طبيعة الأمواج الصوتية

The Natural of Sound Waves

مقدمة (Introduction):

يقدم هذا الفصل معلومات عامة عن الأمواج الصوتية من حيث الطبيعة والنوع والتواتر، فيبدأ بتقديم تعاريف أساسية ومن ثم يقدم كيفية وصف الأمواج الصوتية من حيث الإزاحات التي تسببها لجسيمات الوسط أو من حيث تقلبات الضغط ويتعرض أخيراً لخصائص الصوت مع مجموعة من الأمثلة.

1.1 تعاريف أساسية (Basic Definitions)

الحركة الدورية (Periodic Motion): حركة تكرر نفسها خلال فواصل زمنية متساوية.

الحركة الاهتزازية (Oscillation): تأرجح الجسم المهتز إلى جانبي موضع توازنه.

السعة (The amplitude): هي أعظم إزاحة يصنعها الجسم المهتز عن وضع توازنه ويرمز لها بـ A . هي دائماً موجبة وواحدتها في الجملة الدولية m.

الدور (The period): هو زمن هزة واحدة ورمزه T. وهو دائماً موجب وواحدته في الجملة الدولية s.

التواتر (The frequency): هو عدد الهزات في واحدة الزمن ورمزه f. وهو دائماً موجب وواحدته في الجملة الدولية الهرتز Hz.

$$\mathbf{1\ hertz = 1\ Hz = 1\ cycle/s = 1\ s^{-1}}$$

التواتر الزّوي (angular frequency): هو 2π مضروباً بالتواتر ورمزه ω وواحدته في الجملة الدولية rad/s.

$$\omega = 2\pi f \qquad \textbf{(1.1)}$$

من تعريف الدور و التواتر نجد:

$$f = \frac{1}{T} \quad \& \quad T = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(2.1)}$$

من تعريف التواتر الزّواي نجد:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \qquad \textbf{(3.1)}$$

2.1 الأمواج (Waves)

تعرّف الموجة على أنها اضطراب في الوسط ينتشر باتجاه معين وسرعة معينة، ويقوم بنقل الطاقة في اتجاه انتشار الموجة. تصنف الأمواج من حيث الطبيعة إلى:

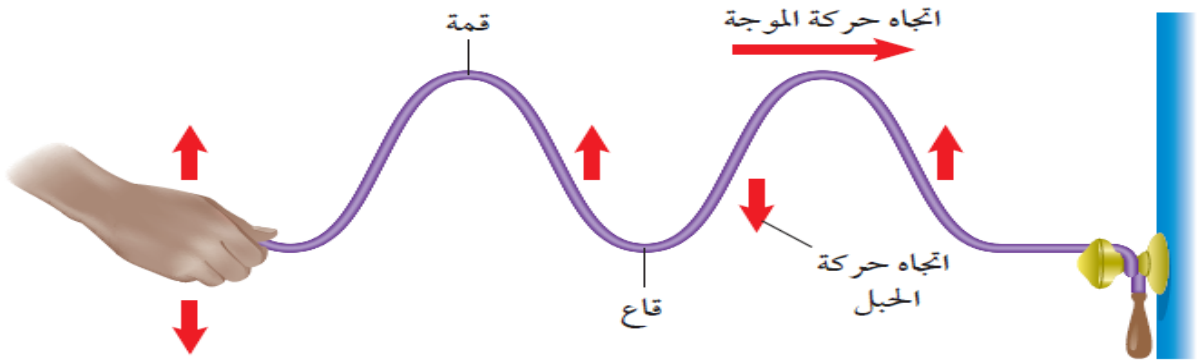
- **أمواج ميكانيكية (Mechanical Waves):**
  - تحتاج إلى وسط كي تنتشر فيه (مثل الأمواج الصوتية)
  - سرعة انتشارها ثابتة في الأوساط المتجانسة وتتعلق بنوع الوسط ودرجة حرارته وكثافته.

