الأمواج Waves

1- مقدمة

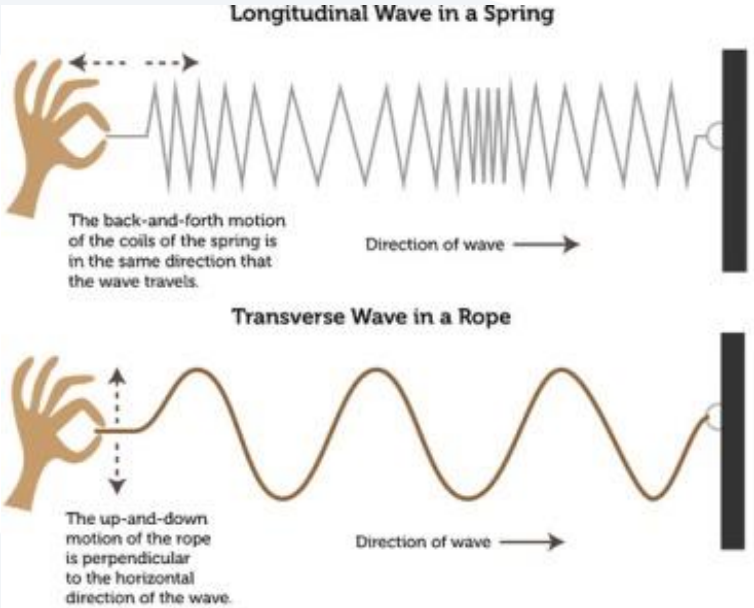
الموجة عبارة عن اضطراب يتحرك أو ينتشر في الوسط بسرعة معينة فإذا أسقطنا حجر في الماء الراكد فإن سطح الماء عند نقطة سقوط الحجر سوف يبدأ بالاهتزاز إلى أسفل وأعلى وهكذا (حركة توافقية بسيطة) ولكن الإهتزاز لا يتوقف على نقطة سقوط الحجر بل ينتشر وبسرعة معينة في المنطقة حول هذه النقطة وسوف تبدأ كل نقطة من النقاط في هذه المنطقة بالاهتزاز.

الجدير بالذكر أنه لا توجد حركة انتقالية للماء, أي انتقال كميات من الماء مع انتشار الموجة ولكن ذلك الذي ينتشر أو يتحرك هو ذلك الاضطراب الذي حدث في سطح الماء عند اسقاط الحجر فيه. من أهم خصائص الأمواج أيضاً أن الموجة تحمل معها طاقة من مكان لآخر. فسطح الماء بعيداً عن نقطة سقوط الحجر والذي كان ساكناً أصبح الآن يهتز, أي انتقلت إليه الطاقة.

2- أنواع الأمواج types of waves:

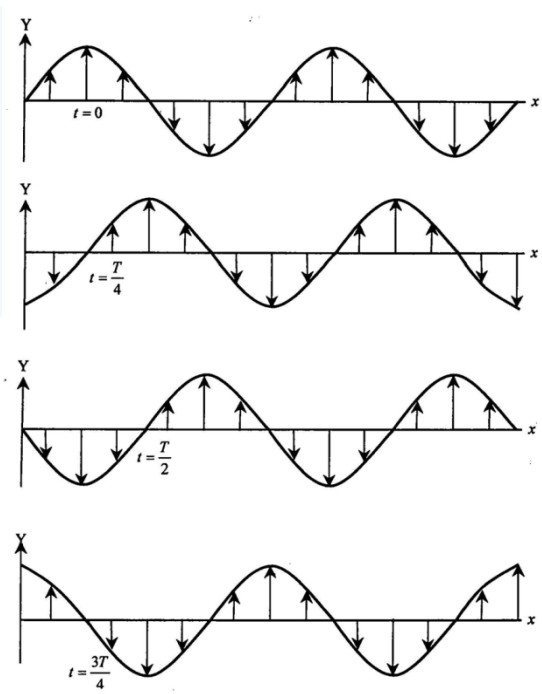
1- الأمواج الطولانية: في هذا النوع تكون إزاحة الوسط موازية لإتجاه انتشار الموجة وتتكون كل موجة طولية من تضاغطات وتخلخلات مثل أمواج النابض وأمواج الصوت.

2- الأمواج العرضانية: تكون فيها إزاحة الوسط عمودية على جهة انتشار الموجة. تتكون كل موجة من قمم وقيعان بحيث يكون الطول الموجي للموجة عبارة عن المسافة بين أي قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين أو بين أي نقطتين متتاليتين لهما نفس الطور (نفس السرعة والتسارع والإتجاه)



الشكل (1): مقارنة بين الموجة الطولية (أعلى) والموجة العرضية (أسفل).

3- أمواج الفتل (اللي): تسمى الموجة التي تنتشر بشكل لولبي بينما يكون سطح الدائرة عمودياً بالنسبة لاتجاه انتشار الموجة بموجة الفتل. تحدث هذه الأمواج عند فتل قضيب معدني حول نفسه (الشكل رقم 1).



الشكل (2): شكل موجة الفتل

3- العناصر الأساسية للأمواج Basic elements of waves:

طول الموجة λ wavelength: بالنسبة للموجة العرضية تعرف بأنها المسافة بي قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين, وبالنسبة للموجة الطولية فتعرف بأنها المسافة بين قمتين تضاغيتين متتاليتين أو قمتين تخلخليتين متتاليتين.

