الباب التاسع

الصوت

Acoustic Phenomena

9.1 الموجات الصوتية Sound Waves

سوف نركز في هذا الباب على الموجات الطولية المنتقلة في الهواء والتي إذا وصلت الأذن ولدت الإحساس بالصوت والأذن البشرية تحس بموجات لها ترددات بين $20.0Hz$ و $20,000,0Hz$ وأبسط أنواع الموجات الصوتية هي الموجات الجيببية التي لها طول موجي ولها سعة ولها تردد يمكن معرفتها . هذه الموجات عندما تصل طبلة الأذن تُحدث اضطراباً في الوسط بتردد وسعة محددان. وهذا الاهتزاز يمكن وصفه بدلالة الزيادة في الضغط على الأذن نتيجة وصول الموجة. ولسهولة استنتاج الزيادة في الضغط فإننا سنستنتجها ومنها نعرف سعة الموجة ومعلومات أخرى مفيدة عن الموجة. ولنبدأ بتمثيل الموجة بالمعادلة:

$$y(x,t) = y_0 \sin(kx - wt)$$

ونفرض وسطاً تمر فيه الموجة حجمه V والتغير في حجمه نتيجةً لزيادة الضغط هو ΔV , انظر الشكل (9.1), ومنه فإن

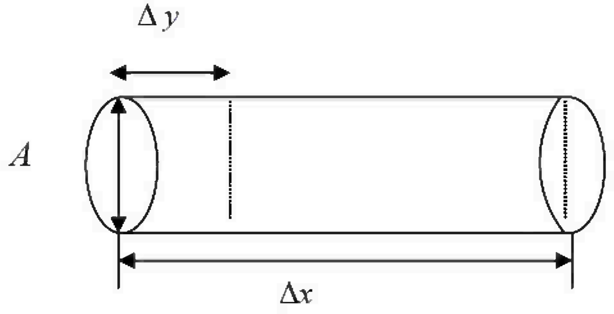
$$V = A \; \Delta x \qquad (9.1)$$

$$\Delta V = A \; \Delta y \qquad (9.2)$$

والعلاقة بينهما وبين الزيادة في الضغط هي

$$P = -B\frac{\Delta V}{V} \qquad (9.3)$$

حيث B هو معامل المرونة الحجمي للوسط. وبالتعويض عن V و ΔV, فإن



شكل (9.1)

$$P = B\frac{\Delta y}{\Delta x} = B\frac{\partial y}{\partial x}$$

$$P = By_0 k \cos(kx - \omega t) = P_{max}\cos(kx - \omega t) \qquad (9.4)$$

حيث

$$P_{max} = By_0 k \qquad (9.5)$$

هو أكبر قيمة للضغط ، والمعادلة (9.5) تظهر العلاقة بين سعة الموجة وأكبر ضغط للموجة على الأذن. لكن ومن دراسة سابقة لدينا العلاقة

$$v = \sqrt{B/\rho}$$

والتي تربط سرعة الموجة الصوتية بمادة الوسط و يظهر الجدول (9.1) سرعة الصوت في مجموعة من الأوساط. ومنها فإن

$$B = \rho v^2$$

وبالتعويض فى المعادلة (9.5) عن معامل مرونة الحجم فإن

$$\begin{aligned} P_{max} &= v^2 \rho k y_0 \\ &= v \omega \rho y_0 \end{aligned} \qquad (9.6)$$

وهي صيغة أخرى للعلاقة بين الضغط والسعة.

مثال 9.1

إذا قُدر أقصي ضغط لموجة صوتية تتحمله الأذن بالقيمة 28.0 Pa ،

أ- فاحسب أكبر سعة لموجة صوتية تصل الأُذن بتردد 500.0Hz .

ب- إذا كان الضغط الواصل للأُذن من موجة لها نفس التردد ,500.0Hz هو $2.0\times10^{-5}\,Pa$ ، فاحسب السعة المقابلة له .

الحل:

أ – لدينا من العادلة (9.6) الصيغة:

$$y_0 = \frac{P_{max}}{k\,\rho\,v^2}$$

ولدينا من الجدول (9.1) $v = 331.0$ m/s ومنه نحسب k

$$k = \frac{2\,\pi}{\lambda} = \frac{2\,\pi\,f}{v} = \frac{2\,\pi \times 500.0}{331.0}\,m^{-1} \cong 9.49\,m^{-1}$$

وحيث إن كثافة الهواء هي $1.22\;kg/m^3$ و $P_{\max} = 28.0Pa$

فإن

$$y_{\max} = \frac{28.0Pa}{\left(9.49m^{-1}\right)\times\left(1.22kg/m^3\right)\times\left(331.0m/s\right)^2} = 2.2\times10^{-5}m$$

أي أن سعة الموجة الصوتية التي تردد مصدرها 500.0Hz ، وتعطي أشد صوت في حدود $10.0^{-5}W/m^2$ وهي حقاً قيمة صغيرة.

ب– للأصوات الضعيفة والتي لمصدرها نفس التردد ولكن الضغط هو $2.0\times10^{-5}\;Pa$ فإن السعة

$$y = \frac{2.0\times10^{-5}Pa}{\left(9.49m^{-1}\right)\times\left(1.22kg/m^3\right)\times\left(331.0m/s\right)^2} = 1.6\times10^{-11}\;m$$

وهذا يقارب نصف قطر الذرة ولك أن تتخيل العظمة إذ تستطيع الأُذن أن تحس موجات بهذه السعة.

