

الهيدروجين	1300
الماء	1440
ماء البحر	1560
الحديد والفولاذ	≈ 5000
الزجاج	≈ 4500
الألمنيوم	≈ 5100
لب الخشب الثقيل	≈ 4000

ومن أجل إنسان ذي سمع طبيعي نجد خاصيتين للصوت ألا وهما سوية الشدة (الجهارة) والإرتفاع. وهاتان الخاصتان تصفان الشعور الناشئ في وعي السامع. غير أنه كل خاصة من هذه الخواص تطابق قيمة يمكن قياسها بالطرائق الفيزيائية.

فالجهارة (سوية الشدة) مرتبطة مع شدة الموجة الصوتية وسندرسها لاحقاً بينما ارتفاع الصوت يمثل كون هذا الصوت مرتفعاً كما في الكمان أو الفيوليونت ومنخفضاً كصوت طبل كبيراً أو أوتار جبهة. إن القيمة الفيزيائية التي تصف ارتفاع الصوت هي تواتر اهتزاز الأمواج الصوتية وإن هذا ما لاحظته أولاً العالم غاليليو. فكلما انخفض التواتر كلما تناقص ارتفاع الصوت وكلما ازداد التواتر كان الصوت أكثر ارتفاعاً. تستقبل الأذن تواترات في المجال من 20 حتى 20000 هرتز، والمسماة بالمجال المسموع. ومن المعروف أنه من الممكن ملاحظة بعض الحيود عن هذا المجال (المجال المسموع) فالطبيعة العامة أن المسنون يبدؤون بالسمع السيء للتواترات العالية والحد الأعلى عندهم ينخفض حتى 10000 هرتز وحتى أخفض من ذلك.

إن الأمواج الصوتية التي تواتراتها تقع خارج المجال المسموع يمكن أن تصل إلى آذاننا ولكن لا نسمعها. وتسمى الأمواج الصوتية ذات التواترات التي تزيد عن 20000 هرتز بالأمواج فوق الصوتية. (يجب عدم الخلط بينها وبين السرعة الأعلى من سرعة الصوت والتي تصف الجسم المتحرك بسرعة أعلى من سرعة الصوت). إن كثير من الحيوانات يمكنها سماع التواترات فوق الصوتية فعلى سبيل المثال تستطيع الكلاب سماع أصوات ذات ارتفاع حتى 50000Hz أما

الخفافيش فتسمع حتى 100000Hz وتستخدم الأمواج فوق الصوتية بصورة واسعة في الطب وفي الكثير من المجالات العلمية والتقنية.

إن الأمواج الصوتية التي تواتراتها تقع تحت المجال المسموع أي (أقل من 20 هرتز) تسمى الأمواج تحت الصوتية. إن منابع الأمواج تحت الصوتية هي الهزات الأرضية وصدّات الرعد وانفجارات البراكين وكذلك الأمواج الناشئة عند اهتزاز مكثبات ثقيلة مع تجهيزات أخرى. إن المنبع الأخير يمكن أن يكون خطيراً على العاملين لأن تأثير الأمواج تحت الصوتية مع أنها غير مسموعة لها تأثيرات سيئة على الأعضاء البشرية. إن هذه الأمواج ذات التواترات المنخفضة تسمى ظاهرة الرنين المصاحبة للحركة والاهتزاز داخل الأعضاء البشرية.

1-3-2- الوصف الرياضي للأمواج الطولانية (الصوتية):

بيننا في الفصل السابق أن الموجة الجيبية وحيدة البعد والمنتشرة على طول المحور x يمكن وصفها بالعلاقة :

$$D = D_M \sin(\dots)$$

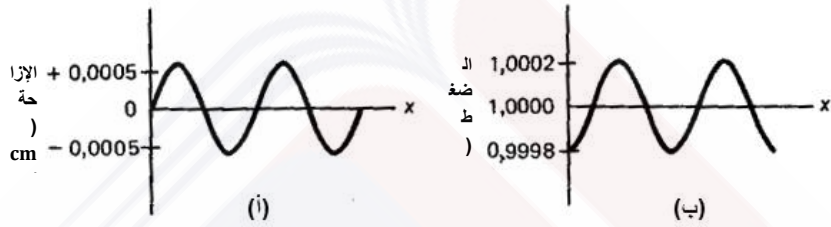
وفي هذه العلاقة العدد الموجي k يرتبط بطول الموجة λ بالعلاقة :

$$k =$$

حيث f التواتر، و D الإزاحة في النقطة x في اللحظة الزمنية t ، و D_M القيمة العظمى لهذه الإزاحة (السعة). إن الإزاحة D للموجة العرضية، كما في الموجة في الوتر تكون عمودية على اتجاه انتشار الموجة على طول المحور x . غير أن إزاحة الموجة الطولية متجهة على طول محور انتشار الموجة وهذا يعني أن D موازية لـ x وتمثل إزاحة جزيئات دقيقة من حجم المادة بالنسبة لوضع توازنها.