التردد f frequency: هو عدد الاهتزازات الكاملة التي يحدثها المصدر في الثانية (عدد مرات التكرار للموجة الواحدة في زمن معين). التردد هو مقلوب الزمن ويعرف بالعلاقة $f = \frac{1}{t}$ واحدته s^{-1} أو Hz.

العدد الموجي او ثابت الانتشار k wavenumber: هو عدد الموجات في مسافة معينة ويقاس بواحدة m^{-1}.

سعة الموجة A amplitude: هي ارتفاع قمة الموجة وهي القيمة المطلقة لأقصى مسافة (إزاحة) تحدثها الموجة من نقطة الاتزان أثناء انتشارها.

سرعة الموجة v velocity: هي المسافة التي تقطعها الموجة في وحدة الزمن.

4- الوصف الرياضي للحركة الموجية Mathematical description of wave motion:

المعادلة الرياضية للحركة الموجية هي من الشكل:

$$(1) s(x,t) = f(x \pm vt)$$

تمثل المعادلة الأخيرة رقم 1 صيغة رياضية لوصف حالة فيزيائية تنتشر دون تغير بالاتجاه الموجب أو بالسالب للمحور x وهذا ما نسميه حركة موجية. إن الحالة الأكثر أهمية هي الحالة التي يكون فيها $s(x,t)$ تابعاً جيبياً مثل:

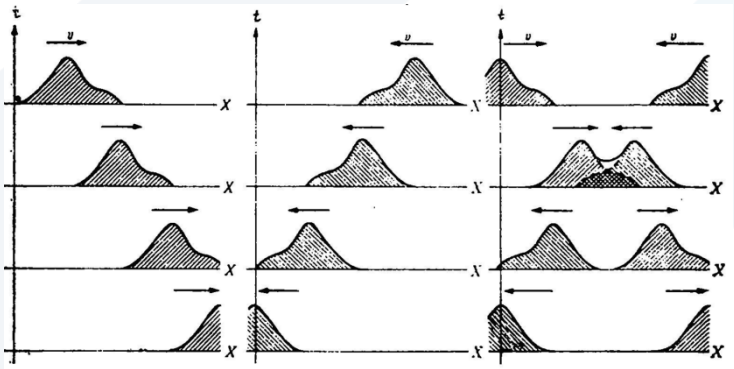
$$(2) s(x,t) = s_0 \sin k(x - vt)$$

إذا قمنا بتبديل x بالقيمة $(x+\frac{2\pi}{k})$ نحصل على قيمة $s(x,t)$ نفسها. أي أن:

$$s\left(x+\frac{2\pi}{k},t\right)=s_0\sin k\left(x\frac{2\pi}{k}-vt\right)$$

$$\rightarrow s\left(x+\frac{2\pi}{k},t\right)=s_0\sin[k(x-vt)+2\pi]$$

$$=s(x,t)$$



الشكل (3): يسار: انتشار موجة نحو المين, منتصف: انتشار موجة نحو اليسار, يمين: انتشار موجتين باتجاهين متعاكسين

نسمي المقدار $\lambda=\frac{2\pi}{k}$ بطول الموجة. ويسمى المقدار k بالعدد الموجي $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ وبالتالي نستطيع كتابة معادلة $s(x,t)$ رقم 2 بالشكل التالي:

$$s(x,t)=s_0 sin\, k(x-vt)$$

$$(3)s(x,t)=s_0 sin\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(x-vt)\right]$$

حيث v سرعة الطور. تمثل المعادلة الأخيرة رقم 3 معادلة موجية جيبية تنتشر نحو اليمين بطول موجي λ وبسرعة طور v على المحور x. ويمكن كتابتها بالشكل التالي:

$$s(x,t) = s_0 sin\ (kx - \omega t) \quad (4)$$

حيث أن $\omega = kv = \frac{2\pi v}{\lambda}$ ولكننا نعلم أن $\omega = 2\pi\upsilon$ حيث هو التواتر الخطي (التردد) وبالتالي يكون لدينا:

$\lambda\upsilon = v$ وهي تعبر عن العلاقة بين تواتر الحركة الموجية وسرعة انتشارها.

إذا كان دور الاهتزاز في كل نقطة $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\upsilon}$ وبالتالي نستطيع كتابة معادلة $s(x,t)$ رقم 4 بالشكل:

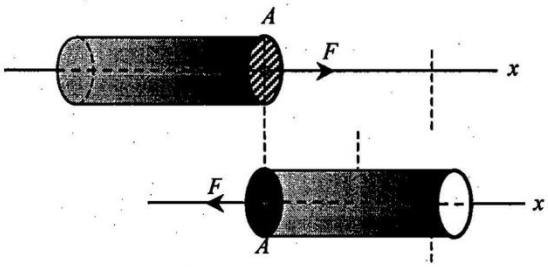
$$s(x,t) = s_0 sin\ 2\pi\ \left[\left(\frac{x}{\lambda}\right) - \left(\frac{t}{T}\right)\right] \quad (5)$$

5- انتشار Propagation الأمواج الطولية longitudinal wave في قضيب صلب:

عندما نطرق قضيب معدني باتجاه محوره الطولي ينتشر الاضطراب على طول القضيب وربما يظهر عند نهايته الأخرى.

فنقول في هذه الحالة أن موجة طولية قد انتشرت على طول القضيب.

نعتبر قضيباً ذا مقطع منتظم A يخضع إلى اجهاد مطبق على طول محوره ومشار إليه بالقوة F. الشكل رقم 4 قوتين متساويتين بالقياس ومتعاكستين بالاتجاه إحداهما متجه نحو اليمين ناتجة عن شد الجزء الأيسر من القضيب والأخرى متجهة نحو اليسار ناتجة عن شد الجزء الأيمن من القضيب.