جدول (9.1) سرعة الصوت في مجموعة من الأوساط

الوسط	درجة الحرارة C^0	السرعة m/s
الهواء	0.0	331.3
الهيدروجين	0.0	1286.0
الأكسجين	0.0	317.2
الماء	15.0	1450.0
الرصاص	20.0	1230.0
الألومنيوم	20.0	5100.0
النحاس	20.0	3560.0
الحديد	20.0	5130.0
القرانيت	20.0	6000.0

9.2 الطاقة والشدة للموجات الصوتية

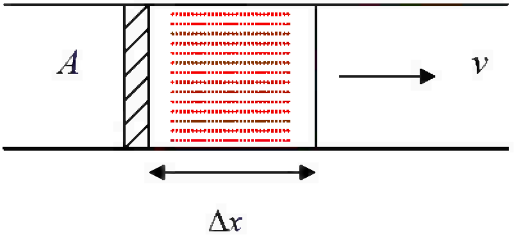
Energy and Intensity Of sound waves

لمعرفة طاقة وشدة موجة تتحرك في الهواء ، نعتبر طبقة من الهواء كتلتها Δm وعرضها Δx ملامسة لمكبس مساحته A كما بالشكل (9.2). وبتحريك المكبس فإنه ينقل طاقة إلى طبقة الهواء. وحيث إن متوسط طاقة الحركة يساوي متوسط طاقة الوضع في حركة توافقية بسيطة, فإن متوسط الطاقة للكتلة Δm يساوي طاقة الحركة القصوى.(انظر الحركة التوافقية البسيطة) وعليه فإن متوسط طاقة الطبقة المتحركة هو

$$\Delta E = \frac{1}{2}\Delta m\, v^2 + U = \frac{1}{2}\Delta m\, v_{\max}^2$$

أو

$$\Delta E = \frac{1}{2}\Delta m\,(\omega y_0)^2 = \frac{1}{2}(\rho A \Delta x)(\omega y_0)^2 \qquad (9.7)$$



شكل (9.2)

حيث $\Delta x A$ هو حجم الطبقة و U هي طاقة الوضع.

معدل انتقال الطاقة (القدرة Power) هو

$$\text{Power} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho A \frac{\Delta x}{\Delta t}(\omega y_0)^2 = \frac{1}{2}\rho A v w^2 y_0^2 \qquad (9.8)$$

ونعرف شدة الموجة I ، قدرة لكل وحدة مساحة ، بأنها معدل انسياب طاقة الموجة عبر المساحة A عمودياً على اتجاه الموجة

$$I = \frac{Power}{area} = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 y_0^2 \qquad (9.9)$$

لكن

$$P_{max} = \rho v \omega y_0$$

وبالتعويض فإن

$$I = \frac{P_{\max}^2}{2\rho v} = \frac{P_{\max}^2}{2\sqrt{\rho B}} \qquad (9.10)$$

وهي معادلة تربط بين خاصيتين للوسط هما الكثافة ومعامل المرونة الحجمي وخاصية موجية هي شدة الموجة. والوحدة المستخدمة لشدة الصوت هي $W.m^{-2}$ أو $W.cm^{-2}$

مثال 9.2

احسب الشدة القصوى لموجة صوتية والتي يمكن أن تتحملها الأُذن عادةً .

الحل:

نحسب الشدة باستخدام المعادلة (9.10) ونعوض عن الضغط المكن للأُذن تحمله بالقيمة $30.0Pa$ ، ونعلم أن كثافة الهواء حوالي $1.22kg/m^3$, ونحسب معامل المرونة الحجمي من

$$B = \gamma P$$

$$= 1.4 \times 1.013 \times 10^5 = 1.42 \times 10^5 \ Pa$$

$$I = \frac{P_{\max}^2}{2\sqrt{\rho B}} = \frac{(30.0Pa)^2}{2\sqrt{1.22 \ kg/m^3 \times 1.42 \times 10.0^5 \ Pa}} = 1.08 \ W/m^2$$

أو

$$I = \frac{P_{\max}^2}{2\rho v} = \frac{(30.0Pa)^2}{2 \times 1.22 \ kg/m^3 \times 340.0 \ m/s} = 1.08 \ W/m^2$$

9.3 مستوى الشدة Intensity Level

حيث إن مدى الشدة الذي تستطيع الأذن تحمله ينحصرتقريباً بين الصفر والوحدة فإننا نستعيض عنه بمقياس بديل يعتمد على اللوغاريتم يقيس مستوى الشدة ويرمز له بالرمز β ويمكن تقسيمه إلى 120 جزءاً ويعطى بالصيغة :

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (9.11)$$

حيث I_o هي الشدة الصغرى وتمثل الحد الأدنى لإحساس الأذن وقيمتها 10.0^{-12} W/m^2 أما وحدة مستوى الشدة فهي الدسيبل decibel وتختصر dB وهي عشر البل Bel نسبة إلى جراهام بل و deci هي وحدة القياس.

ويعطي الجدول (9.2) الشدة لبعض الأصوات ومستوى الشدة المقابل لها . إذا كانت الشدة تساوي I_0 فإن مستوى الشدة يساوي صفراً، أما إذا كانت الشدة تساوي واحداً فإنها تقابل $120.0\ dB$ ، ويشار هنا إلى أن مقياس مستوى الشدة كان في الأصل يقاس بالبل bels ، إلا أنه ثبت كبره وعدم ملائمته فاستعيض عنه بالديسبل، والذي أصبح شائع الاستعمال .

جدول (9.2) الشدة ومستوى الشدة لبعض الأصوات

مستوى الشدة β Inten. Level db	الشدة I Inten. W/m^2	المصدر Source
120.0	1.0	حد الإيلام
95.0	3.2×10^{-3}	ماكينة قص حديد
80.0	10.0^{-4}	شارع مزدحم
65.0	3.2×10^{-6}	حديث عادي
50.0	10.0^{-7}	سيارة هادئة
10.0	10.0^{-11}	حفيف الشجر
0.0	10.0^{-12}	حد السمع

مثال 9.3

احسب أكبر زيادة في الضغط على أذن السامع بسبب كل من حد السمع وحد الإيلام. ثم احسب سعة الموجة في الحالتين وذلك عند تردد قيمته 1000.0Hz.

