو يفترض أنّ لهما التردد 132 Hz نفسه، لكن عازف بيانو يسمع ثلاث ضربات كلّ ثانيتين عند عزفهما معا. (أ) إذا عزف أحدهما 132 Hz، فماذا يجب أن يكون تردد الآخر (هل هناك جواب واحد)؟(ب) بكم (نسبة مئوية) يجب زيادة الشد أو إنقاصه ليصبحا متناغمين؟

**48.** (III) مصدر صوتي يطلق صوتا طول موجة 2.64 m و 2.76 m في الهواء. كم عدد الضربات التي ستسمع في الثانية ؟ (افرض $T = 20°C$).

## 7-12 ظاهرة دوبلر

**49.** (I) التردد المتوسط لصفارة إنذار سيارة إطفاء هو 1550 Hz في حالة السكون. ما التردد الذي تستقبله إذا تحركت بسرعة 30.0 m/s (أ) نحو سيارة الإطفاء؟ (ب) بعيدًا عن سيارة الإطفاء؟

**50.** (I) إذا كنت تقف ساكنًا، ما التردد الذي تستقبله لصفارة إنذار إطفائية تطلق صفيرًا بتردد 1550 Hz إذا تحركت بسرعة 32 m/s (أ) نحوك؟ (ب) بعيدا عنك؟

**51.** (II) (أ) قارن الانزياح في التردد إذا كان هناك مصدر صوتي بتردد 2000 Hz يسير نحوك بسرعة 15 m/s، مقابل تحركك نحوه بسرعة 15 m/s. هل الترددان متساويان تماما؟ هل هما قريبان؟(ب) أعد الحسابات لسرعة 150 m/s ثم 300 m/s . ماذا تستنتج حول عدم تماثل نتائج أثر دوبلر؟

**52.** (II) سيارتان، كلّ منهما مزودة ببوق ذي تردد منفرد ومتماثلين. عندما تكون إحداهما ساكنة والأخرى تتحرك نحوها بسرعة 15 m/s، فإنّ السائق الساكن يسمع ضربات بتردد 5.5 Hz، فما التردد الذي يطلقة كلّ بوق؟ $T = 20°C$.

**53.** (II) وطواط ساكن يطلق موجات فوق صوتية بتردد 50.0 kHz، ويستقبلها مرتدة من جسم يتحرك مباشرة بعيدا عنه وبسرعة 25 m/s. ما تردد الصوت الذي يستقبله الوطواط؟

**54.** (II) وطواطٌ يطير نحو جدارٍ بسرعة 5.0 m/s، وفي أثناء طيرانه يصدر الوطواط موجاتٍ فوق صوتيّةٍ بتردّد 30.0 kHz، ما التردّد الذي يسمعه الوطواط في الموجات المنعكسة؟

**55.** (II) في إحدى تجارب دوبلر الأصلية، عزف بوقٌ بتردد 57 zH على عربة قطار مفتوحة متحركة، وعزف بوق مماثل بالنغمة نفسها في محطة القطار. ما تردد الضربات المسموع إذا اقتربت عربة القطار من المحطة بسرعة 10.0 m/s؟

**56.** (II) مقياس جريان دوبلر يستخدم موجات فوق صوتية لقياس سرعة جريان الدم.افرض أنّ الجهاز يطلق صوتا بتردد 3.5 MHz، وسرعة الصوت في أنسجة جسم الإنسان 1540 m/s. ما تردد الضربات المتوقع إذا كان الدم يتدفق في أوردة القدم بسرعة 2.0 cm/s بعيدا عن مصدر الصوت؟

**57.** (III) يستخدم أثر دوبلر باستعمال موجات فوق صوتية بتردد $2.25 \times 10^6$ Hz لعرض نبضات القلب لجنين. لوحظ (أقصى) تردد ضربات 500 Hz. بفرض أنّ سرعة الصوت في الأنسجة $1.54 \times 10^3$ m/s، احسب أقصى سرعة لسطح القلب النابض.