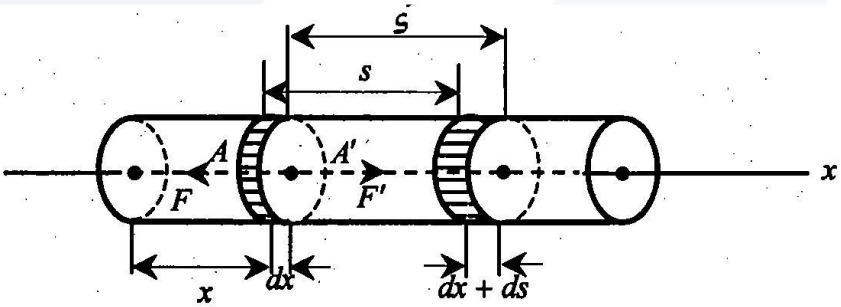


الشكل (4): الاجهاد المطبق على مقطع من قضيب

يعرف الإجهاد الناظمي S على مقطع القضيب بأنه القوة على واحدة السطح المؤثرة ناظمياً على المقطع العرضي في كل جهة, أي أن:

$$S = \frac{F}{A} \quad (6)$$

يقدر الإجهاد الناظمي في الجملة الدولية SI بالواحدة Nm^{-2}. تحت تأثير القوى يخضع كل مقطع من القضيب لانتقال صغير s موازياً للمحور. إذا كلن الانتقال واحداً في كل نقطة من نقاط القضيب لا يكون هناك تشوه, وانما انسحاب للقضيب وفق محوره. هنا سوف نهتم بالحالة التي يكون فيها تشوه, بحيث s يتغير على طول القضيب. أي أن s تابع للمتغير x. لذلك نعتبر مقطعين A' و A من القضيب تفصل بينهما مسافة قدرها dx, (الشكل رقم 5).



الشكل (5): انتشار موجة طولية في قضيب

عند تطبيق القوتين ينتقل المقطع A بمقدار s والمقطع A' بمقدار s' وتساوي المسافة بينهما في حالة التشوه إلى:

$$dx + (s' - s) = dx + ds \quad (7)$$

حيث أن $dx = s' - s$ هو تشوه القضيب.

يعرف الانفعال الناظمي (ε) في القضيب بأنه التشوه وفق المحور لواحدة الطول, وبما أن ds يعبر عن التشوه من أجل الطول dx فإن الانفعال الناظمي في القضيب يعطى بالعلاقة:

$$\varepsilon = \frac{ds}{dx} \quad (8)$$

نلاحظ أنه إذا لم يكن هناك تشـــوه فإن $s = const$ و $\varepsilon = 0$ أي لا يوجد انفعال ناظمي. كما نلاحظ بأن الانفعال الناظمي هو نســبة طولين وبالتالي ليس له واحدة قياس. يرتبط الاجهاد الناظمي بالانفعال الناظمي بعلاقة تدعى **قانون هوك** يعبر عنه بالعلاقة:

$$s = \gamma\varepsilon \quad (9)$$

وينص على أن الاجهاد الناظمي متناسـب دوماً مع الانفعال الناظمي ضـمن حدود المرونة للمادة المعتبرة. يسـمى الثابت γ عـامل يونغ للمرونـة ويقـاس في الجملـة الـدوليـة SI بواحـدة Nm^{-1}. الجـدول رقم 1 يبين ثوابـت المرونـة لبعض المواد المعروفة.

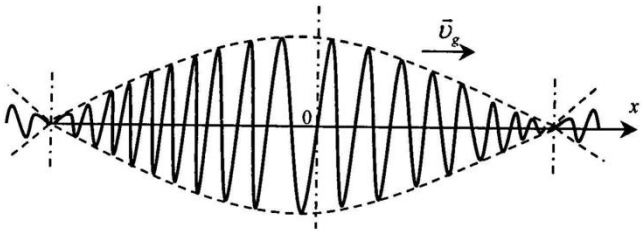
الجدول رقم (1) ثوابت المرونة لبعض المواد ($\times 10^{11} Nm^{-1}$)

المادة	المنيوم	نحاس	حديد	رصاص	نيكل	فولاذ
γ معامل يونغ	0.70	1.25	2.06	0.16	2.10	1.13
K معامل المرونة الحجمي	0.61	1.31	1.13	0.33	1.64	1.13
G عامل القص	0.24	0.46	0.82	0.054	0.72	0.80

6- سرعة الطور phase velocity وسرعة المجموعة group velocity

إن السرعة $v = \frac{\omega}{k}$ من أجل موجة جيبية تواترها ω وطول موجتها λ تسمى سرعة الطور.

لنفرض أنه لدينا موجة مســتمرة (قطار من الأمواج لا متناه) فإنه يمكن أن يكون لهذه الموجة طول واحد وتواتر وحيد (كما في الشكل رقم 6). هذا ما يسمى بالنبضة الموجية وتكون سرعة انتقال الإشارة مساوية للسرعة التي تنتشر بها هذه النبضة.



الشكل (6): شكل النبضة الموجية

إن النبضة الموجية المبينة بالشكل (6) ليست جيبية لأن سعتها ليست ثابتة على طول المحور x. نميز هنا حالتان:

1- سرعة الانتشار مستقلة عن التواتر (لا يوجد تبدد): في هذه الحالة تنتشر جميع مركبات الموجة بسرعة الطور نفسها.