الحل:

لحد السمع فإن $I = 10.0^{-12} W/m^2$ ، وكثافة الهواء $\rho = 1.2\ kg/m^3$

ونعتبر سرعة الصوت $v = 342.0 m/s$ وبالتعويض فإن

$$P_{\max} = (2\rho v I)^{1/2} = (2 \times 1.2 kg/m^3 \times 342.0 m/s \times 10^{-12} W/m^2)^{1/2}$$
$$= 2.86 \times 10^{-5} Pa$$

هي قيمة صغيرة جداً

أما أكبر زيادة في الضغط عند حد الإيلام فهي

$$P_{max} = (2 \times 1.2 \times 342.0 \times 1)^{1/2} = 28.6\ Pa$$

السعة في الحالة الأولى :

$$y_0 = \frac{P_{\max}}{\rho \omega v}$$

وحيث إن $\omega = 2\pi f$ فإن

$$y_0 = \frac{2.86 \times 10^{-5} Pa}{1.2 kg \times 2\pi(1000.0 Hz) \times 342.0 m/s} = 1.1 \times 10^{-11} m$$

وهذه قيمة صغيرة جداً ترينا شدة حساسية الأذن.

الحالة الثانية:

$$y_0 = \frac{28.6 Pa}{1.2 kg \times (2000\pi Hz) \times 342 m/s}$$

$$= 1.1 \times 10^{-5}\ m$$

مثال 9.4

في المثال السابق إذا كانت سعة الموجة $10.0^{-5}m$ فاحسب مستوى الشدة لها .

الحل:

حيث إن

$$k^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad و \quad I = \frac{P_{max}^2}{2\rho v} \quad و \quad P_{max} = B\,k\,y_0$$

فإنه يمكن استنتاج أن

$$I = \frac{\omega^2 (\gamma P_{air} \rho)^{\frac{1}{2}} y_0^2}{2}$$

وبالتعويض فيها نجد أن

$$I = \frac{1}{2}(2\pi \times 1000)^2 (1.4 \times 1.013 \times 10^5 \times 1.2)^{\frac{1}{2}} \times 10^{-10}\ W/m^2 = 0.81\ W/m^2$$

لكن $\beta = 10\,log\,\dfrac{I}{I_0}$ وبالتعويض نحصل على مستوى الشدة ،

$$\beta = 10\log\frac{0.814}{10^{-12}} = 119.1\ dB$$

9.4 الموجات الكرية Spherical Waves

إذا كان المصدر كري الشكل ويهتز دورياً بحيث يتغير نصف القطر توافقياً مع الزمن فإنه يتولد دورياً موجة ذات مقدمة كرية وتتحرك بسرعة ثابتة.

وحيث إن كل النقاط على سطح الكرة لها نفس الخصائص فإن طاقة الموجة تتوزع بالتساوي في كل الاتجاهات.

فإذا كان متوسط القدرة الصادرة عن المصدر هو P_{av} فإنها تتوزع على كرة مساحتها $4\pi r^2$ وعليه فإن شدة الموجة على بعد r من المركز هي

$$I = P_{av} / 4\pi r^2 \qquad (9.12)$$

وحيث إن P_{av} ثابتة دائماً فإن

$$A_1 I_1 = A_2 I_2 = \cdots = P_{av}$$

حيث A_1 ، A_2 ، .... هي مساحات على الأبعاد r_1 ، r_2 ، .... من المصدر ومنها فإن

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad (9.13)$$

ومن هذه المعادلة نلاحظ أن الشدة تتناسب عكساً مع r^2 وهي علاقة صحيحة مع كثير من مصادر الطاقة مثل ضوء منبعث عن مصدر نقطي .

مثال 9.5

مصدر صوتي يرسل موجاته في كل الاتجاهات في الهواء . على بعد 10.0 m كان مستوى الشدة 60.0dB والتردد 500.0 Hz.

أ– احسب سعة الموجة عند هذه المسافة. ب– احسب أقصى زيادة في الضغط.

جـ– عند أي مسافة يكون مستوى الشدة 40db .

الحل:

أ– نحسب الشدة على بعد 10.0m من علاقة مستوى الشدة

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

وبالتعويض فإن

$$60.0 = 10.0 \log \frac{I}{I_0}$$

وهي صحيحة بالصيغة

$$6.0 = \log \frac{I}{I_0}$$

$$10\ .0^{6} = \frac{I}{I_0}$$

لكن

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(500Hz) = 3141.6\, s^{-1}$$

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{3141.6 s^{-1}}{342 m/s}$$

$$= 9.186\ m^{-1}$$

ومعامل المرونة الحجمي للهواء

$$B = \gamma P = 1.4 \times 1.013 \times 10^{5}\, Pa$$

$$= 1.42 \times 10^{5}\ Pa$$

ومن المعادلة

$$I = \frac{1}{2}\omega B k y_0^2$$

نجد السعة

$$y_0 = \sqrt{\frac{2I}{\omega B k}} = 2.21 \times 10^{-8} m$$

ب – نحسب أقصى زيادة في الضغط من العلاقة

$$P_{max} = Bky_0 = 2.88\times10^{-2}\,Pa$$

جـ– نحسب I_2 وهي الشدة عند مستوى 40dB

$$40 = 10\log\frac{I}{I_0}$$

$$10^4 = \frac{I}{I_0}$$

$$I_2 = 10^4 \times 10^{-12}\text{W} = 10^{-8}\text{ W}$$

لكن

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

إذن

$$r_2^2 = (10.0m)^2(10.0^{-6}W)/10.0^{-8}w$$

$$= 10.0^4\, m^2$$

$$r_2 = 100.0\, m$$

9.5 تغير سرعة الصوت بتغير درجة الحرارة

Dependence of Speed of Sound on Temperature

نفرض أن سرعة الصوت في الوسط تتغير من v_1 إلى v_2 عندما تتغير درجة الحرارة من T_1 إلى T_2 وباستخدام المعادلة (8.8) ,$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$, وكذلك المعادلة (8.9), $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$, فإن

$$\frac{v_1}{v_2}=\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}=\sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

وحيث إن T تعطى بالكيلفن فإن

$$v_2=v_1\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}=v_1\sqrt{\frac{273+C_2}{273+C_1}}$$

حيث C_1 ، C_2 هما درجتا الحرارة المئوية المقابلتان للدرجتين T_1 و T_2 .

