شدة الصوت

Sound Intensity

مقدمة (Introduction):

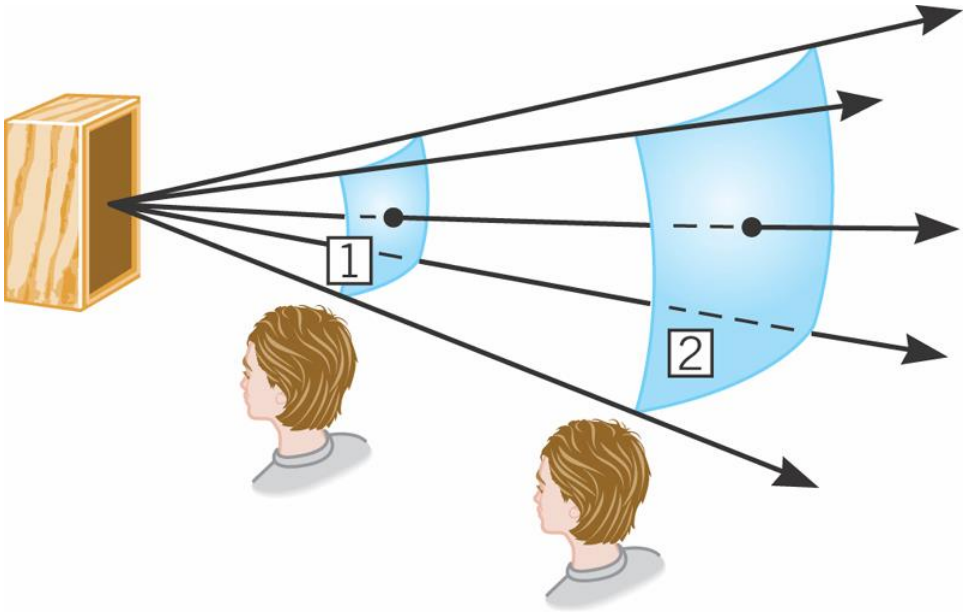
سوف نقدم في هذا الفصل معلومات مفصلة عن شدة الصوت وضغطه وعلاقتهما بسعة الإزاحة وسعة الضغط ومن ثم نقدم مقياس الديسبل ونذكر أهميته وأسباب استخدامه مع مجموعة من الأمثلة والمسائل غير المحلولة.

1.3 شدة الصوت (Sound Intensity)

أن الأمواج الصوتية المنتقلة، مثل كل الأمواج المنتقلة الأخرى تقوم بنقل الطاقة من منطقة من الفراغ إلى آخرى. فالطريقة المفيدة في وصف هذه الطاقة المحمولة بواسطة الموجة الصوتية هي باستخدام مفهوم الشدة والتي نرمز لها بـ I، والتي تساوي المعدل الوسطي الزمني لانتقال الطاقة في واحدة المساحة عبر السطح وبشكل عمودي على جهة الانتشار. أو تعرّف بأنها الاستطاعة التي تجتاز سطح بشكل عمودي مقسومة على واحدة المساحة لذلك السطح (الشكل 1.3):

$$I = \frac{P}{A} \qquad (1.3)$$

حيث P هي الاستطاعة وواحدتها واط Watt (W) و A واحدة السطح (m^2). ولكن لدينا 1 watt = 1 joule/second.



الشكل 1.3: تعرّف شدة الصوت على أنها الاستطاعة التي تجتاز سطح بشكل عمودي مقسومة على واحدة المساحة لذلك السطح. أي تتناقص الشدة بزيادة واحدة السطح.

مثال 1.3: شدات الصوت (Sound Intensities)

ليكن لدينا صوت استطاعته 12×10^{-5} W والذي يجتاز السطحين 1 و2 (الشكل 1.3). حيث أن واحدة السطح الأول $4.0\,m^2$ والثاني $12\,m^2$. حدد شدة الصوت عند كل سطح.

