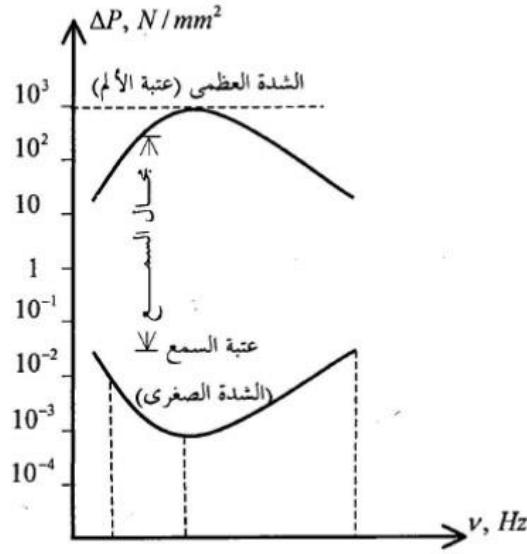


2-7- شدة وجهاز الصوت sound intensity

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.

$\frac{W}{m^2}$ شدة الصوت	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:

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

حيث k ثابت يأخذ القيمة 10 في حال اللوغاريتم العشري.

عندما تكون واحدة قوة الصوت بالديسبل تصبح العلاقة السابقة بالشكل:



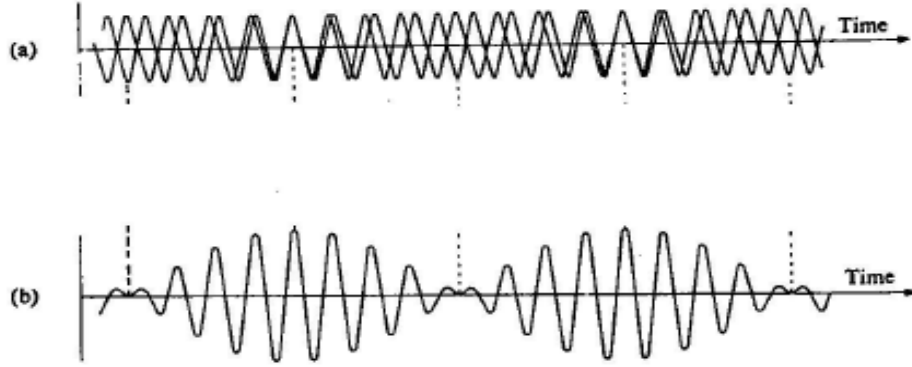
$$(13)dB = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

حيث أن شدة الصوت مقدره بوحدة $\frac{W}{m^2}$.

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 بأن 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 $v = 8 \text{ Hz}$ و $v = 9.5 \text{ Hz}$. 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 التجاوب (الرنين).



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

يمكن دراسة ظاهرة التجاوب رياضياً كالتالي: نعبر 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 الرياضية التالية: $\sin a + \sin b = 2 \sin \frac{a+b}{2} \cos \frac{a-b}{2}$ يمكننا كتابة

العلاقة رقم 16 بالشكل التالي:

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

وبما أن $\omega = 2\pi\nu$ فإن:

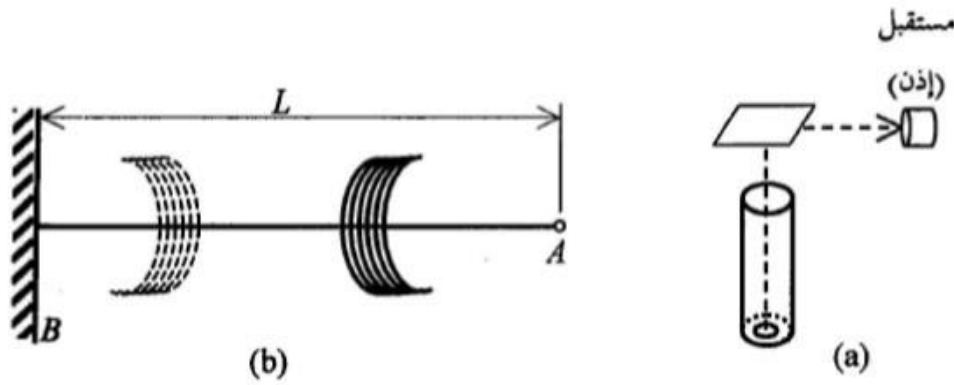
$$(18) y = \left[2A \cos 2\pi \left(\frac{\nu_1 - \nu_2}{2} t \right) \right] \sin 2\pi \left(\frac{\nu_1 + \nu_2}{2} t \right)$$