إذا اعتبرنا أن v_0 هي سرعة الصوت عند درجة الصفر المئوي فإن

$$v=v_0(1+\frac{C}{273})^{\frac{1}{2}}$$

$$\cong v_0(1+\frac{C}{540}) \qquad (9.14)$$

ويمكن تقريب العلاقة لتصبح

$$v_c=v_o+0.61\ C \qquad (9.15)$$

هذا باعتبار سرعة الصوت في الهواء عند درجة الصفر هي 330 m/s .

مثال 9.6

عند درجة حرارة 20.0^0C كانت كثافة الهواء $1.2\ kg/m^3$ وكانت سرعة الصوت فيه $340.0m/s$. كم كثافة وسرعة الصوت عند درجة حرارة 40.0^0C ؟

الحل :

حيث إن

$$v_2=v_1\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

فإن سرعة الصوت عند درجة حرارة 40.0^0C هي

$$v_2 = 340\sqrt{\frac{313.0}{293.0}}\ m/s = 351.4\ m/s$$

وحيث إن

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

فإن كثافة الهواء عند درجة $40.0^0 C$ هي

$$\rho = 1.2 \times \frac{293}{313}\ kg/m^3 = 1.12\ kg/m^3$$

مثال 9.7

استخدمت أنبوبة مفتوح طرفها العلوي لحساب التردد لشوكة مهتزة.ملئت الأنبوبة بالماء وقربت شوكة مهتزة من الفتحة وسمح للماء بالخروج ببطء من أسفل الأنبوبة .

عند وصول الماء إلى نقطة نسميها a سمع الرنين الأول ومع استمرار تسرب الماء لوحظ أنه على مسافة $45cm$ من a سمع الرنين الثاني.

إذا كانت درجة الحرارة $30^\circ C$ عند إجراء التجربة فعين تردد الشوكة .

الحل:

نعلم أن التردد يعطى بالصيغة $f = \frac{v}{\lambda}$

حيث v هي سرعة الصوت عند الدرجة $30^\circ C$ و λ هو طول الموجة. ولحساب السرعة فإنه يمكن استخدام التقريب الوارد في المعادلة (9.15)

$$v = v_0 + 0.61C = (330 + 0.61 \times 30) m/s = 348.3 m/s$$

وحيث إن a و b يمثلان عقدتين متتاليتين في أنبوب مفتوح فإن

$$\lambda = 2ab = 2 \times 45cm = 90cm = 0.9m$$

وبالتعويض فإن قيمة التردد هي

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{348.3m/s}{0.9m} = 387vib/\sec = 387Hz$$

9.6 النبضات Beats

تعرضنا من قبل للتداخل عند الحديث عن الموجات الموقوفة والتي تنشأ عند تلاقي موجتين لهما نفس السعة والتردد ويتحركان باتجاهين متعاكسين. والآن سندرس نوعاً آخر فيه الموجتان لهما نفس السعة ولكن يختلفان قليلاً في التردد.

ويمثل الشكل (9.3a) الموجتين بينما يمثل الشكل (9.3b) محصلتهما والتي نلاحظ فيها تغير السعة مع الزمن ، وهذا التغير في السعة يتبعه تغير في الشدة وفي حالة التطابق التام لبطنين فإننا نحصل على أكبر شدة للموجة المحصلة وهنا نسميها النبضات Beats ، وللحصول على الموجة المحصلة نمثل الموجتين بالإزاحتين y_1 و y_2 حيث

$$y_1 = A \sin \omega_1 t$$

و

$$y_2 = A \sin \omega_2 t$$

وباستخدام مبدأ المطابقة ، تكون المحصلة

$$y = y_1 + y_2 = A [\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t]$$

ولما كان

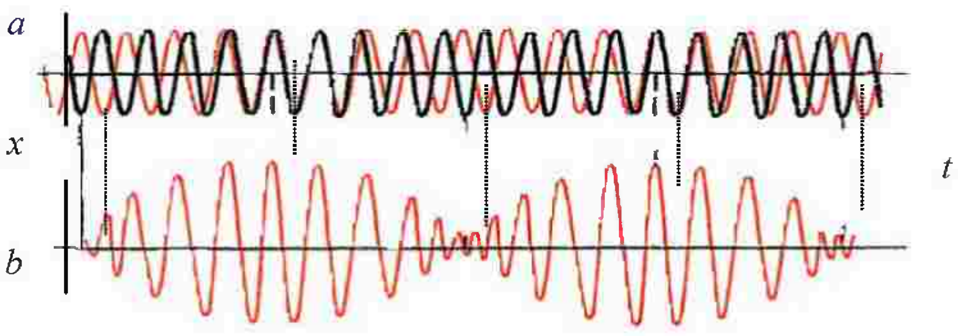
$$\sin a + \sin b = 2\sin\frac{a+b}{2}\cos\frac{a-b}{2}$$

فإننا نكتب العلاقة السابقة على الصورة

$$y = \left[2A\cos\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right]\sin\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t$$

$$y = \left[2A\cos 2\pi\left(\frac{f_2 - f_1}{2}\right)t\right]\sin 2\pi\frac{f_1 + f_2}{2}t$$

$$y = \left[2A\cos 2\pi\frac{\Delta f}{2}t\right]\sin 2\pi f_{av}t \qquad (9.16)$$



شكل (9.3)