الحل:

تعطى شدة الصوت بالعلاقة 1.3، فتكون شدة الصوت عند السطح الأول:

$$I_1 = \frac{P}{A_1} = \frac{12\times10^{-5}\ \mathrm{W}}{4.0\ \mathrm{m}^2} = 3.0\times10^{-5}\ \mathrm{W/m}^2$$

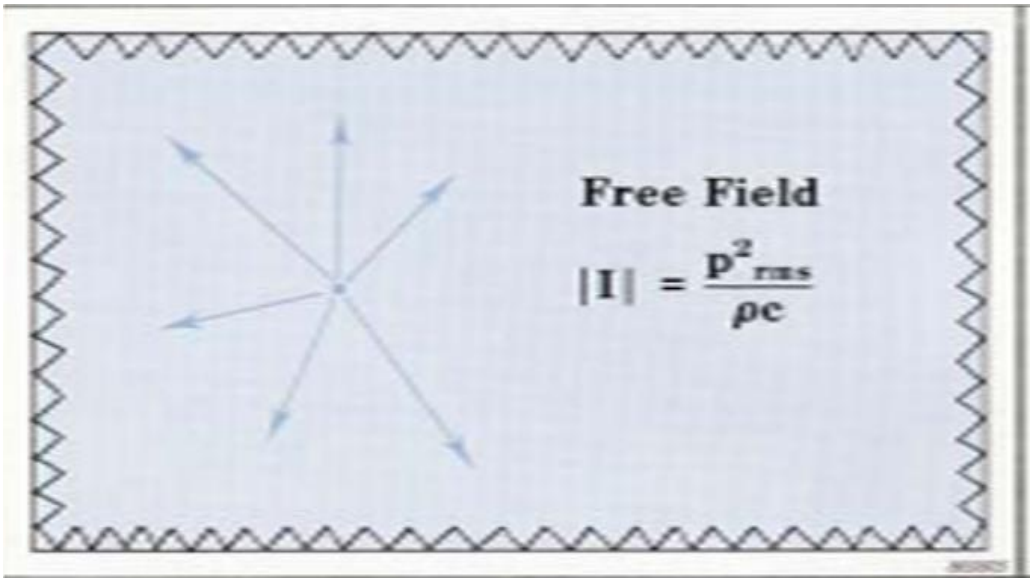
أما شدة الصوت عند السطح الثاني:

$$I_2 = \frac{P}{A_2} = \frac{12\times10^{-5}\ \mathrm{W}}{12\ \mathrm{m}^2} = 1.0\times10^{-5}\ \mathrm{W/m}^2$$

1.1.3 حقل الصوت (Sound field)

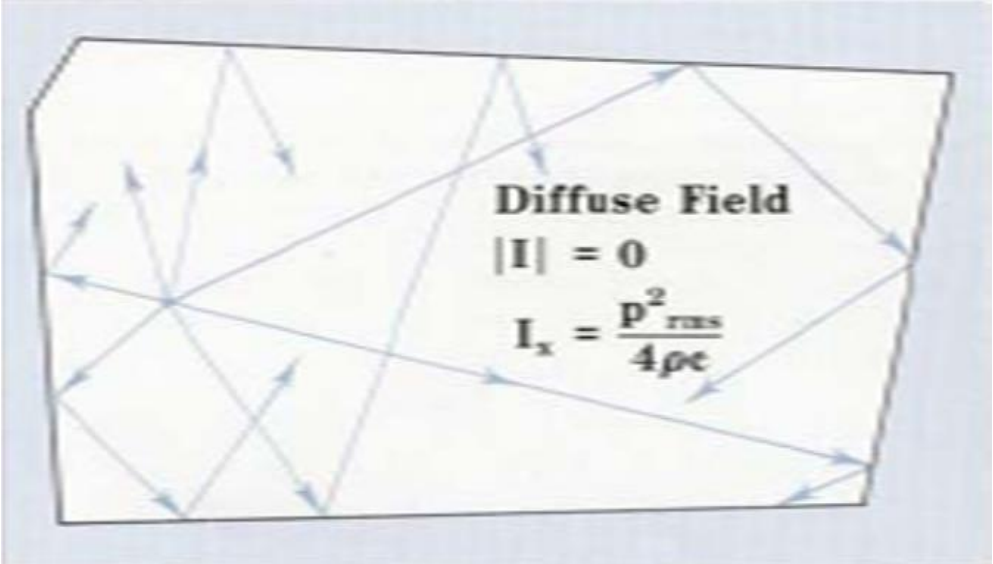
يعرّف حقل الصوت بأنه المنطقة حيث يوجد صوت. وهو يحدد وفقاً للسلوك والبيئة التي ينتشر فيها الصوت. سوف نقدم بعض الأمثلة عن حقل الصوت:

(A) الحقل الحر (Free field): يصف هذا المصطلح انتشار الصوت في الفضاء الحر المثالي حيث لا يوجد انعكاس للصوت. تطبق هذه الشروط عادةً في الهواء المفتوح (بعيداً عن الأرض بشكل كاف) أو في غرفة لا تشكل صدى للصوت (anechoic room) حيث تمتص كل الأصوات التي تصطدم بجدران الغرفة (كما هو واضح في الشكل 2.3).



الشكل 2.3: يبّين الحقل الحر حيث لا ينعكس الصوت عند انتشاره في الفضاء الحر أو يمتص عند اصطدامه في جدران غرفة عديمة الصدى.

(B) حقل انتشاري (Diffuse field): في هذا الحقل ينعكس الصوت عدة مرات عندما ينتشر في جميع الاتجاهات وبسعة واحتمالية متساويتين. تطبق هذه الشروط بشكل تقريبي في الغرف ذات الصدى حيث تكون الشدة المحصلة معدومة (الشكل 3.3).



الشكل 3.3: يبّين الحقل الانتشاري حيث ينعكس الصوت عدة مرات عندما ينتشر في غرفة عاكسة للصوت.

بشكل خاص، سوف نعبّر عن شدة الموجة الصوتية حسب الإزاحة A أو سعة الضغط p_{max} . للسهولة، سوف نعتبر موجة صوتية تنتشر في اتجاه المحور x الموجب. أن الاستطاعة في واحدة المساحة لهذه الموجة الصوتية تساوي الجداء $p(x, t)$ مع سرعة الجسيمة $v_y(x, t)$. أن سرعة الجسيمة $v_y(x, t)$ هي السرعة عند الزمن t للجزء من وسط الموجة عند الأحداثي x. باستخدام المعادلة (1.1) والمعادلة (4.1) نجد:

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \omega A \sin(kx - \omega t)$$

$$p(x,t)\ v_y(x,t) = [BkA\sin(kx-\omega t)][\omega A\sin(kx-\omega t)]$$

$$= B\omega k A^2 \sin^2(kx-\omega t)$$

الشدة بالتعريف هي، القيمة الزمنية المتوسطة لـ $p(x, t)\ v_y(x, t)$. من أجل أي قيمة لـ x فالقيمة المتوسطة للتابع $\sin^2(kx - \omega t)$ خلال دور واحد ($T = 2\pi/\omega$) هي ½، وبالتالي:

$$I = \frac{1}{2} B\omega k\, A^2 \qquad \textbf{(2.3)}$$

باستخدام العلاقة $\omega = vk$ والعلاقة $v^2 = B/\rho$ نستطيع نقل المعادلة 1.3 إلى الشكل:

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\rho B}\ \omega^2 A^2 \quad \textbf{(Intensity of a sinusoidal sound wave)} \quad \textbf{(3.3)}$$

تظهر المعادلة السابقة أنه لماذا في نظام الستريو يجب أن يهتز مكبر الصوت (woofer) ذو التواتر المنخفض بسعة أكبر بكثير من مكبر الصوت (tweeter) ذو التواتر العالي لإنتاج نفس شدة الصوت.