- **أمواج كهرومغنطيسية (Electromagnetic Waves):**
  - لا تحتاج إلى وسط مادي كي تنتشر فيه (مثل الأمواج الضوئية)
  - سرعة انتشارها في الخلاء ثابتة وتساوي سرعة انتشار الضوء $c = 3\times10^8$ m/s

أما من حيث النوع فتصنّف إلى:

- **أمواج عرضية (Transverse Wave):**

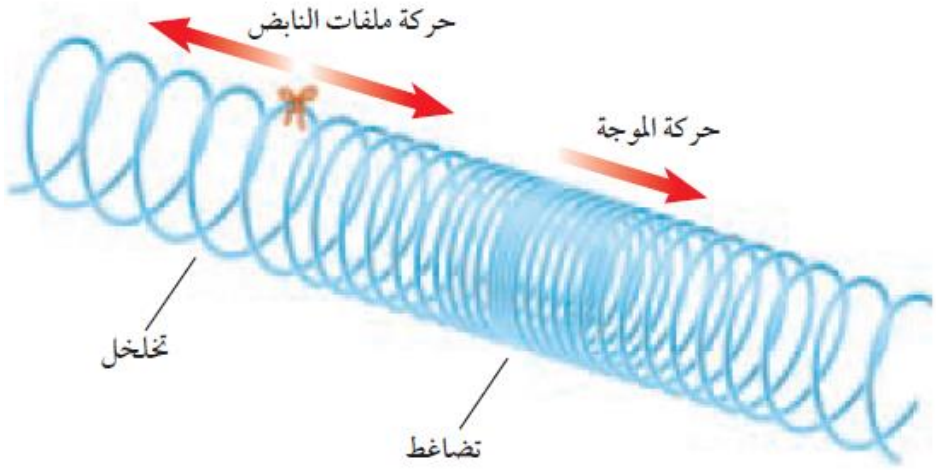
تهتز فيها جزيئات الوسط وفق منحى عمودي على جهة انتشار الموجة كما في الأمواج المنتشرة على سطح الماء والأمواج الضوئية (كما هو واضح في الشكل 1.1).



الشكل 1.1: يوضح شكل الموجة العرضية وكيفية انتشارها.

- **أمواج طولية (Longitudinal Wave):**

تهتز فيها جزيئات الوسط وفق اتجاه موازٍ لجهة انتشار الموجة كما في أمواج الصوت (كما هو واضح في تشكل 2.1).



الشكل 2.1: يوضّح شكل الموجة الطولية وكيفية انتشارها.

3.1 الأمواج الصوتية (Sound Waves)

يعرّف الصوت في الفيزياء بأنه الإحساس السمعي المتولد في الأذن البشرية بسبب الأمواج الصوتية الصادرة عن جسم مادي يهتز بتواترات محصورة بين 20 و 20,000 هرتز. أمّا في علم الأحياء وعلم النفس، فيتم تعريف الصوت على أنّه استقبال هذه الأمواج من قبل الكائن الحي وتحليلها في الدماغ وترجمتها إلى إشارات يمكن للكائن الحي فهمها. وتتصف الأمواج الصوتية بالصفات الآتية:

- الموجة الصوتية هي موجة طولية تنتشر في الأوساط المادية فقط

- ينتشر الصوت في جميع الاتجاهات من المنبع الصوتي
- لا ينتشر الصوت في الفراغ
- لكي ينتشر الصوت لا بد من وجود وسط مادي (صلب – سائل – غازي).

فمثلا أذن الأنسان في شكلها الخارجي تتكون من عدة مسارات منحنية بدرجة معينة، وهذا الشكل تحديداً يجعلها قادرة على تجميع الأمواج الصوتية التي تصل إليها وتحدد مسار لهذه الأمواج حتى تدخل للأذن، وبعد هذا تقوم الأذن الداخلية بارسال رسالة للدماغ بوجود مؤثر مما يحفز الدماغ لارسال رسالة تفيد بتشغيل المستقبلات الداخلية للأذن للقيام بوظفيتها فتقوم بتحليل هذه الأمواج لأصوات متقطعة تكوّن كلّها معاً مقطعا صوتياً ما له معنى ما في دماغ الأنسان حيث يقوم بترجمته.

تصنف الأمواج الصوتية حسب تواترها بـ:

- **الأمواج الصوتية/السمعية (audible range):** ينحصر تواترها بين 20 – 20,000 Hz. وهي الأمواج التي يسمعها الأنسان.
- **الأمواج تحت الصوتية/السمعية (infrasonic):** تواترها أقل من 20 Hz. تسمعها بعض الحيوانات مثل القطط والفئران والطيور ومن أهمها أمواج الزلازل.
- **الأمواج فوق الصوتية/السمعية (ultrasonic):** تواترها أعلى من 20,000 Hz. ويمكن سماعها من قبل بقض الحيوانات مثل الخفاش والنمل والدلافين. يوجد العديد من التطبيقات للأمواج فوق الصوتية، نذكر منها:
  - ❖ تقدير أعماق البحار
  - ❖ تعقيم المواد الغذائية
  - ❖ في الطب: تصوير الإيكو – تفتيت الحصى في الكلى.