إن الأمواج الطولانية (الصوتية) يمكن أيضاً دراستها من وجهة نظر تغير الضغط وليس الحجم. في الحقيقة تسمى الأمواج الطولية بالأمواج الانضغاطية حيث أن تغير الضغط عادة يقاس بصورة أسهل من الإزاحة كما نرى من الشكل (1-2-29) وفي منطقة انضغاط الأمواج (حيث تقع الجزيئات قريبة من بعضها بعضاً) يكون الضغط أكبر من الضغط الطبيعي، عندئذ في

منطقة التخلخل سيكون أقل من الضغط الطبيعي. إن التمثيل البياني للأمواج الصوتية في الهواء من وجهة نظر الإزاحة ممثلة على الشكل (1-3-1أ) ومن وجهة نظر الضغط ممثلة على الشكل (1-3-1ب).



الشكل (1-3-1) التمثيل البياني للأمواج الصوتية أ- من خلال الإزاحة. ب- من خلال الضغط.

نلاحظ أن موجة الإزاحة تختلف من حيث الطور عن موجات الضغط بمقدار ربع موجة (أو 90°). وفي المنطقة حيث يصبح الضغط أعظماً أو أصغرياً يكون الإنزياح صفراً. وعندما تغير الضغط يساوي الصفر تكون الإزاحة عظمى أو صغرى. ولنحاول إيجاد تفسير هذه التبادلية :

لنحصل الآن على علاقة تغير الضغط في الأمواج المتقدمة الطولانية. يعطى معامل الانضغاط لكل الاتجاهات B بدلالة تغير الحجم والضغط بالعلاقة :

حيث : $\Delta V/V$ التغير النسبي لحجم الوسط والمؤدي إلى تغير الضغط ΔP . ومن أجل السهولة نفرض p انحراف الضغط عن الضغط الطبيعي P بغياب أي موجة صوتية أي نفترض $p = \Delta P$ على هذه الصورة يكون :

إن الإشارة السالبة هنا تعكس حقيقة أنه بزيادة الضغط يتناقص الحجم ($\Delta V < 0$).

لندرس الآن طبقة من السائل أو الغاز والتي من خلالها تعبر موجة طولانية. فإذا كانت سماكة الطبقة Δx ومساحتها A . فإن حجمها يساوي $V = A\Delta x$. ونتيجة لتغير الضغط في الماء فإن هذا الحجم يتغير بقيمة $\Delta V = A\Delta D$. حيث ΔD تغير سماكة الطبقة نتيجة لانضغاطها أو انفراجها. (على سبيل المثال إن D هي عبارة عن انزياح جزيئات الوسط).

على هذه الصورة يكون لدينا :

ومن أجل الدقة العالية لنجعل الحد $\Delta x \rightarrow 0$, عندئذ يمكن إعادة كتابة العلاقة الأخيرة على الشكل التالي :

$$p = -B(\zeta)$$

حيث استعملنا التفاضل الجزئي , وبما أن D هي عبارة عن تابع لـ x ولـ t . إذا كانت الإزاحة جيبية, نعين المعادلة (1-3-1) من المعادلة (1-3-2) فنحصل :

$$p = -(BD_M k)\zeta$$

على هذه الصورة فالضغط مثل الإزاحة يتغير جيبياً ولكن يختلف عن الإزاحة بالطور بمقدار 90° , أو بربع طول موجة الشكل (1-3-1). إن القيمة $BD_M k$ تسمى السعة الانضغاطية p_M فهي تبين القيمة العظمى والصغرى التي يصلها الضغط عند الانزياح عن قيمة الضغط العادي للوسط المحيط. وبما أن سرعة الموجة تعطى بالعلاقة $v = \sqrt{B/\rho}$, فإن السعة الانضغاطية يمكن كتابتها على الشكل التالي :

$$p_M = BD_M k = \rho v^2$$

و

$$p = -p_M \zeta$$

1-3-3- شدة الصوت:

إن سوية الشدة مثل ارتفاع الصوت مرتبط بالإحساس الناشئ في وعي الإنسان. وهي مرتبطة أيضاً مع قيمة فيزيائية مقاسة وبالضبط مع شدة الموجة. وتعرف الشدة بالطاقة التي تحملها الموجة في وحدة الزمن خلال وحدة المساحة. وكما شاهدنا في الفصل السابق فهي تتناسب طردياً مع مربع سعة الموجة. إن آذان الإنسان قادرة على استقبال أصوات بشدة حتى 10^{-12}w/m^2 (حد السمع) وإلى 1w/m^2 (كما يسمى حد الإحساس المؤلم). يستطيع الإنسان سماع شدات صوتية أعلى غير أنه وعند ذلك سيشعر بالألم. إنه مجال واسع من الشدة، قيمته الحدية تتباين بـ 10^{12} مرة. كما هو واضح أن القيمة التي نستقبلها كجهازة (سوية الشدة) لا تتناسب طردياً مع الشدة.

في الحقيقة كلما ازدادت الشدة كلما كان الصوت أكثر جهازة (ارتفاعاً). غير أنه من أجل صوت مضاعف الجهازة يتطلب موجة صوتية شدتها تزيد عن شدة الموجة الأولية بعشرة مرات. إن هذه النتيجة صحيحة كتقريب أولي عند أية سوية من الجهازة. فعلى سبيل المثال يستقبل الإنسان وسطياً موجة صوتية شدتها 10^{-9}w/m^2 والتي تطن بمرتين أعلى من موجة شدتها 10^{-10}w/m^2 . إن الموجة التي شدتها 10^{-2}w/m^2 تطن بمرتين أشد من الموجة التي شدتها 10^{-4}w/m^2 . وبأربع مرات أشد من موجة شدتها 10^{-4}w/m^2 . نتيجة لذلك فالعلاقة بين الشعور الذاتي للجهازة والقيمة الفيزيائية المقاسة لسوية شدة الصوت فإن شدة الصوت تعين عادة باستخدام التدرجات اللوغارتمية. إن وحدة قياس هذه التدرجات هي BI (البل) أو الديسبل (dB) والذي يساوي عُشر البل ($1 \text{dB} = 0,1 \text{BI}$).

ومن أجل تعيين سوية الشدة الصوتية β تحسب من خلال شدة الصوت I على الصورة التالية :

$$\beta(\text{dB}) = 1$$

حيث : I_0 الشدة البدائية، أما اللوغارتم فيؤخذ اللوغارتم العشري. وعادة تؤخذ I_0 كقيمة عتبة السمع وبالضبط شدة أخفض الأصوات والتي يقدر على سماعها رجل ذي سمع متوسط، حيث $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{w/m}^2$.

حيث تكون سوية شدة الصوت الذي شدته $I_0 = 1,0 \times 10^{-10} \text{w/m}^2$ تساوي :

$$\beta = 101$$

وبما أن $\lg 100 = 2,0$, نلاحظ أن عند حد السمع تكون سوية الشدة مساوية 0dB أي أن :

$$\beta = 10$$

حيث أن $\lg 1 = 0$.

ومن هنا نلاحظ أنه عند زيادة الشدة بـ 10 مرات فإن سوية الشدة تزداد بـ 20dB. على هذه الصورة فصوت سوية شدته 50dB يكون أشد بـ 100 مرة من صوت سوية شدته 30dB وهكذا....

وفي الجدول (1-3-2) أعطيت الشدة وسوية الشدة من أجل بعض الأصوات التي نصادفها غالباً.

الجدول (1-3-2) شدة الصوت من منابع مختلفة

منبع الصوت	سوية الشدة dB	الشدة w/m ²
طائرة نفاثة (على بعد 30m منها)	140	100

أي منبع صوتي عند عتبة الشعور بالألم	120	1
موسيقا الورك في غرفة مغلقة	120	1
صفارة (على بعد 30m منها)	100	1×10^{-2}
الضجيج في حافلة تسير بسرعة 100km/h	75	$3,2 \times 10^{-5}$
حركة شارع مزدحمة	70	1×10^{-5}
الكلام العادي (على مسافة 50cm منها)	65	$3,2 \times 10^{-6}$
الراديو (غير عالي)	40	1×10^{-8}
الهمس أو الوشوشة	20	1×10^{-10}
ضجيج ورق الشجر	10	1×10^{-11}
أي منبع صوتي عند عتبة السمع	0	1×10^{-12}

مثال (1-3-1):