حيث يمكن اعتبار $\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$ تواتر الموجة الناتجة، أي متوسط تواتري النغمتين، بينما تعطى سعتها بالمقدار المحصور بين القوسين المربعين. وبناءً عليه تتغير السعة بتغير الزمن بتواتر

قدره $\frac{v_1 - v_2}{2}$. فإذا كان التواتران v_1 و v_2 قريبين من بعضهما يكون الفرق بينهما صغير جداً وبالتالي فإن تغير السعة يكون بطيئاً جداً ويكون الصوت في هذه الحالة ضعيفاً. وبالعكس عندما يكون الفرق في السعة كبيراً يكون الصوت شديداً.

4-7- انعكاس reflection وامتصاص الصوت absorption

إذا وضعنا منبع صوتي على قاعدة اسطوانة زجاجية نلاحظ أنه في نقطة ما بالقرب من الاسطوانة لا يسمع صوت المنبع. نضع فوق الاسطوانة صفيحة مصقولة كما هو مبين بالشكل (11,a).



الشكل (11): انعكاس الصوت

نلاحظ أنه يمكن سماع المنبع الصوتي بعد وضع الصفيحة, وإذا حركنا الصفيحة وغيرنا زاوية ميلها وموقع الأذن نجد أنه يمكن التأكد من أن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس. ولكن إذا كان السطح العاكس عمودياً على اتجاه انتشار الأمواج الصوتية فإنها تنعكس على المسار نفسه وتعود إلى مصدر الصوت وهذا ما يسمى بالصدى. وبالاعتماد على ظاهرة الصدى يمكن إيجاد المسافة بين مصدر الصوت والسطح العاكس. فإذا فرضنا أن المسافة بين مصدر الصوت A والسطح العاكس B تساوي L وكانت المدة الزمنية بين لحظة انطلاق الصوت من A وعودتها إلى نفس النقطة هي t, وسرعة انتشار الصوت في الهواء هي v فيمكننا كتابة العلاقة التالية:

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

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، وإنما 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.

5-7- الأمواج فوق الصوتية ultrasound واستخدامها في التكنولوجيا

الأمواج فوق الصوتية هي الأمواج الميكانيكية التي تردد اهتزازها يقع ضمن المجال $(10^{13} - 2 \times 10^4)$. ويقال عن الأمواج فوق الصوتية التي ترددها يتجاوز 10^{13} Hz أنها أمواج وراء صوتية، وهذا التردد هو الحد الأعلى في الغازات ضمن الشروط العادية. بينما يناظره الحد الأعلى لترددات الأمواج فوق الصوتية $(10^{13} - 10^{12})$ 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: الأولى المغناطيسية والبيزوكهربائية، حيث تستخدم الأولى لتوليد الأمواج المنخفضة التردد والثانية لتوليد الأمواج فوق الصوتية التي ترددها يقارب $50 \times 10^6 \text{ Hz}$.

يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية في التكنولوجيا على نطاق واسع. فمثلاً، جهاز الأمواج فوق الصوتية المعروف باسم إيكو 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