توصف عادةً الأموج الصوتية حسب الإزاحات التي تسببها لجسيمات الوسط الذي تنتشر فيه. يمكن أن يكون وصف الأموج الصوتية حسب تقلبات الضغط التي تسببها في الوسط غالباً ملائم أكثر، كون أذن الأنسان حساسة بشكل كبير لتغيرات الضغط. تنتشر الأمواج الصوتية عادةً في جميع الاتجاهات من المنبع الصوتي ولكن بسعة تعتمد على الجهة والمسافة من المنبع. في الحالة المثالية، نعتبر الموجة الصوتية تنتشر في الاتجاه الموجب للمحور x فقط. مثل هذه الموجة يمكن أن توصف بالتابع الموجي $y(x, t)$، (wave function)، والذي يعطي الإزاحة اللحظية (instantaneous displacement) y لجسيم من الوسط عند الموضع x والزمن t (المعادلة 4.1). إذا كانت الموجة جيبية:

$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t) \qquad \textbf{(4.1)}$$

(sound wave propagating in the + x-direction)

حيث: k العدد الموجي و A السعة و ω التواتر الزّاوي.

بما أن السعة A هي عبارة عن الإزاحة العظمى لجسيم في الوسط من وضع توازنه. لذلك تدعى A **بسعة الإزاحة**.

الأمواج الصوتية كتابع لتقلبات الضغط

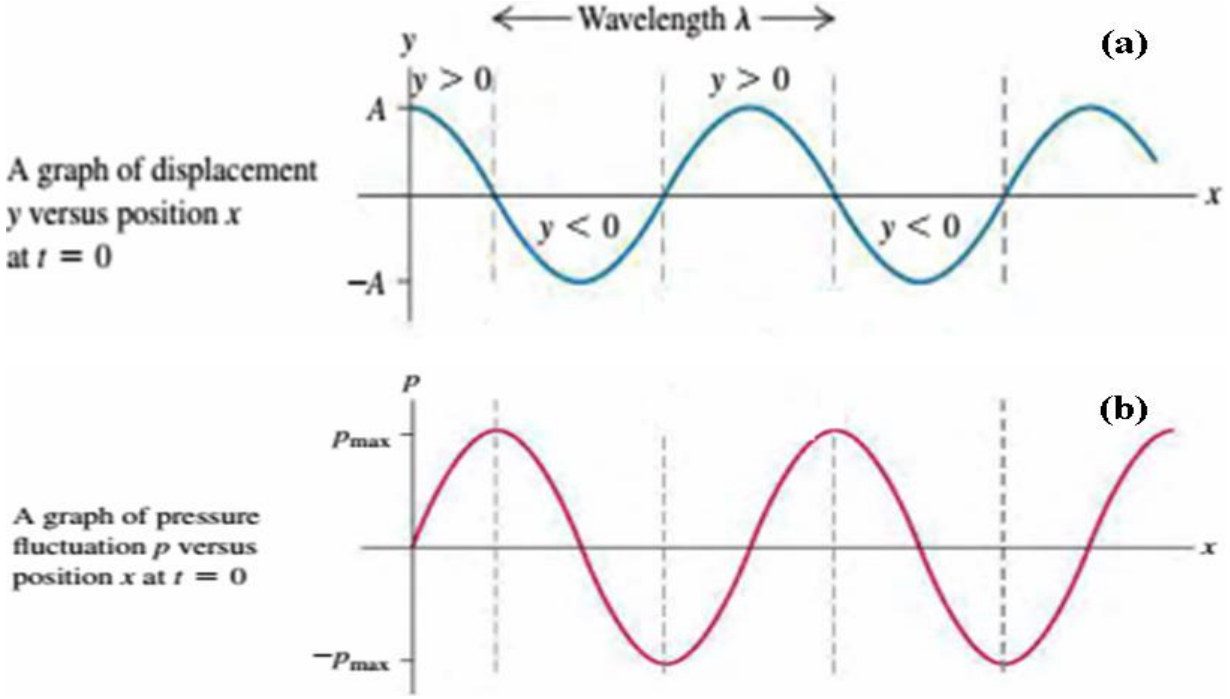
توصف الأمواج الصوتية أيضاً حسب تغيرات الضغط عند نقاط مختلفة من الوسط. ليكن $p(x, t)$ تقلبات الضغط اللحظية (instantaneous pressure fluctuation) في الموجة الصوتية عند أي نقطة x وعند الزمن t. حيث $p(x, t)$ هي الكمية التي يختلف بها الضغط عن الضغط الجوي الطبيعي. فكر بـ $p(x, t)$ على أنه الضغط اللاجوي (gauge pressure)، ويمكن أن يكون سالب أو موجب. فيكون الضغط المطلق أو الكلي (absolute pressure) عند أي نقطة $p_a + p(x, t)$. فمن أجل الأمواج الجيبية:

$$p(x,t) = BkA\sin(kx - \omega t) \qquad \textbf{(5.1)}$$

حيث B هو المعامل الحجمي (bulk modulus) ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$B = \frac{\text{Bulk stress}}{\text{Bulk strain}} = -\frac{\Delta p}{\Delta V / V_o} \qquad \textbf{(6.1)}$$

يبيّن الشكل 3.1 تغيرات الإزاحة اللحظية وتقلبات الضغط اللحظية كتابع للموضع x.



الشكل 3.1: يوضّح **(a)** تغيرات الإزاحة اللحظية $y(x,t)$ كتابع للموضع x، **(b)** تغيرات تقلبات الضغط $p(x,t)$ اللحظية كتابع للموضع x.

تظهر المعادلة (5.1) أن الكمية BkA تمثل تقلبات الضغط العظمى. وسوف تدعها **بسعة الضغط** (pressure amplitude) ونرمز لها بـ p_{max}:

$$p_{max} = BkA \qquad \textbf{(7.1)}$$

نلاحظ من المعادلة السابقة أن سعة الضغط تتناسب طرداً مع سعة الإزاحة A، وتعتمد على طول الموجة. أن الأمواج ذات الطول الموجي الأقصر λ (العدد الموجي الأكبر $k = 2\pi/\lambda$) تملك تغيرات ضغط أكبر من أجل سعة معطاة.

مثال (1.1): سعة موجة صوتية في الهواء (Amplitude of a sound wave in air)

في الموجة الصوتية الجيبية ذات الجهارة (loudness) المتوسطة، إذا كانت تغيرات الضغط العظمى حوالي 3.0×10^{-2} Pa أعلى وأقل من الضغط الجوي. أوجد الإزاحة العظمى الموافقة إذا كانت قيمة التواتر 1000 Hz. في الهواء وعند كل من الضغط الجوي والكثافة الطبعيتين، سرعة الصوت 344 m/s والمعامل الحجمي 1.42×10^5 Pa.

الحل:

تعطى السعة العظمى بالمعادلة (7.1)، أي $A = p_{max}/Bk$. فالعدد الموجي:

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{(2\pi \text{ rad})(1000 \text{ Hz})}{344 \text{ m/s}} = 18.3 \text{ rad/m}$$

وبالتالي:

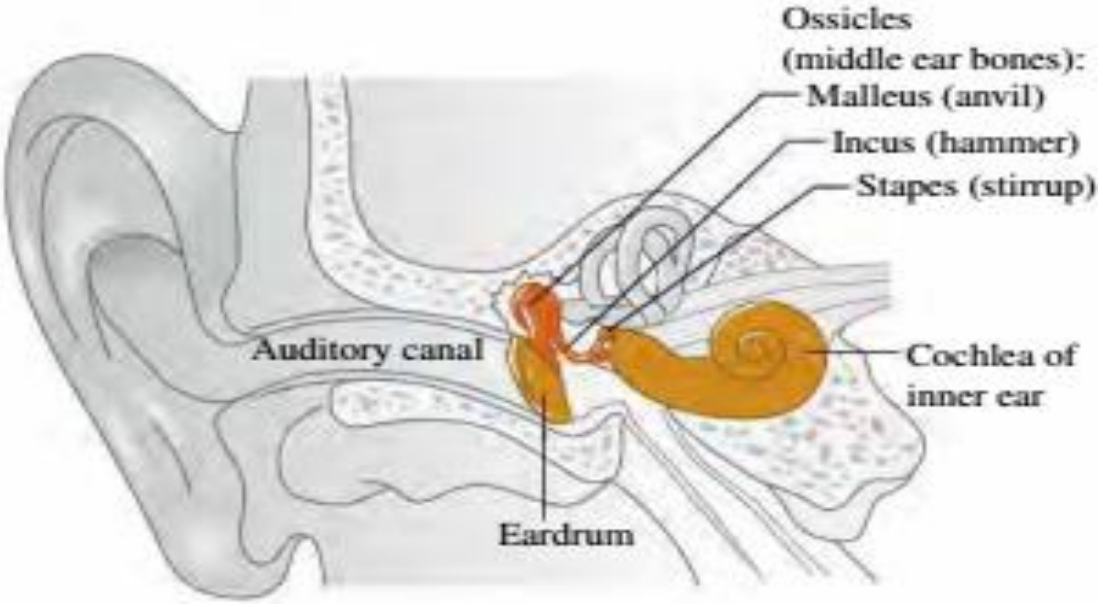
$$A = \frac{p_{\max}}{Bk} = \frac{3.0\times10^{-2}\,\text{Pa}}{(1.42\times10^{5}\,\text{Pa})(18.3\,\text{rad/m})} = 1.2\times10^{-8}\,\text{m}$$

