محاضرات

فى

"فيزياء الصوت والحركة الموجية"

لطلاب المرحلة الأولى الجامعية

الأقسام العلمية

إعداد الدكتور

بدرى النوبى محمد

٢٠٢٢-٢٠٢٣م

المحتـــــــــوى

رقم الصفحة	الباب الأول: الحركة الموجية
٤-٦	**مقدمة**
٦-١٠	انواع الموجات
١٠-١٢	معادلة انتشار الموجة
١٣-١٤	المعادلة التفاضلية للحركة الموجية
١٥	**الباب الثانى : الظواهر الصوتية**
١٥-	الخواص العامة للصوت
١٥-٢٨	**ظواهر الآنعكاس والآنكسار والتداخل والحيود في الصوت**
٢٨-٢٩	**ظاهرة الضربات في الصوت**
٢٩-٣٣	**ظاهرة الرنين والموجات الموقوفة في الصوت**
٣٣-٣٥	**ظاهرة دوبلر**
٣٦	**الباب الثالث : انتقال الموجات الصوتية**
٣٧-٤٤	العوامل المؤثرة على انتقال موجات الصوت
٤٤-	سرعة الصوت في الأوساط المختلفة
٤٥-	تصنيف الموجات الصوتية من حيث التردد
٤٩-٥١	عوامل اختلاف الأصوات أو النغمات:

الباب الأول
الحركة الموجية

الفصل الأول (الحركة الموجية)

- مقدمة

يرتبط الصوت بأحد الحواس الخمسة التي انعم الله عز وجل بها علينا وهي حاسة السمع. **ويعرف بأنه** أي إحساس يمكن لأذن الإنسان أن تستقبله . أما التعريف الحديث للصوت فهو طريقة تمرير الطاقة من خلال الهواء وأي وسط مرن آخر على شكل موجات تضاغطية حيث أن الطاقة تتحول باستمرار و بسرعة من شكل إلى آخر وبشكل عام من الطاقة الحركية إلى الطاقة الوضعية. ومن منظور علم الأحياء فالصوت هو إشارة تحتوي على نغمة أو عدة نغمات تصدر من الكائن الحي الذي يملك العضو الباعث للصوت، تستعمل كوسيلة اتصال بينه وبين كائن آخر من جنسه أو من جنس آخر، يعبر من خلالها عما يريد قوله أو فعله بوعي أو بغير وعي مسبق، ويسمى الأحساس الذي تسببه تلك الذبذبات بحاسة السمع. اذن هو ظاهرة فيزيائية تثير حاسة السمع ويختلف معدل السمع بين الكائنات الحية.

ويجب الإشارة الى مفهوم الصوت كعنصر أساسي يجب دراسته عند التصميم الداخلي للفراغات المعمارية أين كانت وخصوصا الفراغات التي يكون الصوت عامل أساسي فيها كالمسارح وقاعات المؤتمرات وقاعات الاستماع. لذا تقع على عاتق المهندس المعماري المسئولية في تصميم مثل هذه القاعات مما يستدعي الإلمام بمبادئ الدراسات الصوتية المتمثلة في سلوك الصوت في الفراغات المغلقة ومن خلال هذه المعرفة يمكن اختيار شكل القاعة والتصميم الداخلي الأكثر ملاءمة لنوع النشاطات المطلوب تخصيص المبنى فيها ، لذا يجب دراسة سلوك الصوت في الأماكن المغلقة و معرفة الأساليب المعمارية للتحكم في مستوى الصوت بالإضافة إلى دراسة الأداء الصوتي في المسارح وقاعات الإستماع والمؤتمرات.

٢-الحركة الموجية (الاهتزازية) :

هل لاحظت ما يحدث على سطح الماء عندما ترمي حجرا في بركة ماء؟ . تشاهد اضطرابا على شكل دوائر يكون مركزها موضع سقوط الحجر ، وينتشر الاضطراب إلى أن يصل إلى جوانب البركة. والحركة التي يصنعها الجسم المهتز على جانبي موضع سكونه أو اتزانه الأصلي مثال المصادر المهتزة (اهتزاز وتر – اهتزاز فرعي شوكة رنانة – بندول بسيط مهتز – ملف زنبركي مهتز – غشاء طبلة مهتز – اهتزاز حبل – اهتزاز سطح الماء).