**58.** (III) تطلق صفارة مصنع صفيرا بتردد 570 Hz عندما تكون سرعة الرياح من الشمال 12.0 m/s، ما التردد الذي يسمعه العاملون وهم ساكنون في موقعهم (أ) إلى الشمال من الصفارة؟ (ب) إلى جنوبها؟ (جـ) إلى شرقها؟ (د) إلى غربها؟ ما التردد الذي يسمعه راكب دراجة يتجه (هـ) نحو شمالها (و) نحو غربها بسرعة 15.0 m/s؟ افرض درجة الحـرارة $T = 20°C$.

### * 12-8: موجات الصدمة؛ الدويّ الصوتي

**59.*** (I) (أ) ما السرعة التي يتحرك بها جسم على الأرض إذا كانت سرعته عند 20°C هي 0.33 ماخ (ب) نفاثة تطير بسرعة 3000 km/h تعطي عدد ماخ يساوي 3.2 على الشاشة. ما سرعة الصوت عند هذا الارتفاع؟

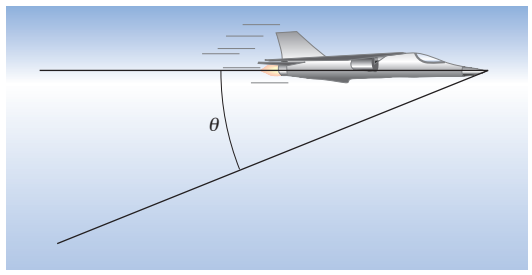
**60.*** (II) طائرةٌ تنتقل بـ 2.3 ماخ حيث سرعة الصوت تساوي 310 m/s. (أ) ما قيمة الزاوية التي تعملها موجة الصدمة مع اتجاة حركة الطائرة؟ (ب) إذا كانت الطائرة تحلّق على ارتفاع 7100 m، ما الزمن اللازم مروره كي يسمع شخص على الأرض موجة الصدمة في حال أنها فوقه مباشرة؟

**61.*** (II) مركبة فضائية تدخل الغلاف الجوي الرقيق لكوكب حيث سرعة الصوت 35 m/s. (أ) ما قيمة عدد ماخ المركبة إذا كانت سرعتها 15,000 km/h؟ (ب) ما زاوية موجة الصدمة نسبة إلى اتجاه الحركة؟

**62.*** (II) نيزك يسير بسرعة 8500 m/s يصطدم بالمحيط. احسب زاوية موجة الصدمة التي ينتجها (أ) في الهواء قبيل دخوله المحيط. (ب) في الماء بعد دخوله مباشرة. افرض أنّ درجة الحرارة $T = 20°C$.

**63.*** (II) بيّن أنّ الزاوية $\theta$ التي يكوّنها الدويّ الصوتيُّ مع اتجاه نفاثة فوق صوتية يعطى (بالمعادلة 12-5).

**64.*** (II) تنظر رأسيًّا نحو الأعلى لرؤية طائرة على ارتفاع 1.5 km فوق الأرض تطير بسرعة أكبر من سرعة الصوت. عند زمن سماعك دوي الصوت، تكون النفّاثة قد تحرّكت مسافةً أفقيّةً 2.0 km. انظر (الشكل 12-34). احسب: (أ) زاوية مخروط الصدمة $\theta$. (ب) سرعة النفاثة (عدد ماخ). افرض أنّ سرعة الصوت 330 m/s.




**الشكل 12-34** (مسألة 64)

## مسائل عامة

**65.** يستعمل صائد سمك السونار الذي يرسل نبضاتٍ صوتيّةً تردّدها 20,000-Hz نحو الأسفل من قاعدة قاربه، ثم يكشف الصدى. إذا كان أكبر عمق مصمم للعمل به هو 200 m، فما أقلّ وقت بين النبضات ( في الماء العذب)؟

**66.** تقريبا، كم أوكتافا ( ثمانية) في مدى السمع عند الإنسان؟

**67.** يحتوي معرض للعلوم على سمفونية أنابيب تتكون من أنابيب بلاستيكية عديدة بأطوال مختلفة ومفتوحة الطرفين إذا كانت أطوالها 3.0 m,2.5 m,2.0 m,1.5 m,1.0 m (أ) فما الترددات التي تسمعها أذن زائر يضع أذنه قرب نهاية الأنابيب؟ (ب) لماذا يعمل هذا النظام بصورة أفضل في يوم صاخب عنه في يوم هادىء؟