مثال (2.1): سعة موجة صوتية في الأذن الداخلية (Amplitude of a Sound Wave in the Inner Ear)

تضع موجة صوتية عندما تدخل أذن الأنسان طبلة الأذن (eardrum) في الاهتزاز، والتي بدورها تسبب اهتزاز عظيمات السمع (ossicles)، والتي هي عبارة عن ثلاثة عظام صغيرة جداً في الأذن الوسطى (الشكل 4.1). تنقل العظيمات هذا الاهتزاز إلى السائل (معظمه ماء) في الأذن الداخلية; هناك تسبب حركة السائل اضطراب الخلايا السمعية والتي ترسل نبضات عصبية إلى الدماغ مع معلومات حول الصوت. أن مساحة الجزء المتحرك من طبلة الأذن حوالي $43\ \text{mm}^2$، ومساحة العظيم الركابي (stapes) "وهو أصغر العظيمات الثلاث" حيث يتصل بالأذن الداخلية حوالي $3.2\ \text{mm}^2$. من أجل الصوت في المثال 1.1، حدد:

(a) سعة الضغط

(b) سعة إزاحة الموجة للسائل في الأذن الداخلية، حيث سرعة الصوت 1500 m/s.



الشكل 4.1: يوضّح الية انتقال الموجة الصوتية من الهواء إلى أذن الأنسان مع الأجزاء الأساسية للأذن.

الحل:

في هذا المثال فإن الصوت ينتشر في السائل عوضاً عن الهواء (المثال السابق). نستطيع اهمال كتلة العظيمات الصغيرة (والتي هي حوالي $5.8 \times 10^{-5}\ \text{kg} = 58\ \text{mg}$)، وبالتالي فإن القوة المطبقة على السائل في الأذن الداخلية هي نفسها المطبقة على طبلة الأذن والعظيمات بواسطة الموجة الصوتية الواردة.

ومن ثم فإن سعة الضغط في الأذن الداخلية، $p_{\max\,(\text{inner ear})}$، هي أكبر من سعة الضغط في الهواء في الخارج، $p_{\max\,(\text{air})}$، لان نفس القوة مطبقة على مساحة أصغر (مساحة العظيم الركابي مقابل مساحة طبلة الأذن). بما أن $p_{\max\,(\text{inner ear})}$ معطية فنستطيع إيجاد سعة الإزاحة $A_{\text{inner ear}}$ من المعادلة (7.1).

(a) من مساحة طبلة الأذن وسعة الضغط في الهواء التي حصلنا عليها في المثال 1.1، فالقوة العظمى المطبقة بواسطة الموجة الصوتية في الهواء على طبلة الأذن هي:

$$F_{\max} = p_{\max\ (\text{air})} S_{\text{eardrum}}$$

وبالتالي:

$$p_{\max\ (\text{inner ear})} = \frac{F_{\max}}{S_{\text{stapes}}} = p_{(\text{air})} \frac{S_{\text{eardrum}}}{S_{\text{stapes}}} = (3.0\times10^{-2}\ \text{Pa}) \frac{43\ \text{mm}^2}{3.2\ \text{mm}^2} = 0.40\ \text{Pa}$$