ينتقل الصوت في شكل موجات صوتية عندما يتحرك خلال الهواء او اي وسط آخر من جسم مهتز. ففي حالة حركة الجسم المهتز الى الخارج يحدث ضغط على الوسط المحيط به فتنتج منطقة ضغط وعندما يتحرك الجسم بعد ذلك للداخل يتمدد الوسط في الحيز الذي كان يشغله الجسم وتمسى منطقة التمدد هذه تخلخلا ، وباستمرار تحرك الجسم الى الداخل والخارج تنتقل سلسلة من الضغوط والتخلخلات بعيدا عنه وتتكون الموجات الصوتية من هذه الضغوط والتخلخلات .

- والموجة هى الاضطراب الذي ينتقل في اتجاه معين وبسرعة معينة ولا يستلزم ذلك انتقال جزيئات الوسط الذي تسري فيه الموجة ، بل إن الجزيئات تتحرك حركة اهتزازية دورية حول مواضع اتزانها ، أي تتحرك حركة توافقية بسيطة يمكن تمثيلها بيانيا بالمنحنى الجيبي كما بالشكل التالى .

-**وهل هى مادة** ؟ لا تعتبر الموجة مادة، ولكنها تسري خلال المادة دون أن يصحب ذلك انتقال المادة ، وتحمل الموجة الطاقة من مكان إلى آخر،تنتقل الطاقة من مكان لآخر بواسطة تحريك نقاط الوسط المتموج رغم أن جزيئات الوسط نفسه لا تنتقل من مكان إلى آخر في اتجاه انتشار الحركة الموجية.

فالموجة الصوتية هي موجة طولية وحركة الموجة تنتشر للخارج من مركز الاضطراب فإن جزيئات الهواء المفردة التي تحمل الصوت تتحرك جيئة وذهابا بنفس اتجاه حركة الموجة ومن ثم فان الموجة الصوتية عبارة عن سلسة من التضاغطات والتخلخلات المتناوبة في الهواء.

<u>ويحدد سرعة سريان الموجه في الوسط :</u>

١- مرونة الوسط (قوة الإرجاع التي تحاول أن ترجع الجسم إلى موضع اتزانه).

٢- القصور الذاتي (استجابة هذا الجزء المزاح عن موضع اتزانه).

<u>اشكال الموجات الصوتية ينقسم الى:</u>

ا- خطية : وهى الموجة التي تنتشر في بعد واحد مثل الموجات الناشئة على حبل مشدود.

ب- سطحية : وهى الموجة التي تنتشر في بعدين مثل الموجات المنتشرة على سطح الماء.وهى تنتشر على شكل أسطح متوازية تهتز جميع النقاط الموجودة على السطح بنفس الكيفية في السعة والطور.

ج-كروية : وهذه الموجات تنتشر في الفراغ وتكون في جميع الجهات والأبعاد الثلاثة (x, y, z) منها موجات الضوء، والصوت، والإذاعة المسموعة والمرئية، ويكون صدر الموجة على شكل كرات مركزها هو مصدر الموجة.

٤-تعريفات هامة

١- **الموجة:** هي اضطراب لحظي ينتقل في الوسط المحيط بمصدر الاضطراب في اتجاه معين وبسرعة معينة ويقوم بنقل الطاقة في اتجاه انتشاره.

٢ - **الحركة الموجية:** هي الاضطراب أو الحركة التي تحدث في الوسط عندما يتحرك كل جزء من أجزائه حركة اهتزازية تسري بالتتابع من نقطة إلى أخرى فتتولد الحركة الموجية. وتسمى الحركة الاهتزازية بالحركة التوافقية البسيطة.

٣- **الحركة الاهتزازية** : هى الحركة التى يحدثها الجسم المهتز على جانبى موضع سكونه بحيث تتكرر حركته على فترات زمنية متساوية .

٤- **سعة الاهتزازة** : أقصى إزاحة يصنعها الجسم المهتز بعيداً عن موضع سكونه .

٥- **الاهتزازة الكاملة :** هى الحركة التى سصنعها الجسم المهتز عندما يمر بنقطة ما فى مسار حركته مرتين متتاليتين فى اتجاه واحد .

٦- **الزمن الدورى** : الزمن اللازم لعمل اهتزازه كاملة .