**68.** تصدر بعوضة على بعد 5.0 m من شخص صوتًا قريبًا من عتبة السمع للإنسان (0 dB). ماذا سيكون مستوى الصوت الناتج من 1000 بعوضة من هذا النوع؟

**69.** ما محصلة مستوى الصوت عندما نسمع معًا صوتًا مستواه 82-dB، وآخر مستواه 87-dB؟

**70.** مستوى الصوت على بعد 12.0 m من سماعة في العراء هو 105 dB. ما القدرة الصوتية (W) لهذه السماعة بفرض أنّها تطلق الصوت بانتظام في الاتجاهات كافة؟

**71.** مكبر مسجّلة(ستيريو) معدل الطاقة الناتجة له 150 W عند تردد 1000 Hz. تقل القدرة بمقدار 10 dB عند تردد 15 kHz. ما مقدار القدرة بالواط عند تردد 15 kHz؟

**72.** يستخدم العاملون حول طائرة نفاثة عادةً واقيات لآذانهم. افرض أنّ مستوى الصوت لمحرك النفاثة على بعد 30 m هو 140 dB، وأنّ نصف القطر المتوسط لفتحة أذن الإنسان هي 2.0 cm. ما القدرة التي ستتلقاها أذن غير محمية على بعد 30 m من المحرك؟

**73.** في الصوتيات والاتصالات يعرف الكسب، β، بـ (ديسيبل) كما يلي :

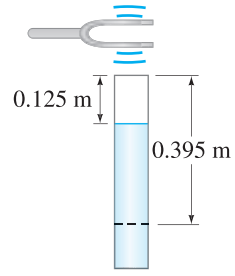
$$\beta = 10 \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

حيث $p_{in}$ قدرة الدخل للنظام، و$P_{out}$ قدرة الخرج. يعطي جهاز مسجّلة(ستيريو) 100 W من القدرة مقابل قدرة الدخل 1mW. فما هو الكسب بـ dB؟

**74.** كلّ وترٍ في الكمان ينغم إلى تردّدٍ يساوي $1\frac{1}{2}$ مرّة من تردّد الوتر المجاور. سوف توضع الأوتار الأربعة متساوية الطول تحت الشد نفسه. ماذا ستكون كتلة وحدة الأطوال لكلّ وتر نسبة إلى أقلّها كثافة؟

**75.** طول الوتر A في الكمان 32 cm، ويقع بين نقطتين ثابتتين وبتردد طبيعي 440 Hz، وكتلة وحدة أطوال $6.1 \times 10^{-4}$ kg/m. (أ) ما سرعة الموجة والشّدّ في الوتر؟ (ب) ماذا سيكون طول الأنبوب (مثل أنبوب أرغون) مغلق الطرف الذي تردده الأساسي 440 Hz إذا كانت سرعة الصوت في الهواء 343 m/s؟ (ج) ماذا سيكون تردد الجواب الأول لكلّ من الآلتين؟

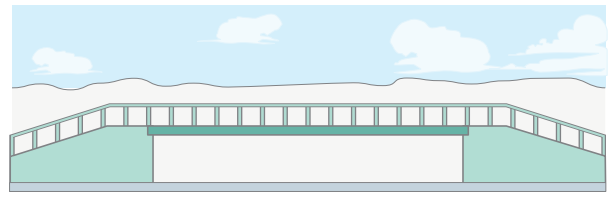
**76.** تهتز شوكة رنانة فوق أنبوب عمودي مفتوح ومملوء بالماء (شكل 12-35) يسمح لمستوى الماء بالانخفاض تدريجيًا. خلال ذلك، يسمع عمود الهواء فوق سطح الماء ويعمل رنينا مع الشوكة الرنانة عندما تكون المسافة من فوهة الأنبوب إلى سطح الماء 0.125 m وكذلك عند 0.395 m. ما تردد الشوكة الرنانة؟