مكبر صوت ذي نوعية عالية مخصص لإعادة انتاج سوية شدة صوتية عظمى بتواتر من 30 حتى 18000 هرتز (إن سوية الشدة يجب ألا تختلف عن الصفر أكثر من 3dB) ما هي نسبة تغير شدة الصوت عند التغير الأعظمي لسوية الشدة 3dB؟

الحل :

لنرمز للشدة الوسطى بـ I_1 , أما قيمة سوية الشدة الوسطى بـ β_1 . عند ذلك الشدة العظمى I_2 تطابق سوية شدة $\beta_2 = \beta_1 + 3dB$ على هذه الصورة :

$$\beta_2 - \beta_1 = 3dB = 10 \lg$$

وبما أن : $\lg a - \lg b = \lg (a/b)$ عندئذ يكون : $\lg(I_2/I_1) = 0,30$ وباستخدام الحاسبة نحسب 10^x عندما $x = 0,30$ وباستخدام جداول اللوغرتمات نجد قيم اللوغرتم الموافق لـ

0,30 إن هذا الرقم يساوي 2,0 على هذه الصورة $I_2/I_1 = 2,0$ أي أن شدة I_2 أكبر بمرتين من I_1 .

ينتج ملاحظة أن تغير سوية الشدة ب 3dB (والمطابقة لما كنا قد شهدناه ضعف الشدة) يؤدي فقط إلى تغير غير كبير في الاستقبالية الذاتية لسوية الشدة (أي السمع).

نستنتج مما سبق أن أذن رجل متوسط تميز مستوى الشدة المساوي فقط ل 1dB. وكما شهدنا في الفصل السابق فإن الشدة I تتناسب طردياً مع مربع السعة. وحقيقة فالعلاقة (7-15) تسمح بالربط الكمي بين السعة والشدة I أو مع سوية الشدة β . وهذا ما هو مبين في المثال التالي.

مثال (1-3-2) :

(أ) - أحسب الإزاحة العظمى لجزيئات الهواء من أجل صوت عند عتبة السمع حيث تواتر الصوت 1000 هرتز.

(ب) - عين التغير الأعظمي للضغط في هذه الموجة الصوتية.

الحل :

(أ) - باستخدام العلاقة (7-15) ونحسب D_M :

$$D_M = \frac{1}{3,14(1,0 \times$$

هنا وضعنا قيمة كثافة الهواء والمساوية $1,29 \text{ kg/m}^3$, وكذلك في الهواء عند درجة الحرارة

0°C والمساوية 331 m/s وبإجراء الحساب نجد أن: $D_M = 1,0 \times 10^{-11} \text{ m}$

$$p_M =$$

أو

تبين نتائج هذا المثال مقدار حساسية أذن الإنسان. فتستطيع النقاط إزاحة جزيئات الهواء والتي لا تزيد عن أبعاد الذرة (حوالي $10^{-10}m$)! باستخدام العلاقتين (7-15) و (4-3-1) يمكن كتابة الشدة من خلال سعة الضغط p_M :

$$I = 2\pi^2\rho vI$$

على هذه الصورة فإن السعة المكتوبة من خلال سعة الضغط لا تتعلق بالتواتر. باستخدام أجهزة قياس تغير الضغط يمكن المقارنة مباشرة شدات الصوت ذات تواترات مختلفة.

{لا يمكننا اجراء هذا باستخدام أجهزة تقيس الإزاحة بـ cm أي حسب العلاقة (7-15)}.

وعادة عند الابتعاد عن المنبع فإن سوية الشدة أو شدة الصوت تتناقص. وفي الغرف المغلقة فإن هذه الظاهرة ستتخامد نتيجة لانعكاس الصوت عن الجدار. بينما إذا وجد المنبع الصوتي في الهواء الطلق , بحيث أن الصوت يمكنه الانتشار وبصورة حرة في كل الاتجاهات فإن الشدة تتناقص متناسبة عكساً مع مربع المسافة :

وهذا ما كنا بيناه في الفصل السابق (أنظر المعادلة (8-15)). عند وجود انعكاسات عن الأبنية أو عن سطح الأرض سيكون انتشار الصوت أكثر تعقيداً.

مثال (1-3-3) :

إذا كانت سوية الشدة الصوتية الآتية من طائرة نفاثة على مسافة 30m منها تساوي 140dB. ما هو مستوى الشدة على مسافة 300m منها؟ (يهمل الانعكاس عن الأرض).