عادةً من المفيد أكثر التعبير عن الشدة I حسب سعة الضغط p_{max} . باستخدام المعادلة 5.1 والعلاقة $\omega = vk$ فإننا نجد:

$$I = \frac{\omega p_{\max}^2}{2Bk} = \frac{v\, p_{\max}^2}{2B} \qquad \textbf{(4.3)}$$

وأيضاً باستخدام علاقة سرعة الموجة $v^2 = B/\rho$ نستطيع التعبير عن المعادلة 4.3 بشكل مغاير:

$$I = \frac{p_{\max}^2}{2\rho v} = \frac{p_{\max}^2}{2\sqrt{\rho B}} \quad \textbf{(Intensity of a sinusoidal sound wave)} \quad \textbf{(5.3)}$$

مثال 2.3: شدة موجة صوتية في الهواء (Intensity of a sound wave in air)

أوجد شدة الموجة الصوتية في المثال 1.1 حيث $p_{\max} = 3.0\times10^{-2}$ Pa . بفرض أن درجة الحرارة 20^{o}C فتكون كثافة الهواء $\rho = 1.20\ \text{kg/m}^3$ وسرعة انتشار الصوت فيه $v = 344$ m/s.

الحل:

المطلوب حساب شدة الموجة الصوتية I، باستخدام المعادلة 5.3 نجد:

$$I = \frac{p_{\max}^2}{2\rho v} = \frac{(3.0\times10^{-2}\,\text{Pa})^2}{2(1.20\,\text{kg/m}^3)(344\,\text{m/s})}$$

$$= 1.1\times10^{-6}\,\text{J/(s.m}^2) = 1.1\times10^{-6}\,\text{W/m}^2$$

2.3 ضغط الصوت (Sound Pressure)

يشار عادةً على أن الصوت هو عبارة عن موجة ضغط، حيث يقاس الضغط في هذه الحالة بالميكرو باسكال (μPa). عندما يصدر المنبع الصوتي استطاعة فإن النتيجة تكون عبارة عن موجة ضغط (صوت). أي أن الاستطاعة هي السبب وضغط الصوت هو الأثر. لنعتبر التناظر الآتي، حيث يشع السخّان الحراري حرارة إلى الغرفة فتكون درجة الحرارة هي الأثر. فدرجة الحرارة هي مقدار فيزيائي والذي يجعلنا نشعر بالحرارة أو البرودة. بشكل واضح فإن درجة حرارة الغرفة تعتمد على الشروط الموجودة في الغرفة نفسها، أي إذا كان هناك عزل للغرفة أو وجود سخّان حراري آخر. ولكن في جميع الأحول فإن السخّان يشع نفس الاستطاعة بصرف النظر عن الوسط المحيط. بشكل مشابه تكون العلاقة بين استطاعة الصوت وضغطه. أي ماذا نسمع هو ضغط الصوت ولكن السبب هو استطاعة الصوت الصادرة عن المنبع الصوتي.

عندما يكون ضغط الصوت مرتفع جداً فقد يسبب ذلك تلف في السمع (أذية سمعية). عندما نحاول تحديد استجابة الأنسان للصوت، فإننا نقوم بقياس كميات مثل الضجيج المزعج وخطورة فقدان السمع. بشكل واضح فإن الكمية التي يجب قياسها هي الضغط وهو سهل القياس نسبياً.