**الشكل 12-35**
مسألة 76

**77.** وتر قيثار طوله 75 cm وكتلته 2.10 g بالقرب من أنبوب مفتوح الطرف وطوله كذلك 75 cm. ما مقدار الشّدّ في الوتر إذا كان عليه أن يعمل رنينًا (في موجته الأساسية) مع التوافقي الثالث للأنبوب؟

**78.** لوحظ أنّ جسرًا فوق طريق سريع يهتز كحلقة كاملة $(\frac{1}{2}\lambda)$ عندما تؤثر هزة أرضية بسيطة ترددها 4.0 Hz. وضعت مصلحة الطرق السريعة دعامة في منتصف الجسر كما هو مبين في (الشكل 12-36). ما تردد الرنين الذي تتوقعه للجسر الجديد؟ الهزات الأرضية نادرا ما تعمل اهتزازًا للجسور فوق 5 Hz أو 6 Hz. هل التعديل الذي تم إجراؤه كان مناسبا؟




**الشكل 12-36**
مسألة 78

**79.** سمع شخصٌ نغمةً نقيّةً في المدى 500–1000-Hz آتيةً من مصدرين. يكون الصوت أعلى ما يمكن عند نقاط تبعد المسافات نفسها من المصدرين. ولتحديد التردد بالضبط؛ تجول الشخص ليجد أنّ مستوى الصوت يكون أقلّ ما يمكن عند نقطة تبعد عن المصدر الأول بمقدار 0.34 m أكثر من بعدها عن المصدر الثاني. فما تردد الصوت؟

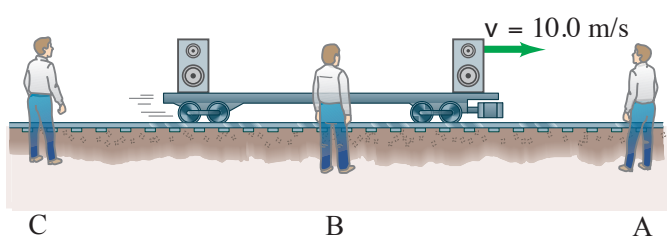
**80.** يطلق قطاران صفارتيهما بتردد 424-Hz، أحد القطارين ساكن. يسمع المرشد في القطار الساكن تردد ضربات 3.0 Hz عند اقتراب القطار الآخر. فما سرعة القطار المتحرك؟

**81.** تردد صفارة قطار بخاري 538 Hz، عند اقترابه منك وبعد مروره بك يقاس تردده بـ 486 Hz. ما السرعة التي كان يتحرك بها القطار؟ (افرض أنّ السرعة ثابته).

**82.** على مسار سباق، يمكنك تخمين سرعة السيارات بواسطة الفرق في درجة صوت محرك السيارة بين السيارات المقتربة والمبتعدة. افرض أنّ إحدى السيارات انخفض صوتها بثماني كامل (أوكتاف)(انتصف ترددها) عند مرورها على طريق مستقيم. ما السرعة التي كانت تسير بها؟

**83.** أنبوبا أرغون مفتوحان، يصدران صوتًا معًا، وينتج تردد ضربات 11 Hz. إذا كان طول الأنبوب الأقصر 2.40 m، فما طول الآخر؟

**84.** سماعتان عند طرفي عربة قطار يمر أمام ملاحظ ساكن بسرعة 10.0 m/s، كما هو مبين في (الشكل 12-37). إذا كان تردد السماعتين متساويا 212 Hz، فما تردد الضربات الذي يسمعه الملاحظ عندما: (أ) يسمع من الموقع A أمام العربة؟ (ب) يقف بين السماعتين، عند B؟ (ج) يسمع السماعتين بعد مرورهما أمامه عندC؟




**الشكل 12-37**
(مسألة 84)

**85.** إذا كانت سرعة جريان الدم في الأوردة الدموية حوالي 0.32 m/s، ما تردد الضربات الذي تتوقعة من موجات فوق صوتية ترددها 5.50-MHz التي تم توجيهها على امتداد الجريان وانعكست عن كريات الدم الحمراء؟ افرض أنّ الموجات تسير بسرعة $1.54 \times 10^3$ m/s