2- سرعة الانتشار غير مستقلة عن التواتر (يوجد تبدد): في هذه الحالة كل مركبة من مركبات الموجة تنتشر بسرعتها الخاصة.

ملاحظة: تعطى علاقة انتشار الحركة الاهتزازية الجيبية بالعلاقة:

$$x(t) = A_0 + A_1 cos\omega t + A_2 cos2\omega t + \cdots . + A_n cosn\omega t$$

تعطى سرعة المجموعة (سرعة انتشار موجة سعتها ممثلة بالشكل السابق) بالعلاقة:

$$(10) v_g = \frac{\omega_2 - \omega_1}{k_2 - k_1} = \frac{d\omega}{dk}$$

نعلم أن $\omega = kv$ وبالتالي يكون:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

$$(11) \rightarrow \quad v_g = v + k\frac{dv}{dk}$$

تسمى v_g سرعة المجموعة بينما تدعى v بسرعة الطور.

نلاحظ أنه إذا كانت سرعة الطور v مستقلة عن طول الموجة ($\frac{dv}{dk} = 0$) فإن $v_g = v$, أما إذا كانت سرعة الطور v متعلقة بطول الموجة فإن سرعة الإشارة هي سرعة المجموعة نفسها.

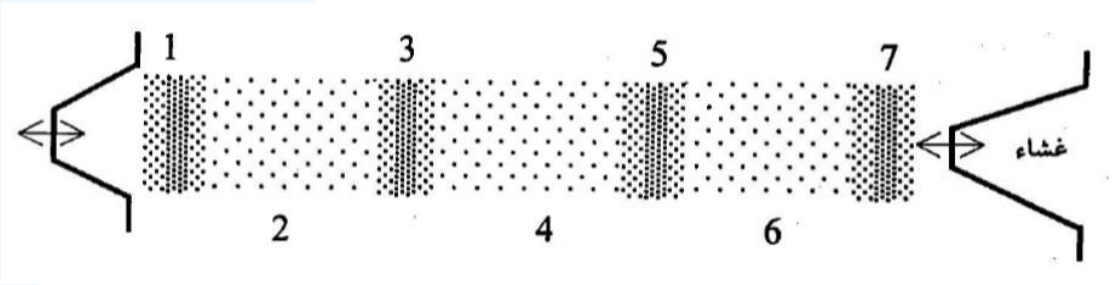
7- الأمواج الصوتية sound

الصوت هو اضطراب تضاغطي (سلسلة من الضغوط والتخلخلات) ينتقل في المادة بحيث يؤدي إلى حركة طبلة الأذن وبالتالي الإحساس بالسمع. وهو عبارة عن حركة اهتزازية موجية تنتشر في الهواء الذي تلامسه الأذن بشكل مباشر.

تتكون الأمواج الصوتية في الهواء من تضاغطات وتخلخلات وبالتالي هي عبارة عن أمواج طولية. لا يشعر الإنسان بالصوت الا بوجود وسط مادي تستطيع الأمواج الصوتية الانتشار فيه بين مصدر الصوت وأذن الإنسان, كما لايمكت للصوت الانتقال في الفراغ. كما أن ترددات الأمواج الصوتية المسموعة يقع في المجال (20-20000 Hz).

7-1- انتشار الأمواج الصوتية في الهواء

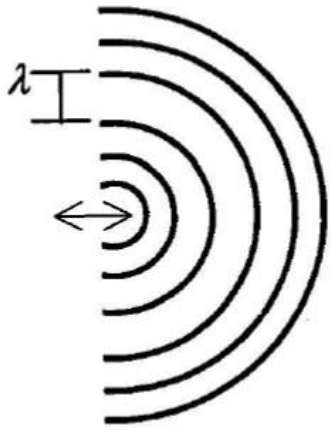
يستخدم مكبر الصوت لإصدار الأصوات البسيطة والذي يتكون من لوح مخروطي الشكل مصنوع من مادة مرنة يمكنه أن يهتز ذهاباً وإياباً تحت تأثير القوة الحافذة المهتزة F المؤثرة على مركزه (الشكل 7).



الشكل (7): مبدأ عمل مكبر الصوت

أثناء تحرك الغشـاء نحو اليمين يضـغط الهواء الملاصـق له وبالتالي تنطلق موجة تضـاغطية في الهواء, وفي لحظة تالية يتحرك الغشـاء إلى اليسـار تاركاًوراءه منطقة من الهواء ذات ضـغط منخفض, وهو ما يسـمى بالتخلخل الذي ينطلق من مكبر الصـوت وينتشـر في الهواء. بتكرار هذه العملية تنطلق من المكبر سـلسـلة من الأمواج التضـاغطية التي تتكون من مناطق ذات ضـغط مرتفع (تضـاغطات) (الشـكل 18 مبينة بالأرقام 1,3,5,7) ومناطق ذات ضـغط منخفض (تخلخلات) (الأرقام 2,4,6).

بشـكل عام فإن الأمواج الصـوتية التي تصـدر من مصـدر صـوتي تنتشـر في كافة الإتجاهات على شـكل أمواج طولية وفق كرات في الهواء (الشكل 8).