٧-التردد : عدد الاهتزازات الكاملة التى يصنعها الجسم المهتز فى الثانية الواحدة . أو هو عدد الأمواج التي تمر بنقطة معينة في مسار الحركة الموجية في الثانية الواحدة

٨-**سعة الإهتزازة :**هى القيمة المطلقة لأعلى إزاحة تحدثها الموجة، ويمكن تخيلها بأعلى ارتفاع تصله موجة تنتقل في حبل، أو أعلى فرق ضغط يحدثه صوت ما في الهواء (بإهمال تضائل شدة الصوت مع المسافة). أو هي المسافة بين نقطتين في مسار حركة الجسم تكون سرعته في إحداهما أقصاها وفي الأخرى منعدمة.

٥- **أنواع الموجات الصوتية** : تنقسم الموجات الى قسمين :

١-الموجات الميكانيكية :

هي الموجات التي تنشأ عن مصدر مهتز مثل الشوكة الرنانة أو الوتر المهتز ، وهي تحتاج إلى وسط مادي في اتجاه عمودى أو لانتقالها حيث تهتز جزيئات الوسط بنفس تردد المصدر المهتز وتقوم بنقل الطاقة إما فى نفس إتجاه انتشار الموجة ، ولا يمكنها الانتشار في الفراغ مثل موجات الضوء. وتسمى موجات مادية مثل : حزمة من الإلكترونات ،أو حزمة من الأيونات.

وتنقسم الى قسمين :

أ - **الموجات المستعرضة :** مثل : الموجات التي تنتشر على سطح الماء أو مثال التى على حبل مثبت من طرف واحد بينما يندفع طرفه الآخر إلى أعلى ثم إلى أسفل في حركة تذبذبية كما في شكل (1a). في هذه الحالة ينتقل الاضطراب خلال الحبل بينما تتذبذب جسيمات الحبل في حركة توافقية بسيطة في اتجاه عمودي على اتجاه انتشار الاضطراب.

•**تعريفها :** هي الموجة التي تهتز فيها جزيئات الوسط حول مواضع اتزانها في اتجاه عمودي على اتجاه انتشار الموجة.

•**مكوناتها** : تتكون من سلسلة من القمم و القيعان

•**طولها الموجي** : يساوي المسافة الفاصلة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين.

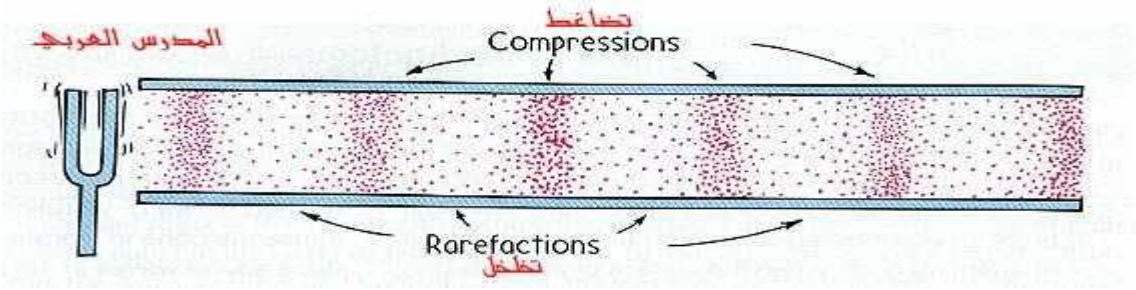
ب - **الموجات الطولية :** وفيها تتذبذب جزيئات المادة في اتجاه انتشار الموجة. مثل تذبذب حلقات الحلزون في اتجاه حركة الموجة (شكل 1b)، والموجة الصوتية التي تنتج من تضاغط وتخلخل جزيئات الوسط الذي تنتشر فيه شكل (1c).

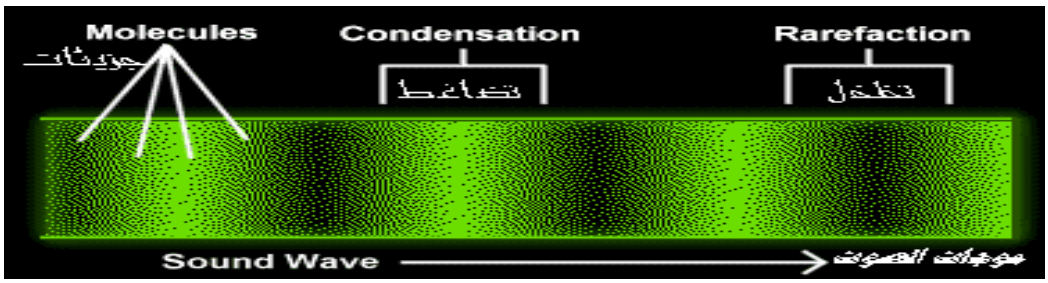
•**تعريفها :** هي الموجة التي تهتز فيها جزيئات الوسط حول مواضع اتزانها في اتجاه مواز لإتجاه انتشار الموجة