**86.** يطير وطواط نحو فراشة بسرعة 6.5 m/s، في حين تطير الفراشة نحو الوطواط بسرعة 5.0 m/s. يطلق الوطواط موجة صوتية تردّدها 51.35 khz. ما تردّد الموجة التي يستقبلها الوطواط بعد انعكاسها عن الفراشة؟

**87.** يطلق وطواط سلسلة من النبضات الصوتية عالية التردّد عند اقترابه من فراشة. الفترة الزمنية بين النبضات هي 70.0 ms، وطول الفترة الزمنية للنبضة 3.0 ms. ما البعد الذي ستكون عنده الفراشة، والذي يمكّن الوطواط من إيجادها بحيث يعود الصدى من كلّ صرخة قبل إطلاق الصرخة التالية له؟

**88.** استعمل البوق الألبيّ ( شكل 12-38) مرّةٍ لإرسال إشارات من قرية ألبيّة إلى أخرى . وبما أنّ الترددات المنخفضة للأصـوات أقلّ قابليّة لفقد الشدة (الطاقة) فقد استعملت أبواقٌ طويلةٌ للحصول على أصواتٍ عميقة. عند استعمال هذه الأبواق كآلات موسيقية، يجب أن ينفخ في البوق بحيث يعمل أحد الحل فقط رنينًا. أكثر الأبواق الألبية شعبيّة طوله حوالي 3.4 m، ويُسَـمّى F الحاد (أو G المنبسط) . ما التردّد الأساسيُّ لهذا البوق؟ وأيُّ جوابٍ قريبٍ من F الحاد؟ (انظر الجدول 12-3) افرض أنّه أنبوب مفتوح.

**الشكل 12-38**
(مسألة 88).

**89.** صوتيّات الغرفة لسماع (ستيريو) يمكن تسويته بوجود موجاتٍ واقفة تسبّب " بقعًا ميتة" صوتيًّا عند مواقع عقد الضغط. افترض غرفة معيشة طولها 5.0 m وعرضها 4.0 m وارتفاعها 2.8 m. احسب الترددات الأساسيّة للموجات الواقفة في هذه الغرفة؟

**90.** هناك عرضٌ تمثيلي يُسَمّى" القضبان المغنية"، يحتوي على قضيب ألمنيوم طويل ورفيع ليقبض باليد عند منتصفه. يطرق القضيب باليد الأخرى. وبتمرين قليل نجعل القضيب "يغني" أو يطلق رنينًا واضحًا عاليًا. القضيب طوله 90-cm . (أ) ما التردد الطبيعي للصوت؟ (ب) كم طول الموجة في قضيب الألمنيوم؟ (ج) كم طول الموجة الذي ينتقل في الهواء عند 20°C؟

***91.** شدة الصوت عند عتبة السمع لأذن الإنسان عند تردد 1000 Hz هي $I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}$، حيث $\beta$ مستوى الصوت تساوي 0 dB. وعتبة الألم عند التردد نفسه حوالي 120 dB، أي $I = 1.0\,\mathrm{W/m^2}$ وهو ما يقابل زيادة في شدة الصوت بمعامل $10^{12}$. بأيّ معامل يتغير اتساع الإزاحة $A$؟

***92.** تسير طائرة بسرعة Mach 2.0. يسمع ملاحظ على الأرض الدويّ الصوتي بعد 1.5 min من مرور الطائرة مباشرة فوق رأسه. ما ارتفاع الطائرة؟

***93.** أثر قارب سريع يعمل زاوية 15° في بحيرة سرعة موجة الماء هي 2.2 km/h. احسب سرعة القارب.

## إجابات التمارين

**أ:** 1 km. لكلّ ثلاث ثوانٍ قبل سماع صوت الرعد.

**ب:** 4 مرات أكثف.

**جـ:** ربع القيمة الأصلية: 6 dB.

**د:** 257 Hz

**هـ:** 6 Hz

**و:** (أ) 1717 Hz ؛ (ب) 1483 Hz