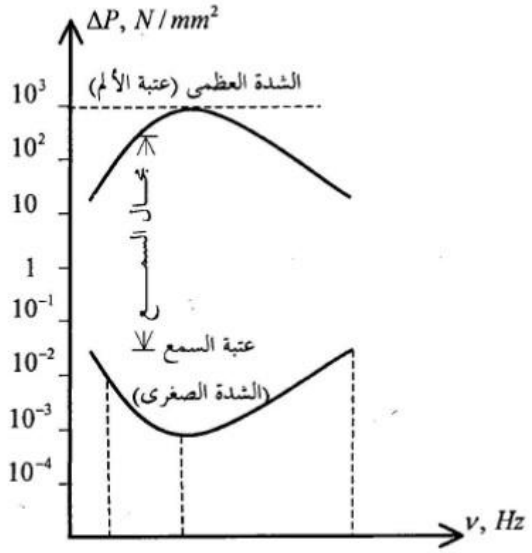
الشكل (8): تغير ضغط الهواء في الأمواج الصوتية

وبالتالي تهتز جزيئات الهواء في الطبقات الهوائية المجاورة لطبلة الأذن. ويعبرعن هذا الاهتزاز بدلالة تغير ضـغط الهواء بجوار الأذن, حيث يزيد الضغط الآني P عن الضغط الجوي P_a أو ينقص عنه بمقدار ΔP, أي أن:

$$P = P_a \pm \Delta P$$

2-7- شدة وجهارة الصوت sound intensity

نعلم أن الجسم المهتز الذي يرسل الموجة على وتر يبعث الطاقة مع هذه الموجة. وكذلك جميع الأمواج تحمل الطاقة معها خلال انتشارها بما فيها الأمواج الصوتية. ولهذا تختلف حساسية الأذن باختلاف تواتر المنبع الصوتي, حيث لا يسمع الصوت ذي التواتر المنخفض الشدة ولا الصوت ذي التواتر المرتفع الشدة والذي يسبب الألم. هذا يعني أنه توجد عتبة للسمع (شدة صغرى) وعتبة ألم (شدة عظمى) وفيما بين هاتين العتبتين يمكن سماع الصوت. يبين الشكل (9) عتبة السمع بين الشدة العظمى والشدة الصغرى.



الشكل (9): مجال السمع للأذن البشرية

يعبر عن استجابة الأذن للأصوات بمقياس الديسبل وهو مبني على قوى (بمعنى رتبة العدد) الرقم 10, كما هو مبين بالجدول رقم 2.

الجدول 2: العلاقة بين $\frac{W}{m^2}$ والديسبل dB.

شدة الصوت $\frac{W}{m^2}$	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	.....	1	10
ستوى شدة الصوت dB	0	10	20	110	.....	120	130

نلاحظ أن الصفر في مقياس الديسبل ($10^{-12}\ \frac{W}{m^2}$) هو الحد الأدنى للصوت المسموع تقريباً من الأذن المتوسطة, حيث يرتفع مستوى شدة الصوت بالديسبل بمقدار 10 وحدات كلما ارتفعت شدة الصوت 10 أضعاف. وقد تبين بأن الأذن تتأثر بالأصوات وفقاً لمقياس الديسبل الذي يعبر عنه رياضياً بالعلاقة التالية:

$$(12) dL = k\frac{dI}{I} \quad \rightarrow \quad L = k(ln\frac{I}{I_0})$$

حيث k ثابت ياخذ القيمة 10 في حال اللوغاريتم العشري.

عندما تكون واحدة قوة الصوت بالديسبل تصبح العلاقة السابقة بالشكل:

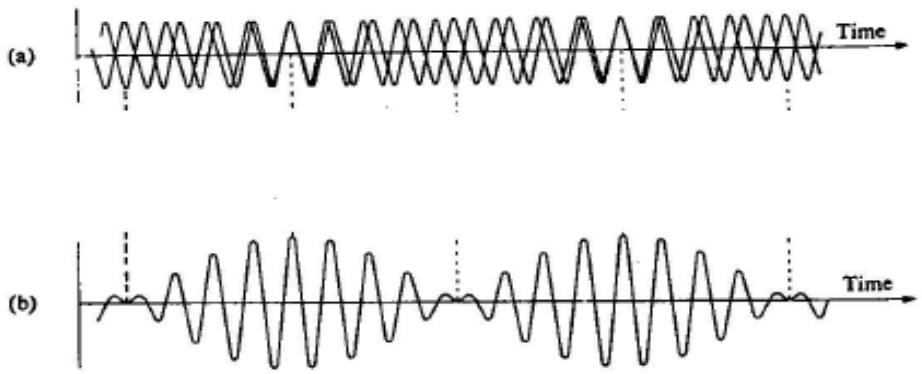
$$(13) dB = 10log\frac{I}{I_0}$$

حيث أن شدة الصوت مقدرة بواحدة $\frac{W}{m^2}$.

3-7- الرنين الصوتي (التجاوب) acoustic resonance

سندرس الآن التداخل الذي يحدث عند انتشار قطارين موجيين لهما نفس السعة ويختلفان قليلاً في التواتر, بحيث أن جميع الأمواج تمر بآن معاً من النقطة نفسها. يتم ذلك باستعمال رنانتين تولدان صوتين تواترهما قريب من بعضهما البعض.

لنعتبر نقطة من الفراغ تمر فيها الموجتان بنفس الوقت (الشكل 10,a). فإذا اعتبرنا أن طول محور الزمن الكلي ثانية واحدة فإن المنحنيين التواتريين $\upsilon = 8\ Hz$ و $\upsilon = 9.5\ Hz$. ولإيجاد الاهتزاز المحصل نطبق مبدأ التداخل المبين في الشكل (10,b), حيث نلاحظ تغير سعة الاهتزاز مع الزمن. وتلك التغيرات في السعة تؤدي إلى تغيرات في الشدة التي يطلق عليها اسم التجاورب (الرنين).