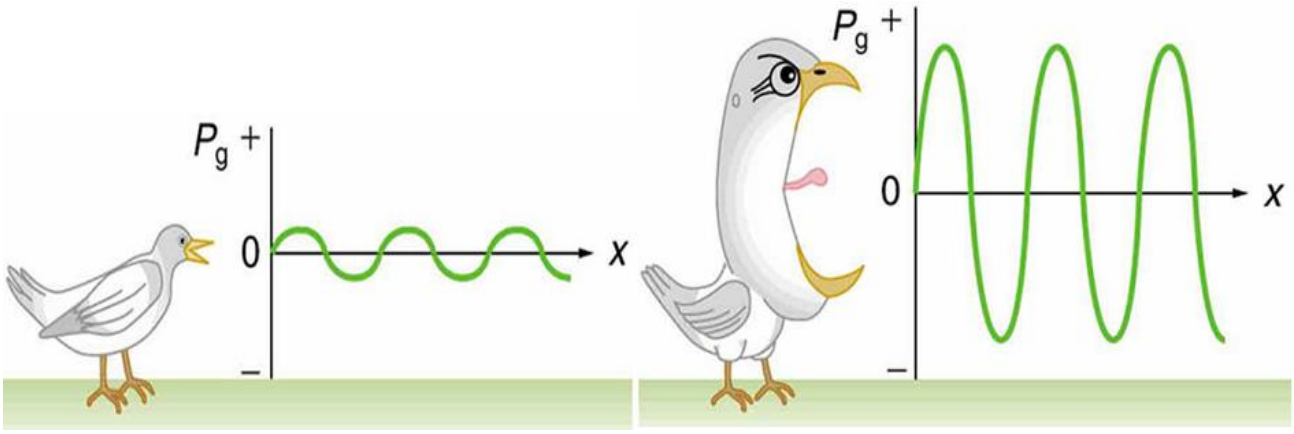
أن تغيرات الضغط على الغشاء الطبلي والتي نستقبلها كصوت هي نفسها تغيرات الضغط التي يلتقطها غشاء المكريفون والتي تعتمد على المسافة من المنبع الصوتي وعلى الوسط الصوتي (أي الحقل الصوتي) الذي ينتشر فيه الصوت. أي تعتمد على حجم الغرفة وامتصاص الأسطح للصوت. ولكن قياس ضغط الصوت لا يعني بالضرورة تحديد كمية الضجيج المصاحبة للصوت.

تعطى العلاقة بين ضغط الصوت وشدة الصوت بالعموم بالعلاقة الأتية:

$$\text{Intensity} = \text{Pressure} \times \text{Particle Velocity}$$

$$= \frac{\text{Force}}{\text{Area}} \times \frac{\text{Distance}}{\text{Time}} = \frac{\text{Energy}}{\text{Area} \times \text{Time}} = \frac{\text{Power}}{\text{Area}} \qquad \textbf{(6.3)}$$

يوضّح الشكل 4.3 الضغط لصوتين بشدتين مختلفتين.



الشكل 4.3: يوضّح الفرق بين الضغط الناتج عن صوتين بشدتين مختلفتين.

3.3 مقياس الديسبل (The Decibel Scale)

بما أن أذن الأنسان حساسة لمجال واسع من الشدات، فإنه يستخدم عادةً مقياس الشدة اللوغارتمية (*logarithmic* intensity scale).

يعرّف مستوى شدة الصوت (sound intensity level) β بالمعادلة الآتية:

$$\beta = (10\ \text{dB}) \log \frac{I}{I_o} \qquad \text{(definition of sound intensity level)} \qquad \textbf{(7.3)}$$

حيث I_o هي الشدة المرجعية، حيث تم اختيار قيمتها $10^{-12}\ \text{W/m}^2$ وهي تقريباً الشدة الموافقة لعتبة السمع عن الأنسان عند التواتر 1000 Hz. يعبّر عن مستوى شدة الصوت بالديسبل (decibel) ويرمز له اختصاراً بـ dB.