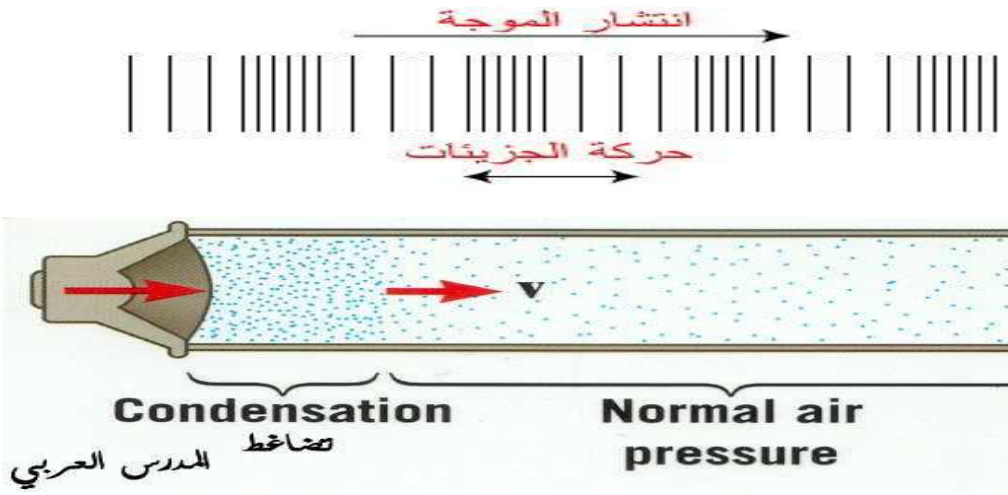
•**مكوناتها :**تتكون من سلسلة من التضاغطات و التخلخلات.