الشكل (10): انتشار قطارين موجيين لهما نفس السعة ويختلفان قليلاً في التواتر

يمكن دراســـة ظاهرة التجاوب رياضـــياً كالتالي: نعبّر عن الانتقالين الناتجين عن الموجتين المارتين في نقطة الفراغ كما يلي:

$$(14) y_1 = A sin(\omega_1 t)$$

$$(15) y_2 = A sin(\omega_2 t)$$

ووفق مبدأ التراكب تكون محصلة الانتقالين:

$$(16) y = y_1 + y_2 = A[sin(\omega_1 t + sin(\omega_2 t]$$

وبالاعتماد على العلاقة الرياضـــية التالية: $sina + sinb = 2sin\frac{a+b}{2}cos\frac{a-b}{2}$ يمكننا كتابة العلاقة رقم 16 بالشكل التالي:

$$(17) y = 2A\left[\cos\left(\frac{\omega_1-\omega_2}{2}\right)tsin\left(\frac{\omega_1+\omega_2}{2}\right)t\right]$$

وبما أن $\omega = 2\pi\upsilon$ فإن:

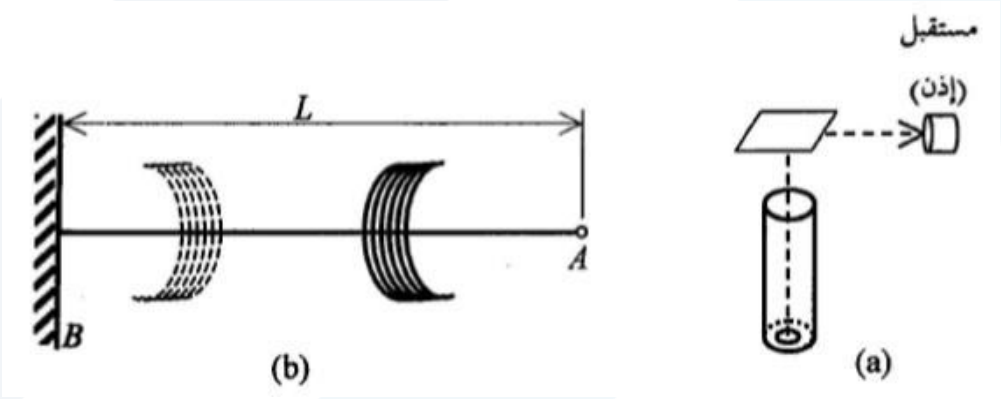
$$(18) y = \left[2A\cos 2\pi\left(\frac{\upsilon_1-\upsilon_2}{2}\right)t\right]\sin 2\pi\left(\frac{\upsilon_1+\upsilon_2}{2}\right)t$$

حيث يمكن اعتبار $\upsilon = \frac{\upsilon_1+\upsilon_2}{2}$ تواتر الموجة الناتجة, أي متوســـط تواتري النغمتين, بينما تعطى ســـعتها بالمقدار المحصـور بين القوسـين المربعين. وبناءً عليه تتغير السـعة بتغير الزمن بتواتر قدره $\frac{\upsilon_1-\upsilon_2}{2}$. فإذا

كان التواتران υ_1 و υ_2 قريبين من بعضهما يكون الفرق بينهما صغير جداً وبالتالي فإن تغير السعة يكون بطيئاً جداً ويكون الصـــوت في هذه الحالة ضـــعيفاً. وبالعكس عندما يكون الفرق في الســـعة كبيراً يكون الصوت شديداً.

4-7- انعكاس reflection وامتصاص الصوت absorption

اذا وضـعنا منبع صـوتي على قاعدة اسـطوانة زجاجية نلاحظ أنه في نقطة ما بالقرب من الاسـطوانة لا يسمع صوت المنبع. نضع فوق الاطوانة صفيحة مصقولة كما هو مبين بالشكل (11,a).



الشكل (11): انعكاس الصوت

نلاحظ أنه يمكن سـماع المنبع الصـوتي بعد وضـع الصـفيحة, وإذا حركنا الصـفيحة وغيرنا زاوية ميلها وموقع الأذن نجد أنه يمكن التأكد من أن زاوية الورود تســاوي زاوية الانعكاس. ولكن إذا كان الســطح العاكس عمودياً على اتجاه انتشـار الأمواج الصـوتية فإنها تنعكس على المسـار نفسـه وتعود إلى مصـدر الصوت وهذا ما يسمى بالصدى. وبالاعتماد على ظاهرة الصدى يمكن إيجاد المسافة بين مصدر الصوت والسطح العاكس. فإذا فرضـنا أن المسـافة بين مصـدر الصـوت A والسطح العاكس B تسـاوي L وكانت المدة الزمنية بين لحظة انطلاق الصـوت من A وعودتها إلى نفس النقطة هي t, وسـرعة انتشـار الصـوت في الهواء هي v فيمكننا كتابة العلاقة التالية:

$$(19) 2L = vt \quad \rightarrow \quad L = \frac{vt}{2}$$

وفي الأمكنة المغلقة تحدث انعكاسات متعددة ومتكررة للصوت عن الجدران مما يؤدي إلى استمرار الصوت بعد توقف المصدر عن إصداره, وهذا ما يسمى بالارتداد.

لا ينعكس الصوت عند الحد الفاصل بين وسطين فقط, وانما يمتص خلال نفوذه للوسط الثاني. وأثناء ذلك تتحول طاقة الأمواج الصوتية جزئياً إلى طاقة حركية مشوشة لجزيئات الوسط. ويمتص الجدار العادي 8% من طاقة الأمواج الصوتية, في حين أن المفروشات تمتص 20% من تلك الطاقة. وهذا ما يفسر سبب انخفاض الصوت في الحجرات المفروشة وارتفاعه في غير المفروشة.