(b) لإيجاد الإزاحة العظمى $A_{\text{inner ear}}$، نستخدم $A = p_{\max}/Bk$ كما في المثال السابق. بما أن السائل في الأذن الداخلية معظمه ماء، فإنه يملك معامل حجمي B أكبر بكثير من المعامل الحجمي للهواء. بما أن انضغاطية الماء (ولسوء الحظ تدعى k) هي $45.8 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1}$ وبالتالي: $B_{\text{fluid}} = 1/(45.8 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1}) = 2.18 \times 10^{9}$ Pa. تملك الموجة في الأذن الداخلية نفس التواتر الزّواي ω الذي تملكه الموجة في الهواء، على اعتبار أن كل من الهواء وطبلة الأذن والعظيمات والسائل في الأذن الداخلية تهتز مع بعضها البعض. لكن سرعة الموجة v في الأذن الداخلية أكبر من سرعتها في الهواء (1500 m/s مقابل 344 m/s)، فالعدد الموجي أصغر. باستخدام قيمة ω من المثال 1.1 نجد:

$$k_{\text{inner ear}} = \frac{\omega}{v_{\text{inner ear}}} = \frac{(2\pi\ \text{rad})(1000\ \text{Hz})}{1500\ \text{m/s}} = 4.2\ \text{rad/m}$$

بوضع كل الأشياء من بعض فإننا نجد:

$$A_{\text{inner ear}} = \frac{p_{\max\ (\text{inner ear})}}{B_{\text{fluid}} k_{\text{nner ear}}} = \frac{0.40\ \text{Pa}}{(2.18\times10^{9}\ \text{Pa})(4.2\ \text{rad/m})} = 4.4\times10^{-11}\text{m}$$

4.1 خصائص الصوت (Perception of Sound Waves)

يتصف الصوت بثلاثة خصائص هي:

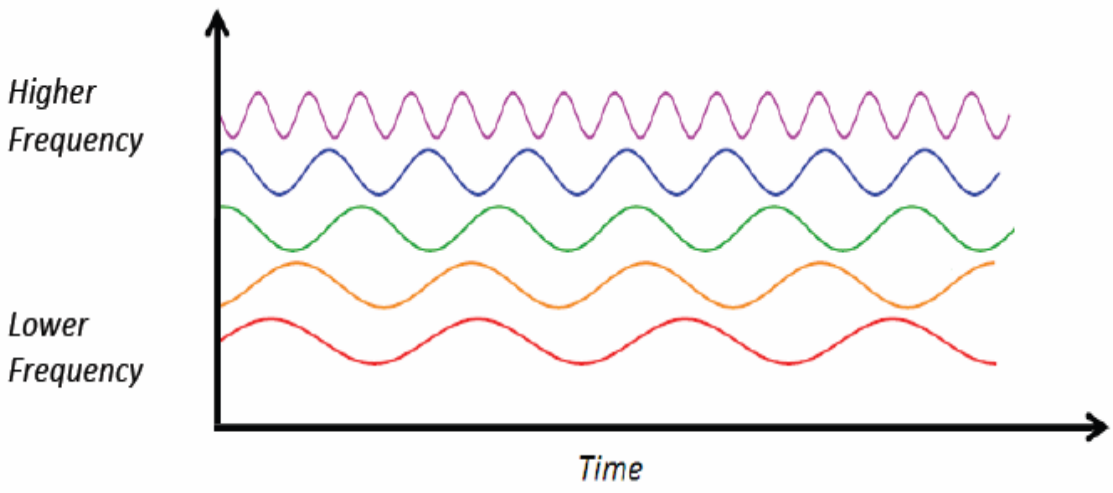
الجهارة (loudness): مقدار الاحساس الفيزيولوجي الذي يولده وصول الصوت إلى الأذن. ولا توجد علاقة بسيطة بين الجهارة وشدة الصوت ولذلك يصعب وضع مقياس للجهارة يمثل تمثيلاً صحيحاً الاحساس الفيزيولوجي الذي يولده الصوت ويتوقف على كثافة تدفق الطاقة الصوتية وعلى حدة الصوت وواحدتها صوني. من أجل تواتر معطى، عندما تكون سعة ضغط موجة صوتية جيبية أكبر، تكون الجهارة أكبر.

ارتفاع الصوت (pitch): (طبقات الصوت) صفة تميز بها الأذن بين الصوت الحاد (تواتره عال) والصوت الأجش (تواتره منخفض) كما هو واضح في الشكل 5.1.