•**طولها الموجي :** يساوي المسافة الفاصلة بين مركزي تضاغطين متتالين

أو بين تخلخلين متتالين



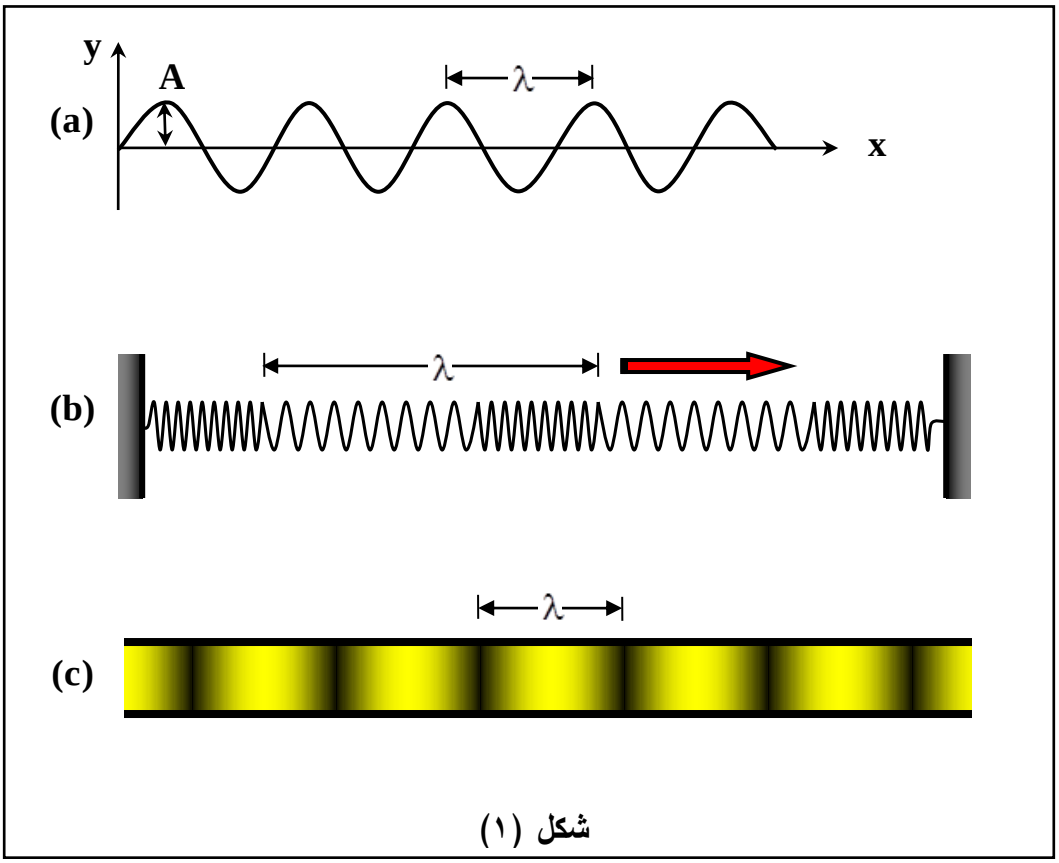




***ماهى شروط الحصول على الموجات الميكانيكية**

– وجود مصدر مهتز أو متذبذب . ٢ – حدوث نوع من الاضطراب ينتقل من المصدر إلى الوسط المادي.

٣ – وجود الوسط المادي المرن الذي يحمل هذا الاهتزاز . ٤ - وجود قوى متبادلة بين جزيئات الوسط، تؤدي إلى انتقال الحركة من جزيء لآخر، وإلى انتشار الحركة على شكل موجة.

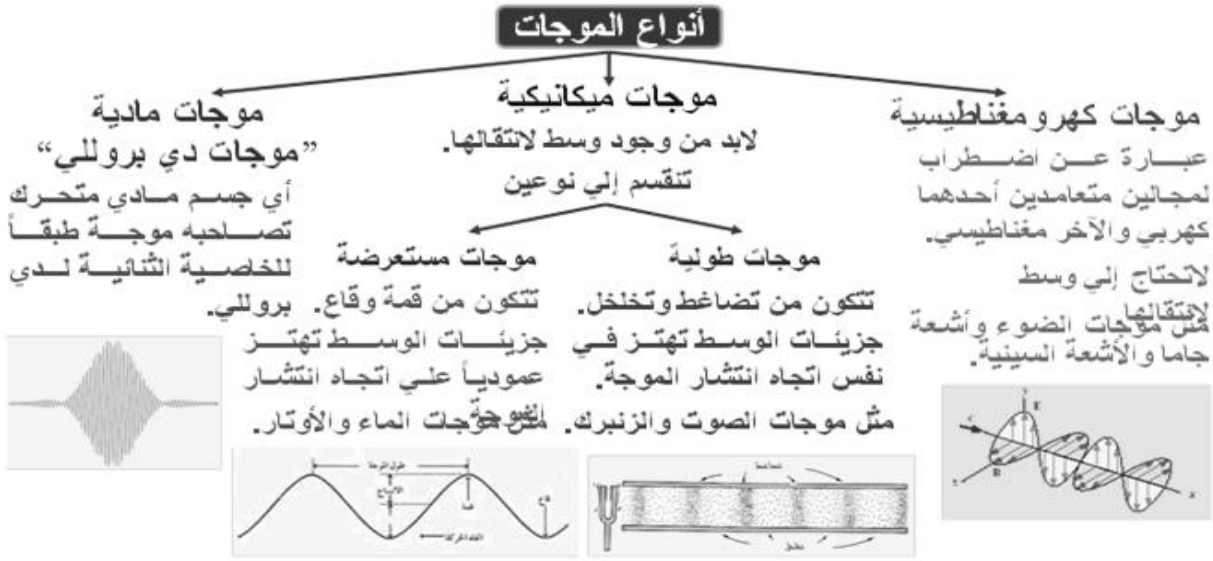


شكل (١)

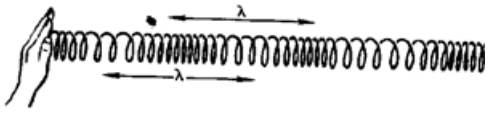
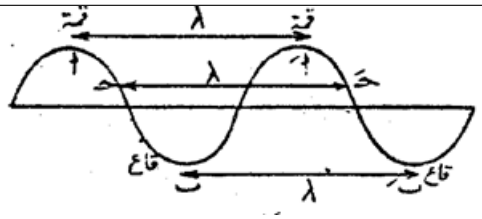
٢-الموجات الكهرومغناطيسية