ويمكن اعتبار الاهتزاز الناتج بأنه اهتزاز تردده $f_{ave} = \frac{f_1 + f_2}{2}$ أي متوسط تردد النغمتين المتداخلتين وسعته معطاة بالمقدار المحصور بين القوسين ، وعليه فإن السعة تتغير مع الزمن بتردد قدره $\Delta f = \frac{f_1 - f_2}{2}$ ويسمى تردد النبضة . إذا كانت قيمة f_1 قريبة من قيمة f_2 فإن قيمة هذا المقدر تكون ضئيلة ويكون التغير في السعة بطيئاً. وعندما تكون السعة كبيرة يكون الصوت شديداً وبالعكس ، هذا وتحصل السعة الكبرى (أو ما أسميناه بالنبضة) عندما يساوي المقدار $\cos 2\pi\frac{\Delta f}{2}t$ القيمة 1 أو

1- وحيث إن هذه السعة تحدث مرة واحدة في الدورة لكل من القيمتين السابقتين فإن عدد النبضات في الثانية هو ضعف تردد النبضة ، أي أن عدد النبضات في الثانية يساوي الفرق بين الترددين وهذا يتم عند المساواة

$$2\pi\frac{\Delta f}{2}=n\pi$$

ومنه فإن

$$n=|\Delta f|=|f_2-f_1| \tag{9.17}$$

ويمثل عدد النبضات في الثانية الواحدة ويمكن للأذن أن تميز النبضات لنغمتين إلى تردد نبضة في حدود 6 Hz إلى 7 Hz

9.7 ظاهرة دوبلر The Doppler Effect

عندما يكون مصدر الصوت أو السامع أو كلاهما متحركاً فإن شدة الصوت الذي يصل السامع تختلف عن شدته في حالة السكون ويصاحب التغير في الشدة تغير في كل من طول الموجة والتردد. وهذه ظاهرة شائعة نلحظها في الانخفاض المفاجئ في الصوت الصادر عن سيارتين مسرعتين ومتعاكستين. هذه الظاهرة عُرفت بظاهرة دوبلر ، نسبة إلى العالم النمساوي كرستيان دوبلر Christian J. Doppler (1803-1853)، والتي درس فيها العلاقة بين التردد الواصل إلى السامع والتردد الأصلي للمصدر وسرعتي المصدر والسامع وكذلك سرعة الصوت.

لتكن v هي سرعة الصوت و v_s هي سرعة المصدر و v_L هي سرعة السامع و f هي التردد الصادر عن المصدر و f' هي التردد الواصل إلى السامع والذي لا يساوي f إلا في حالة السكون و λ هي طول الموجة الصادرة عن المصدر.

والآن سنأخذ الحالة الأولى والتي فيها يتحرك السامع مع سكون المصدر.

أ- ولنبدأ بالسامع المتحرك نحو المصدر الساكن. في هذه الحالة فإن سرعة الصوت الواصل إلى الأذن هو مجموع سرعتي الصوت والسامع، $v' = v + v_L$ ،

وحيث إن طول الموجة لا يتغير فإن التردد

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_L}{\lambda}$$

وبالتعويض عن سرعة الموجة بقيمتها $v = f\lambda$ فإن

$$f' = f\left(1 + \frac{v_L}{v}\right) \qquad (9.18)$$

ب- أما إذا ابتعد السامع عن المصدر الساكن فإن سرعة الموجة بالنسبة للسامع هي $v' = v - v_L$ وعليه فإن

$$f' = f\left(1 - \frac{v_L}{v}\right) \qquad (9.19)$$

وبضم المعادلتين (9.18) و (9.19) نستطيع كتابة العلاقة بين التردد الصادر عن مصدر ساكن والتردد الواصل إلى سامع متحرك كالآتي :

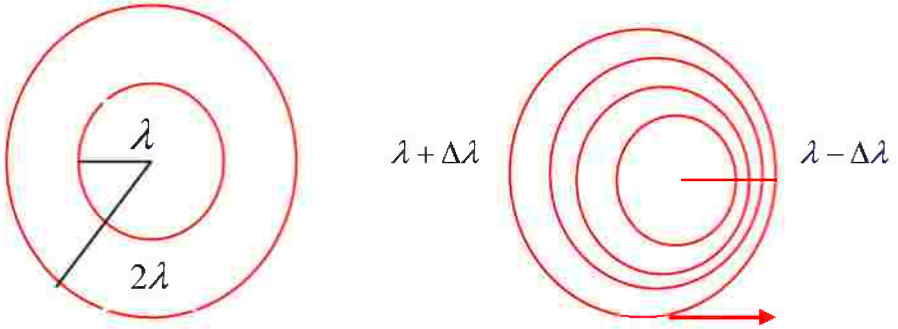
$$f' = f\left(1 \pm \frac{v_L}{v}\right) \qquad (9.20)$$

حيث إن الإشارة الموجبة تعني الحركة نحو المصدر والإشارة السالبة تعني الحركة مبتعداً عن المصدر.

والآن سنأخذ الحالة الثانية والتي فيها يتحرك المصدر مع سكون السامع. في هذه الحالة نلاحظ أن لحركة المصدر أثراً على طول الموجة فإذا اتجه المصدر نحو السامع فإن السامع يلاحظ تقارب في مقدمات الموجات نتيجة لاقتراب المصدر انظر الشكل (9.4) بينما تتباعد مقدمات الموجات في الجهة الأخرى نتيجة ابتعاد

المصدر.

وفي حالة الاقتراب نجد أن الطول الموجي نقص بمقدار $\Delta\lambda$ وفي حالة الابتعاد يزيد بمقدار $\Delta\lambda$ حيث $\Delta\lambda = v_s / \mathrm{f}$.