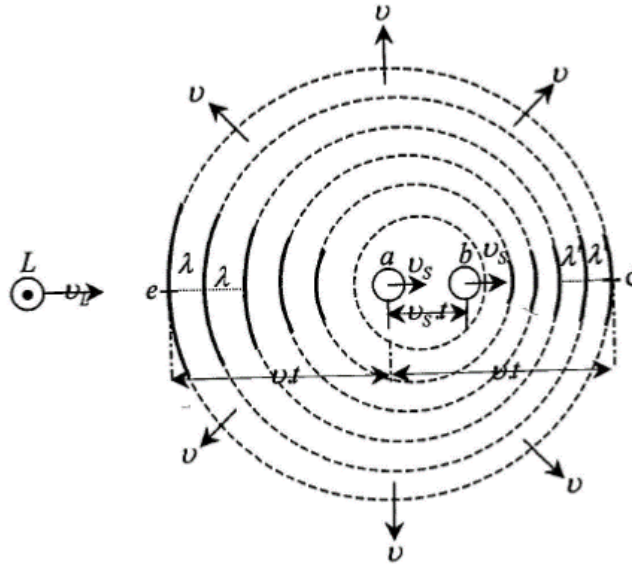
انتشارها في الماء يمكن تحديد عمق الماء. كما تستخدم الأمواج فوق الصوتية في مجال الهندسة لأغراض التحكم والقياس (أجهزة كشف العيوب وقياس سماكة جدران الأنابيب ... الخ). ومن الجدير ذكره بأن بعض الحيوانات كالخفاش لها أعضاء تعمل بمبدأ الرادار فوق السمع مما يمكنه من معرفة طريقه في الظلام, وكذلك الدلفين الذي يملك 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, الأقمار الصناعية, النجوم والكواكب ... الخ.

سندرس في هذه الفقرة فقط الحالة التي تكون فيها سرعتي المراقب والمنبع محمولتان على الخط الواصل بينهما. نفرض أن سرعة المراقب v_L وسرعة المنبع v_S , 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_S و v_L موجبتين.



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 vt والمسافة 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:

$$(20) N = v_s t$$

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

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

بينما يعطى طول الموجة خلف المنبع بالعلاقة:

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

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:

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

أو:

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

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

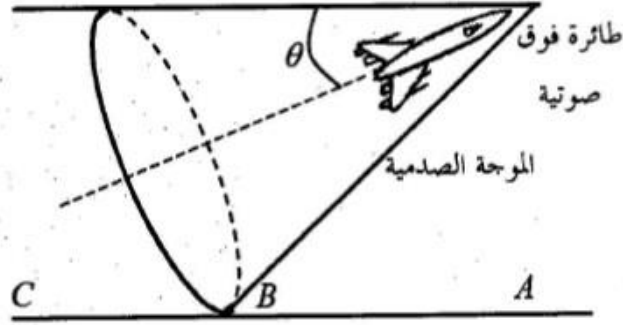
$$(25) v = \frac{v+v_L-v_m}{v+v_s-v_m} \cdot v_s$$

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

تردد الصوت المسموع يكون أكبر من التردد الحقيقي إذا كان المصدر الصوتي يتحرك مقترباً من المراقب. وتحدث ظاهرة غريبة بعض الشيء عندما تقترب سرعة المصدر الصوتي من سرعة الصوت أو تصبح مساوية لها حيث سنجد أن تردد الصوت سيقترّب من اللانهاية. وهذا يعني ببساطة أن عدداً لانهايةً من القمم الموجية سوف يصل إلى السامع في وقت قصير جداً.

لنفرض أن سرعة السيارة تساوي سرعة الصوت في هذه الحالة سوف تنطبق النقطة b على النقطة d (الشكل 13) وبالنتيجة سوف تقع جميع القمم الموجية الواقعة بين d و b فوق بعضها البعض. وعيه فإن كل طاقة الموجة الصوتية سوف تنصغط في منطقة صغيرة جداً أمام المصدر الصوتي. وبالتالي، سوف تسبب هذه المنطقة المكثفة جداً بالطاقة الصوتية أو بالموجة الصدمية صوتاً عالياً جداً عند مرورها باي نقطة، وهذا هو أساس 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 الصدمية. ويعتمد الشكل الحقيقي للموجو الصدمية على سرعة الطائرة. وتغطي الموجة الصدمية عموماً سطح مخروط (الشكل 13).



الشكل (13): اختراق جدار الصوت

وتعتمد زاوية المخروط θ (زاوية ماخ) على النسبة بين سرعة الطائرة v_p وسرعة الصوت v وفقاً للعلاقة التالية:



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

واضح من هذه العلاقة أن زاوية المخروط تقل عندما تصبح سرعة الطائرة اكبر من سرعة الصوت. 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.