الحل :

لنحسب الشدة I على مسافة 30m عن الطائرة بالعلاقة (1-3-6) :

140

وبإعادة ترتيب هذه المعادلة نجد :

وعلى مسافة 300m عن الطائرة (أبعد بعشرة مرات) ستساوي الشدة في $(10/1)^2 = 100/1$ مرة أقل من الشدة الأولى. أي ستساوي $1w/m^2$.

وبالتالي فإن سوية الشدة :

$\beta = 1$

حتى على مسافة 300m فإن الصوت سيؤدي للشعور بالألم في الأذنان، ولذلك فإن العاملين في المطارات يرتدون واقيات صوت كي لا يتأثرون بهذه الأصوات.

1-3-4- منابع الصوت - اهتزاز الأوتار والأعمدة الهوائية :

إن منبع أي صوت هو عبارة عن جسم مهتز. وعملياً إن أي جسم يمكن أن يهتز وبالتالي يعتبر منبعاً صوتياً. لندرس الآن بعض المنابع الصوتية البسيطة وبالتفصيل الأدوات الموسيقية. ففي الأدوات الموسيقية ينقل المنبع الصوتي إلى حالة اهتزاز وذلك بضرب الوتر وجعل الأوتار تتقارب أو نفخ الهواء في الأجهزة الموسيقية. عند ذلك ينشأ أمواج مستقرة ويهتز الجسم بتواتره المرئاني الخاص (التجاوبي). وفي الطبله يهتز الغشاء المشدود عليها والمصنوع عادة من الجلد. وفي المكيسلافونوالميتاليفون يوجد صفائح خشبية أو معدنية والتي يمكنها أن تحدث اهتزازاً. وفي الأجراس، والنواقيس لها استخدامات في اهتزازات الأجزاء المعدنية. والأدوات الأكثر انتشاراً هي الأوتار المهتزة. ونذكر منها الكمنجةوالغيتار والعودوالبيانولا تقل عنها انتشاراً الأدوات التي ينشأ فيها اهتزاز عمود الهواء وعلى سبيل المثال المزماروالبوق والأرغن.

وفي الفصل السابق الشكل (1-2-48) بيّنا كيفية نشوء الأمواج المستقرة وهذا هو أساس كل الأدوات الوترية. يتعين ارتفاع الصوت عادة بالأقل مرنانية (تجاوبية) بالتواتر الأساسي الذي يوافق وجود عقد فقط في نهايات الأوتار. إن طول موجة اهتزاز التواتر الأساسي (النغمة الأساسية) تساوي ضعف طول الوتر. وبالتالي فالتواتر الأساسي يساوي:

حيث: v سرعة انتشار الموجة في الوتر. وعندما يلمس الموسيقار بأصابعه الأوتار، لنقل على الغيتار أو الكمان فإنه يقلص طول الوتر الفعال، لذلك ينشأ صوت أعلى، حيث أن طول موجة الاهتزاز الأساسي يصبح أقصراً. إن كل الأوتار في الغيتار أو الكمان لها نفس الطول. وتعطي أصواتاً بإرتفاع نغمات مختلفة وهذا يعود لاختلاف كتلتها في واحدة الطول μ . (كثافة خطية) والتي تؤثر في السرعة $v = \sqrt{F_T/\mu}$. (إن شد الأوتار سيكون مختلفاً، وإن تغير الشد يؤثر على الأداة الموسيقية). على هذه الصورة فإن سرعة انتشار الأمواج ستكون أقل في وتر أكثر كتلة وبالتالي عند نفس طول الموجة فالتواتر الموافق سيكون أقل. وفي البيانو والأدوات ذات المفاتيح الأخرى فإن كل وتر يختلف بالطول عن الأوتار الأخرى. ومن أجل إخراج نوتة منخفضة يجب أن يكون الوتر ليس ثقيلًا فحسب وإنما أطول ولنفس ذلك بالمثال التالي:

مثال (1-3-4) :

تمتلك النوتة الأعلى في البيانو صوتاً تواتره يزيد بـ 150 مرة عن تواتر صوت النوتة الأكثر إنخفاضاً. وإذا كان طول الأوتار اللازمة لعزف النوتة الأعلى 5,0cm. ولنفرض أن الوتر اللازم لعزف النوتة الأكثر إنخفاضاً يمتلك نفس الكتلة في واحدة الطول ومشدود بنفس الشد. أحسب طول هذا الوتر؟

الحل :

إن سرعة انتشار الاهتزازات الصوتية في كل وتر من الأوتار ستكون متساوية ولذلك فالتواتر يتناسب عكساً مع طول الوتر L :