شكل(9.4)

$v_s = v_L = 0$ اتجاه الحركة

ا- **الحالة الأولى** هي اقتراب المصدر وسكون السامع وفي هذه الحالة سوف يكون الطول الموجي الجديد هو

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - \frac{v_s}{f}$$

وعليه فإن التردد الواصل إلى السامع هو

$$\mathrm{f}' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{\mathrm{f}}}$$

لكن $\lambda = v / \mathrm{f}$ وبالتعويض عنها فإن

$$\mathrm{f}' = \mathrm{f}\frac{v}{v - v_s} \qquad (9.21)$$

الحالة الثانية هي ابتعاد المصدر وسكون السامع وفي هذه الحالة سوف يكون الطول الموجي الجديد هو

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \lambda + \frac{v_s}{f}$$

و بالتعويض عنها نحصل على التردد الواصل إلى السامع

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f\frac{v}{v + v_s} \qquad (9.22)$$

وبضم المعادلتين (9.21) و (9.22) نستطيع كتابة العلاقة بين تردد المصدر والتردد الواصل إلى سامع ساكن كالآتي :

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s} \qquad (9.23)$$

ثالثاً– حالة تحرك المصدر والسامع معاً وفي هذه الحالة فإننا نجد الصيغة العامة للتردد الواصل إلى السامع وذلك بضم المعادلتين (9.20) و (9.23) .

$$\mathrm{f}' = \mathrm{f}\frac{v \mp v_L}{v \mp v_s} \qquad (9.24)$$

الإشارات ($+ V_L$ و $- V_S$) تشير إلى أن كلاً منهما يتحرك نحو الآخر. والإشارات ($+ V_S$ و $- V_L$) تعني أن كلاً منهما يبتعد عن الآخر.

وهناك حالات تشابه الإشارات نتركها للقارئ إذ أنها تعني تحركاً في نفس الاتجاه أحدهما يتبع الآخر. نلاحظ أن كلمة نحو تعني زيادة في قيمة التردد f' ويبتعد عن تعني النقص في قيمة التردد f' .

مثال 9. 7

اثبت أن المعادلتين (9.20) و (9.23) عملياً متطابقة وذلك عندما تكون سرعة المصدر وسرعة السامع صغيرتين مقارنة بسرعة الموجة .

الحل:

افرض أن

$$v_s = v_L = u$$

وعليه فإن المعادلة (9.20) تصبح

$$f' = f\left(1 \pm \frac{u}{v}\right)$$

وعلينا أن نثبت أن المعادلة (9.23) تؤول إلى المعادلة السابقة عند $u << v$

ويمكن كتابة المعادلة (9.23) بالصيغة

$$f' = f\left(\frac{1}{1 \pm \frac{u}{v}}\right)$$

وباستخدام المفكوك

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm nx \pm \frac{n(n-1)}{2}x^2 \pm \cdots$$

نحصل على

$$\frac{1}{1 \pm \frac{u}{v}} = 1 \pm \frac{u}{v} + \left(\frac{u}{v}\right)^2 \pm \cdots$$

لكن $\frac{u}{v}$ صغيرة مما يمكن من إهمال $\left(\frac{u}{v}\right)^2$ والحدود التي تتبعها ومنه فإن

$$\frac{1}{1\pm\frac{u}{v}} \cong 1\pm\frac{u}{v}$$

ومنه تصبح المعادلة (9.23) على الصورة

$$f' = f \left(1\pm\frac{u}{v}\right)$$

وهي نفس المعادلة (9.20)

وللتدليل على هذا بمثل عددي خذ $u = 30.0$ m/s ، وخذ سرعة الصوت حوالي $330.0\mathrm{m}/s$. وهنا فإن التردد الواصل من مصدر متحرك نحو سامع ساكن هو

$$f' = f\,\frac{330.0}{330.0-30.0} = 1.1 f$$

وكذلك فإن التردد الواصل إلى سامع متحرك نحو المصدر الساكن هو

$$f' = f\,\frac{330.0}{330.0-30.0} = 1.091 f \cong 1.1 f$$

ومنها نلاحظ أن الفرق بين الترددين لا يزيد عن 1.0% .

مثال 9. 8

قطار يتجه إلى محطة بسرعة $25.0m/s$ ويرسل صفارة التحذير بتردد قدره $500.0Hz$

1- احسب التردد الواصل إلى سامع واقف في صالة الانتظار.

2- إذا غادر القطار المحطة بنفس السرعة ومصدراً نفس التردد فاحسب التردد الواصل في هذه الحالة إلى السامع.

الحل:

في الحالة الأولى يزداد التردد باقتراب القطار ونستخدم لذلك العلاقة (9.21)

$$f' = f\frac{v}{v - v_s}$$

نعتبر سرعة الصوت *342 m/s* ونعوض بالقيم لدينا:

$$f' = 500\text{Hz}\frac{342\text{m/s}}{342 - 25\text{m/s}} = 539.4\text{Hz}$$

أما في الحالة الثانية فإن التردد يقل نتيجة ابتعاد القطار ونستخدم العلاقة (9.22)

$$f' = f\frac{v}{v + v_s}$$

$$= 500\text{Hz}\frac{342\text{m/s}}{342\text{m/s} + 25\text{m/s}} = 466.0\text{Hz}$$

مثال 9.9

سيارة إسعاف لها سرعة 30.0 m/s ولها صفير تردده 500.0Hz والذي يُسمع من ركاب سيارة أخرى تسير بسرعة 25.0 m/s.

أ- احسب التردد الواصل إلى ركاب السيارة في حالتي اقتراب السيارتين من بعضهما وفي حالة ابتعادهما عن بعضهما .

ب- احسب التردد في حالة أن السيارتين تسيران في اتجاه واحد .

الحل:

أ- في حالة اقتراب السيارتين من بعضهما فإن التردد المسموع أعلى ما يمكن وهذا يتحقق من المعادلة

$$f' = f\frac{v+v_L}{v-v_s}$$

$$= 500.0Hz\frac{342.0m/s+25.0m/s}{342.0m/s-30.0m/s} = 588.0m/s$$

أما في حال ابتعاد السيارتين وفي اتجاهين مختلفين فإن التردد الواصل يكون أقل ما يمكن ونستخدم الصيغة الثانية

$$f' = f\frac{v-v_L}{v+v_s} = 426.0Hz$$

ب- في حالة الابتعاد وفي اتجاه واحد يكون إما الإسعاف في الأمام أو السيارة في الأمام.