7-5- الأمواج فوق الصوتية ultrasound واستخدامها في التكنولوجيا

الامواج فوق الصوتية هي الأمواج الميكانيكية التي تردد اهتزازها يقع ضمن المجال $(2 \times 10^4 - 10^{13})$. ويقال عن الأمواج فوق الصوتية التي ترددها يتجاوز $10^{13} Hz$ أنها أمواج وراء صوتية, وهذا التردد هو الحد الاعلى في الغازات ضمن الشروط العادية. بينما يناظره الحد الأعلى لترددات الأمواج فوق الصوتية $(10^{12} - 10^{13})$ في البلورات والسوائل.

إن الطاقة التي تنقلها الأمواج فوق الصوتية تتناسب مع كل من كثافة الوسط ومربع التردد, وبالتالي فإن الطاقة التي تنقلها الأمواج فوق الصوتية أكبر بكثير من تلك التي تنقلها الأمواج الصوتية. ولتوليد الأمواج فوق الصوتية تستخدم مشعات ميكانيكية أو ميكانيكية-كهربائية. وتنقسم المشعات الميكانيكية-الكهربائية إلى نوعين: الأولية المغناطيسية والبيزوكهربائية, حيث تستخدم الأولى لتوليد الأمواج المنخفضة التردد والثانية لتوليد الأمواج فوق الصوتية التي ترددها يقارب $50 \times 10^6 Hz$.

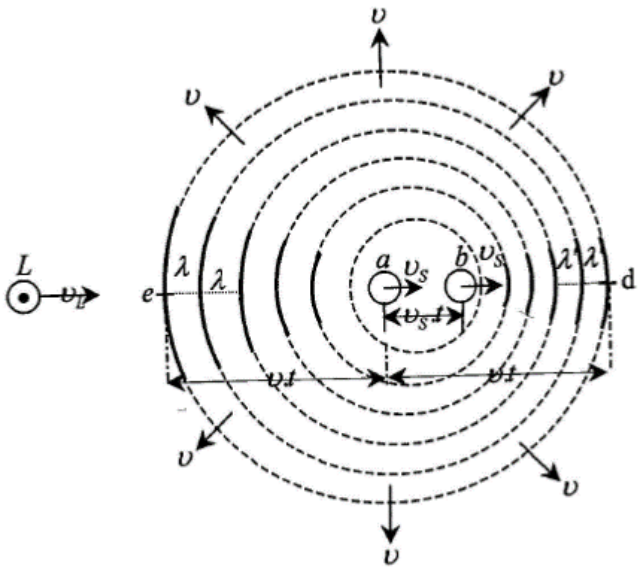
يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية في التكنولوجيا على نطاق واسع. فمثلاً, جهاز الأمواج فوق الصوتية المعروف باسم ايكو ساوندر (*Echo-sounder*) وهو جهاز يستخدم لتحديد عمق البحار وتزود به السفن لهذه الغاية. وهو مجهز بمصدر ومستقبل للأمواج فوق الصوتية بتردد معين, وبمعرفة المدة الزمنية الفاصلة بين لحظة إصدار الإشارات واستقبالها وكذلك سرعة انتشارها في الماء يمكن تحديد عمق الماء. كما تستخدم الأمواج فوق الصوتية في مجال الهندسة لأغراض التحكم والقياس (أجهزة كشف العيوب وقياس سماكة جدران الأنابيب ...الخ). ومن الجدير ذكره بأن بعض الحيوانات كالخفاش لها أعضاء تعمل بمدأ الرادار فوق السمعيمما يمكنه من معرفة طريقه في الظلام, وكذلك الدلفين الذي يملك رادار فوق سمعي مثالي.

6-7- ظاهرة دوبلر doppler effect

نفرض وجود مراقب على طريق عام وسيارة تتحرك مقتربةً من بعيد وطلقة بوقها, فإن المراقب يشعر بأن درجة صوت البوق تستمر ثابتة حتى تصبح السيارة بمحاذاة المراقب ثم يتناقص فجأة ويستمر على المستوى الجديد. تسمى هذه الظاهرة ظاهرة دوبلر. تستخدم ظاهرة دوبلر في تقدير سرعة الأجسام المتحركة مثل الطائرات, الصواريخ, الاقمار الصناعية, النجوم والكواكب ... الخ.

سندرس في هذه الفقرة فقط الحالة التي تكون فيها سرعتي المراقب والمنبع محمولتان على الخط الواصل بينهما. نفرض أن v_L سرعة المراقب و v_S سرعة المنبع, ونعتبر v سرعة انتشار الأمواج الصوتية التي هي موجبة دوماً.

يبين الشكل (12)المراقب L واقفاً على يسار المنبع الصوتي S. وهكذا ووفقاً لما افترضناه فإن الاتجاه الموجب يكون من اليسار إلى اليمين. وبالتالي السرعتان v_L و v_S موجبتين.