طابع الصوت (timber): صفة للصوت تنشأ من التوافقيات التي ترافقه تجعل الأذن تميز بين صوتين لهما نفس التواتر الأساسي والجهارة. غالباً ما يصف طابع الصوت أشياء شخصية من مثل ذهبي (golden) ورفيع (tinny).

يمكن تفسير اختلاف طابع الصوت، فعندما تهتز مصادر الصوت المختلفة لا تعطي نغمتها الأساسية التى تعتمد على طبيعة المصدر المهتز فقط، بل تكون النغمة الأساسية مصحوبة بعدة نغمات تسمى بالنغمات التوافقية.

تعرّف النغمات التوافقية، هي النغمات التي تؤدي إلى الاختلاف بين النغمات الأساسية المتماثلة فى الارتفاع (التواتر) وهي النغمات المصاحبة للنغمات الأساسية والتي يرجع إليها اختلاف المصادر المختلفة للصوت والمتساوية فى الارتفاع والجهارة.



الشكل5.1: يوضّح الاختلاف بين الأمواج الجيبية ذات التواترات (الطبقات) العالية والمنخفضة.

تملك النغمات التوافقية الخصائص الآتية:

1. أقل شدة من النغمة الأساسية
2. أعلى في التواتر من النغمة الأساسية
3. أكثر حدة من النغمة الأساسية.

يمكن تعليل قدرة الأذن على تمييز أنواع الأصوات ومصادرها رغم أنها قد تكون متساوية الجهارة والارتفاع. كون مصادر الصوت المختلفة يصدر عنها اهتزازات مصاحبة للنغمات الأساسية تسمى النغمات التوافقية تكون أقل منها فى الجهارة وأعلى منها فى التواتر.

مسائل غير محلولة

1.1 في المثال 1.1، لقد أثبتنا أنه من أجل الأمواج الصوتية المنتشرة في الهواء ذات التواتر 1000 Hz أن سعة الإزاحة تملك القيمة $1.2\times10^{-8}\,\mathrm{m}$ وتنتج سعة ضغط قيمتها $3.0\times10^{-2}\,\mathrm{Pa}$ والمطلوب:

(a) ما هو طول الموجة لهذه الأمواج؟

(b) من أجل الأمواج المنتشرة في الهواء وتواترها 1000 Hz، ما هي سعة الإزاحة التي نحتاجها لتكون سعة الضغط عند عتبة الألم والتي تملك القيمة 30 Pa؟

(c) من أجل أي طول موجة وتواتر سوف تملك الأمواج ذات سعة الإزاحة $1.2\times10^{-8}\,\mathrm{m}$ وتنتج سعة ضغط $1.5\times10^{-3}\,\mathrm{Pa}$؟

2.1 في المثال 1.1، لقد أثبتنا أنه من أجل الأمواج الصوتية المنتشرة في الهواء ذات التواتر 1000 Hz أن سعة الإزاحة تملك القيمة $1.2\times10^{-8}\,\mathrm{m}$ وتنتج سعة ضغط قيمتها $3.0\times10^{-2}\,\mathrm{Pa}$. يملك الماء في الدرجة $20^{o}\,\mathrm{C}$ معامل حجمي مقداره $2.2\times10^{9}\,\mathrm{Pa}$ وسرعة الصوت في الماء عند درجة الحراة هذه 1480 m/s. من أجل التواتر 1000 Hz للأمواج الصوتية في الماء عند $20^{o}\,\mathrm{C}$ ، ما هي سعة الإزاحة المنتجة إذا كانت سعة الضغط $3.0\times10^{-2}\,\mathrm{Pa}$؟ اشرح لماذا جوابك سيكون أصغر بكثير من $1.2\times10^{-8}\,\mathrm{m}$.

3.1 تنتج آلة مصنع عالية الضجيج صوتاً يملك سعة إزاحة $1.00\,\mu\mathrm{m}$، ولكن يمكن ضبط تواتر هذا الصوت. لكي نمنع عملية تلف آذان العمال، تم تحديد سعة الضغط العظمى للأمواج الصوتية بـ 10.0 Pa. تحت هذه الشروط في المصنع، فإن المعامل الحجمي للهواء $1.42\times10^{5}\,\mathrm{Pa}$. ما هو تواتر الصوت الأعظمي والذي يمكن أن تضبط الآلة عليه بحيث لا يتجاوز الحد المفروض؟ هل هذا التواتر مسموع بالنسبة للعمال؟

****