1- في حالة الإسعاف في الأمام والسيارة في الخلف فإن طول الموجة يزيد أي أن :

$$f' = f\frac{v+v_L}{v+v_s}$$

$$f' = 500.0Hz\frac{342.0m/s+25.0m/s}{342.0m/s+30.0m/s} = 493Hz$$

2- في حالة السيارة في الأمام (سامع مبتعد) والإسعاف في الخلف (مصدر مقترب) فإن :

$$f' = f\frac{v-v_L}{v-v_s}$$

$$= 500Hz\frac{342m/s - 25m/s}{342m/s-30m/s} = 508m/s$$

مســـائل

1- سرعة الصوت $345.0 m/s$ إذا لم تُعطى القيمة في أي مسألة.

أ – ما تردد مصدر لموجة صوتية طولها $2.0 cm$ تحرك في ماء البحر حيث سرعة الصوت فيه $1.5 x 10^5 cm/s$ ؟

ب – صوت تردده $1000.0 Hz$ وسرعته عند الصفر المئوي $330.0 m/s$ احسب طول موجته عند درجة حرارة $30.0^o C$.

2- احسب سرعة الصوت في الهيدروجين عند درجة $0.0 C^o$ حيث $\gamma=1.4$ و $M=2.016 g/mo1$ ثم احسبه عند $30.0^{\circ} C$.

3- إذا كانت سعة موجة صوتية $1.1 x 10^{-5} m$ وترددها $1000.0 Hz$ وسرعتها $350.0 m/s$.

أ- فاحسب الضغط الواقع على أذن السامع لهذه الموجة .

ب – احسب الشدة لهذه الموجة في الهواء حيث كثافة الهواء $1.22 g/cm^3$.

4- أ – إذا ضاعفنا قيمة أكبر ضغط فما قيمة شدة الموجة الجديد ؟

ب-إذا زادت الشدة بمعامل 16.0 فبأى قيمة يجب أن يزيد أكبر ضغط ؟

5- احسب مستوى الشدة لموجة في الهواء سعة ضغطها $0.25 Pa$.

6- إذا كان β_1 و β_2 يمثلان مستوى الشدة لصوتين شدتاهما I_1 و I_2 وسعتا ضغطاهما P_1 و P_2 فاثبت أن:

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

و

$$\beta_2 - \beta_1 = 20 \log \frac{P_2}{P_1}$$

7- إذا كان مستوى الشدة الواصل إلى نافذة مساحتها $1.0m^2$ هو 50db احسب معدل الطاقة و القدرة التي تدخل النافذة .

8- يبعث مصدر ضوئي قدرة كلية تساوى 20.0W في كل الاتجاهات .على أي بعد من المصدر يكون لمستوى الشدة القيمة 80.0db .

9- يرسل مصدر ضوئي موجات في كل الاتجاهات في الهواء على بعد 10.0m كان مستوى الشدة 70.0dB. و قيمة التردد 500.0Hz.

أ- كم سعة الموجة وأكبر ضغط عند هذه النقطة ؟

ب-احسب المسافة التي عندها يأخذ مستوى الشدة القيمة 50.0db.

10- موجة سرعتها $330.0m/s$ وصادرة عن مصدر تردده $600.0Hz$. إذا بعث المصدر طاقته في كل الاتجاهات وبمعدل $10.0W$.

1- فاحسب شدة الموجة على بعد $20.0m$ من المصدر. 2- واحسب سعة الموجة على نفس البعد.

11- مصدران للصوت A و B قدرتاهما على التوالي 0.1W و 0.2W لهما نفس الطور وبتردد قدره 200.0Hz

أ- احسب فرق الطور لإشارتين صادرتين منهما عند نقطة تبعد عن A 4.0m وعن B 3.0m .

ب - احسب الشدة عند هذه النقطة عند قفل A ثم احسبها عند قفل B .

جـ - احسب محصلة الشدة وكذلك مستواها عند هذه النقطة في حالة عمل كلا المصدرين.

12- قطاران يتجهان نحو بعضهما وبسرعة 90.0km/h للأول و 75.0km/h للثاني. أصدر الأول صوتا تردد 500.0Hz.

أ- احسب التردد الواصل إلى القطار الثاني.

ب- احسب التردد الواصل إلى القطار الثاني إذا تبادلا السرعتين .

جـ- احسب التردد إذا كان القطاران مبتعدين عن بعضهما وفي اتجاهين متعاكسين ثم احسبها لو أن القطار الثاني يتبع الأول .

13- ولدان مع كل منهما مصدر للصوت تردده 1000.0Hz إذا ظل أحدهما ساكنا والآخر تحرك مبتعدا بسرعة 2.0m/s فاحسب عدد النبضات في الثانية التي يسمعها كل منهما .

14- قطار يسير بسرعة 25.0m/s ويصدر صوتا بتردد 500.0Hz .

أ- احسب طول الموجة أمام وخلف القطار.

ب- احسب التردد الواصل إلى راكب في قطار آخر يسير بسرعة 15.0m/s متجها نحو الأول ثم مبتعدا عنه .