الشكل (12): سطوح الموجة الصادرة عن منبع متحرك

ليكن موقع المنبع الصوتي في النقطة a في اللحظة $t = 0$ وفي النقطة b في اللحظة t. تمثل الدائرة الخارجية سطح الموجة التي أصدرها المنبع في اللحظة $t = 0$. وهذا السطح في الفراغ عبارة عن كرة

مركزها a (موقع المنبع في اللحظة $t = 0$) وهو ينتشر في الاتجاهات كافة بسرعة الصوت v. ويكون نصف قطر الكرة مساوياً vtوالمسافة تساوي $ab = v_s t$. وبالتالي:

$$eb = (v + v_s)t \quad , \quad bd = (v - v_s)t$$

ويكون عدد الأمواج التي يصدرها المنبع الصوتي خلال اللحظة الزمنية t مساوياً:

$$(20) N = \upsilon_s t$$

حيث υ_s تواتر المنبع. وتتجمع الأمواج المنتشـــرة أمام المنبع في المجال bd, بينما تتباعد خلفه وتتجمع ضمن المجال eb ويكون طول الموجة أمام المنبع مساوياً:

$$(21) \lambda' = \frac{bd}{N} = \frac{(v-v_s)t}{\upsilon_s t} = \frac{(v-v_s)}{\upsilon_s}$$

بينما يعطى طول الموجة خلف المنبع بالعلاقة:

$$(22) \lambda = \frac{eb}{N} = \frac{(v+v_s)t}{\upsilon_s t} = \frac{(v+v_s)}{\upsilon_s}$$

وبما أن الراصد يقع خلف المنبع الصوتي فإن سرعة الموجة التي تتحرك نحو الراصد L يضاف إليها السرعة التي يتحرك بها هذا الراصد أي $v + v_L$ ويكون التواتر المسموع من قبله هو:

$$(23) \upsilon = \frac{v+v_L}{\lambda} = \frac{v+v_L}{v+v_s}$$

أو:

$$(24) \frac{\upsilon}{v+v_L} = \frac{\upsilon_s}{v+v_s}$$

تعين العلاقة الأخيرة رقم 24 التواتر υ الذي يسمعه الراصد بدلالة تواتر المنبع الصوتي υ_s. وإذا كان الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج الصوتية يتحرك بسرعة v_m بشكل موازٍ للخط الذي يصل الراصد بالمنبع تأخذ العلاقة الأخيرة الشكل التالي:

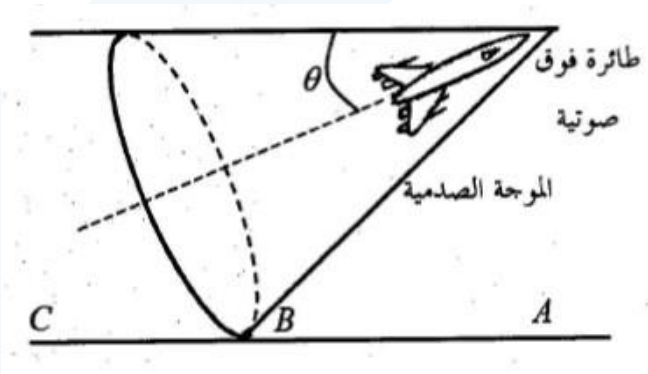
$$(25) \upsilon = \frac{v+v_L-v_m}{v+v_s-v_m} . \upsilon_s$$

7-7- الأمواج الصدمية ودوي اختراق جدار الصوت sonic boom

تردد الصـــوت المســـموع يكون أكبر من التردد الحقيقي إذا كان المصـــدر الصـــوتي يتحرك مقترباً من المراقب. وتحدث ظاهرة غريبة بعض الشيء عندما تقترب سرعة المصدر الصوتي من سرعة الصوت أو تصـبح مسـاوية لها حيث سـنجد أن تردد الصـوت سـيقترب من اللانهاية. وهذا يعني ببسـاطة أن عدداً لانهائياً من القمم الموجية سوف يصل إلى السامع في وقت قصير جداً.

لنفرض أن سـرعة السـيارة تسـاوي سـرعة الصـوت في هذه الحالة سـوف تنطبق النقطة b على النقطة d (الشـكل 13) وبالنتيجة سـوف تقع جميع القمم الموجية الواقعة بين d و b فوق بعضـها البعض. وعيه فإن كل طاقة الموجة الصـوتية سوف تنضـغط في منطقة صـغيرة جداً أمام المصـدر الصـوتي. وبالتالي, سوف تسـبب هذه المنطقة المكثفة جداً بالطاقة الصـوتية أو بالموجة الصـدمية صـوتاً عالياً جداً عند مرورها باي نقطة, وهذا هو اساس مصدر دوي اختراق جدار الصوت الذي يصاحب الطائرات فوق الصوتية.

عندما تطير طائرة في الهواء بسرعة قريبة من سرعة الصوت تتراكم الضوضاء والاضطرابات الهوائية الناتجة عن حركة الطائرة مكونة الموجة الصدمية. الموجة الصدمية هي ببساطة منطقة مكثفة جداً بالطاقة الصـدمية. ويعتمد الشكل الحقيقي للموجو الصـدمية على سرعة الطائرة. وتغطي الموجة الصـدمية عموماً سطح مخروط (الشكل 13).



الشكل (13): اختراق جدار الصوت

وتعتمد زاوية المخروط θ (زاوية ماخ) على النســبة بين ســرعة الطائرة v_p وســرعة الصــوت v وفقاً للعلاقة التالية:

$$(26) sin\theta = \frac{v}{v_p}$$

واضـح من هذه العلاقة أن زاوية المخروط تقل عندما تصـبح سـرعة الطائرة اكبر من سـرعة الصـوت.

وتسمى عادة النسبة $\frac{v}{v_p}$ عدد ماخ. وعليه إذا كانت سرعة الطائرة 2 mach, فهذا يعني أنها تتحرك بسرعة تساوي ضعف سرعة الصوت.