مثال 3.3: فقدان السمع – بشكل مؤقت أو دائم (Temporary - or Permanent - Hearing Loss)

أن التعرض لمدة 10-min لمستوى شدة صوت مقداره 120-dB سوف يزيح عتبة سمعك عند التواتر 1000 Hz من 0 dB إلى 28 dB. بينما التعرض لمدة عشر سنوات لمستوى شدة صوت مقداره 92-dB سوف يزيح وبشكل دائم عتبة السمع إلى 28 dB. ما هي شدتي الصوت الموافقتين لكل من 28 dB و92 dB؟

الحل:

نقوم بإعادة ترتيب المعادلة 7.1 بتقسيم طرفي المعادلة على 10 dB واستخدام العلاقة $10^{\log x} = x$ نجد:

$$I = I_o 10^{\beta/(10\text{dB})}$$

عندما تكون β = 28 dB تكون شدة الصوت الموافقة:

$$I = (10^{-12}\,\mathrm{W/m^2})10^{(28\,\mathrm{dB}/10\,\mathrm{dB})}$$
$$= (10^{-12}\,\mathrm{W/m^2})10^{2.8} = 6.3\times10^{-10}\,\mathrm{W/m^2}$$

بشكل مشابه، عندما تكون β = 92 dB:

$$I = (10^{-12}\,\mathrm{W/m^2})10^{(92\,\mathrm{dB}/10\,\mathrm{dB})} = 1.6\times10^{-3}\,\mathrm{W/m^2}$$

يبيّن الجدول 1.3 مستويات شدة الصوت وشدات الصوت لمنابع صوتية مختلفة.

Sound Intensity Levels from Various Sources (Representative Values)

Source or Description of Sound	Sound Intensity Level, β (dB)	Intensity, I (W/m^2)
Military jet aircraft 30 m away	140	10^{2}
Threshold of pain	120	1
Riveter	95	3.2×10^{-3}
Elevated train	90	10^{-3}
Busy street traffic	70	10^{-5}
Ordinary conversation	65	3.2×10^{-6}
Quiet automobile	50	10^{-7}
Quiet radio in home	40	10^{-8}
Average whisper	20	10^{-10}
Rustle of leaves	10	10^{-11}
Threshold of hearing at 1000 Hz	0	10^{-12}

الجدول 1.3: يبيّن مستويات شدة الصوت بواحدة dB وشدات الصوت بواحدة W/m^2 لمنابع صوتية مختلفة.

مسائل غير محلولة

1.3. يلتقط الصوت عندما تسبب الموجة الصوتية اهتزاز غشاء الطبل (طبلة الأذن). بشكل نموذجي، يكون قطر هذا الغشاء عند الأنسان 8.4 mm. والمطلوب:

(a) ما هو مقدار الطاقة الواصلة إلى طبلة الأذن في كل ثانية عندما يقوم شخص ما بهمس (20 dB) سر في أذنك؟

(b) لإدراك مدى حساسية الأذن لكميات صغيرة من الطاقة، المطلوب حساب ما هي السرعة (مليمتر في الثانية) التي يجب أن تطير بها بعوضة نموذجية كتلتها 2.0-mg لتملك تلك الطاقة الحركية؟

2.3. بالنسبة للشخص الذي يتمتع بسمع طبيعي، يكون الصوت ضعيفاً عند سماعه على تواتر 400 Hz والذي يملك سعة ضغط حوالي 6×10^{-5} Pa والمطلوب حساب:

(a) شدة الصوت

(b) مستوى شدة الصوت

(c) سعة إزاحة هذه الموجة الصوتية عند 20 درجة مئوية.

3.3. تملك موجة صوتية عند درجة الحرارة 20°C تواتر مقداره 320 Hz وسعة إزاحة مقدارها 5.00×10^{-3} mm. من أجل هذه الموجة الصوتية المطلوب حساب:

(a) سعة الضغط في الباسكال (Pa)

(b) مستوى شدة الصوت في الديسبل (decibels).

**********نهاية الفصل الثالث**********