❋ ❋ ❋

ملحق (1)

Mathematical Relations بعض العلاقات الرياضية

Geometrical Relations العلاقات الهندسية

$$1 - Sin\alpha \sin\beta = \frac{1}{2}Cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2}Cos(\alpha + \beta)$$

$$2 - Cos\alpha Cos\beta = \frac{1}{2}Cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2}Cos(\alpha + \beta)$$

$$3 - Sin\alpha Cos\beta = \frac{1}{2}Sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2}Sin(\alpha - \beta)$$

$$4 - Sin(\alpha \pm \beta) = Sin\alpha Cos\beta \pm Cos\alpha Sin\beta$$

$$5 - Cos(\alpha \pm \beta) = Cos\alpha Cos\beta \pm Sin\alpha Sin\beta$$

$$6 - e^{\pm i\theta} = Cos\theta \mp i\ Sin\ \theta$$

$$7 - Cos\theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}$$

$$8 - Sin\theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}$$

$$9 - Cos2\alpha = Cos^2\alpha - Sin^2\alpha$$

$$10 - Cos^2\alpha + Sin^2\alpha = 1$$

$$11 - Cos2\alpha = 1 - 2Sin^2\alpha$$

$$12 - Sin^2\alpha = \frac{1}{2}(1 - Cos2\alpha)$$

$$13 - Cos^2\alpha = \frac{1}{2}(Cos2\alpha - 1)$$

$$14 - Sin\alpha Cos\alpha = \frac{1}{2}Sin2\alpha$$

$$15 - e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + ...$$

$$16 - Cosx = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + ...$$

$$17 - Sinx = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + ...$$

$$18 - \frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + ..., x < 1$$

❊ ❊ ❊

ملحق (2)

Standard Integrations التكاملات القياسية

$n = 0,1,2,3,.....$,

$$1 - \int_0^\infty x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$$

$$2 - \int_0^\infty e^{-ax^2} dx = (\frac{\pi}{4a})^{1/2}$$

$$3 - \int_0^\infty x^{2n} e^{-ax^2} dx = \frac{1.3.5...(2n-1)}{2^{n+1} a^n} (\frac{\pi}{a})^{1/2}$$

$$4 - \int_0^\infty x^{2n+1} e^{-ax^2} dx = \frac{n!}{2a^{n+1}}$$

$$5 - \int_0^a Sin\frac{n\pi x}{a} Sin\frac{m\pi x}{a} dx = \int_0^a Cos\frac{n\pi x}{a} Cos\frac{m\pi x}{a} dx = \frac{a}{2}\delta_{nm}$$

,n=1,2,..,m=1,2,3

$$6 - \int_0^a Cos\frac{n\pi x}{a} Sin\frac{m\pi x}{a} dx = 0$$

$$7 - \int A Sinax dx = -\frac{A}{a} Cosax$$

$$8 - \int A(Cosax) dx = \frac{A}{a} Sinax$$

$$9-\int Ae^{ax}dx=\frac{A}{a}e^{ax}$$

$$10-\int xSinaxdx=\frac{1}{a^{2}}Sinax-\frac{x}{a}Cosax$$

$$11-\int xe^{ax}dx=(ax-1)\frac{e^{ax}}{a^{2}}$$

$$12-\int x^{2}e^{ax}dx=e^{ax}(\frac{x^{2}}{a}-\frac{2x}{a^{2}}+\frac{2}{a^{3}})$$

* * *

ملحق (3-أ)

بعض الرموز

الكمية	الوحدة الدولية (SI)	المادة
الطول	متر	m
الكتلة	كيلو جرام	kg
الزمن	ثانية	s
درجة الحرارة المطلقة	كلفن	K
القوة	نيوتن	N
الضغط	باسكال	Pa
الطاقة	جول	J
القدرة	واط	W

❊ ❊ ❊

ملحق (3-ب)

بعض الثوابت

$1000\ kg/m^3$	كثافة الماء
$13600\ kg/m^3$	كثافة الزئبق
$4187\ J/kg\,.\,K$	الحرارة النوعية للماء
$9.8\ m/s^2$	عجلة الجاذبية الأرضية
$1.013\times10^5\ Pa$	ضغط جوي واحد
$8.314\ J/mol\,.K$	الثابت العام للغازات
$6.023\times10^{23}\ M/mol$	عدد أفوجادرو
$5.67\times10^{-8}\ W/m^2K^4$	ثابت ستيفان- بولتزمان
$2.9979\times10^8\ m/s$	سرعة الضوء
$1.38\times10^{-23}J/K$	ثابت بولتزمان
$1.0977\ \times\ 10^{-7}em^{-1}$	ثابت رايدبرج
$6.6261\times10^{-34}J\cdot S$	ثابت بلانك
$1353J/m^2\cdot s$	الثابت الشمسي

❋ ❋ ❋

المراجع

1- الفيزياء الحديثة للجامعات - سيرز، زيمانسكي، وينج - جامعة الرياض السعودية .

2- أساسيات الفيزياء . الجزء الأول - أحمد شوقي عمار - دار راتب الجامعية.بيروت .

3- الفيزياء التطبيقية الجزء الثاني - محمد عيد المقصود الجمال - دار راتب الجامعية.بيروت

4- المبادئ الأساسية للفيزياء العامة - عبد المنعم حسان وآخرون - دار العلم للطباعة والنشر- السعودية .

5- أساسيات الفيزياء ف.بوش - دار المريخ للنشر - الرياض .

6- أساسيات الميكانيكا وخواص المادة - رأفت كامل واصف - دار المعارف - القاهرة .

7- أساسيات الفيزياء الكلاسيكية والمعاصرة - رأفت كامل واصف - دار النشر للجامعات المصرية - مكتبة الوفاء .

المراجع الأجنبية

1- University physics, 7th Edition . Sears , Zemansky, Young Addison – Wesley Pub.com

2- Physics, Alonso – Finn . Addison – Wesley Pup .com.

3- College physics, Sears , Zemansky , third Edition . Addison – wesely .

4- Concepts in physics, Benumof . prentice Hall.

5- Physics , Halliday and Resnick . third Edition , wiley .

6- Fundamentals of physics , Halliday , Resnick , walker , sixth Edition . Wiley .

7- Thermal L physics P.Morse , Benjamin ….

8- Heat , thermodynamics , and statisrical physics , F. Crawford , Harcourt, prace and world , Inc.

9- Physics for Scientists and Engneers third edition , Serway, Saunders. College publishing, Chicago .

10- The physics problem solver M.Fogiel , Research and Education Association. New York .

11- Solutions Guide to accompary Universiny physics A.lewis lord .