هي موجات تنشأ نتيجة لاهتزاز مجالات كهربية ومجالات مغناطيسية متعامدة على بعضها وتنتشر في اتجاه واحد. وهي لا تحتاج لوسط مادي لانتشارها بل يمكنها الانتشار في الفراغ بسرعة ثابتة قدرها ٣ × ١٠ ^{٨} م/ث مثل موجات الضوء ، الأشعة السينية ، **إشعة أكس** ، ..... **الخ.**

ويمكن تقسيم الموجات إلي ثلاثة أقسام، وهي:



لمقارنة بين الأمواج الميكانيكية والأمواج الكهرومغناطيسية		
وجه المقارنة	**الأمواج الميكانيكية**	**الأمواج الكهرومغناطيسية**
التعريف	هى اضطراب يحتاج لوسط مادى لنقلها وإنتشارها ولا يمكنها الانتشار فى الفراغ	هى اضطراب تنتشر فى الفراغ ولا تحتاج لوجود وسط مادى لإنتشارها
الوصف	قد تكون أمواج طولية أومستعرضة	جميعها أمواج مستعرضة فقط
نشأتها	تنشأ من إهتزاز جزيئات الوسط إما عموديا أو فى نفس إتجاه انتشارها	تنشأ من اهتزاز مجالات كهربية ومجالات مغناطيسية تنشأ عموديا على إتجاه انتشارها
السرعة	سرعتها أقل بكثير من الموجات الكهرومغناطيسية تساوى ٣٣٠م/ث	لها قدرة عاليه على الانتشار فى الفراغ بسرعة تساوى ٣ × ١٠^{٨} م/ ث
الأمثلة	الأمواج المائية ، موجات الصوث، الموجات المنتشرة فى وتر	أمواج الضوء ، أمواج الراديو ، موجات اللاسلكى، موجات الأشعة تحت الحمراء.

المقارنة بين الأمواج الطولية والأمواج المستعرضة		
وجه المقارنة	**الأمواج الطولية**	**الأمواج المستعرضة**
اتجاه اهتزاز دقائق الوسط	تهتز فيها دقائق الوسط فى نفس اتجاه انتشار الموجه	تهتز فيها دقائق الوسط عمودياً على اتجاه انتشار الموجه
التكوين	تتكون من تضاغطات وتخلخلات	تتكون من قمم وقيعان
الطول الموجى	المسافة بين مركزى تضاغطين متتالين أو مركزى تخلخلين متتالين	المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتالين
أمثلة	أمواج الصوت	أمواج الضوء وأمواج الماء
الرسم		

• معادلة انتشار الموجات الصوتية

بإعتبار نبضة أو نغمة صوتية صادرة من آلة وترية تنتشر ناحية اليمين

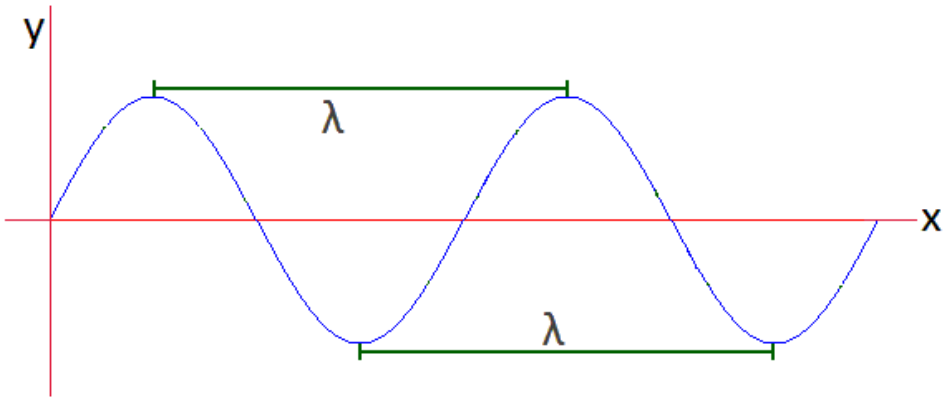
- عندما تتحرك النبضة الى اليمين تصبح معادلة الإزاحة :

$$Y(x, t) = f(x - v t) \quad \rightarrow \quad (1)$$

- وعندما تتحرك النبضة الى الي اليسار :

$$Y(x, t) = f(x + v t) \rightarrow \quad (2)$$

هذه الدالة الموجية $Y(x, t)$ تمثل احداثى y لأى عنصر موجود على بعد x عند الزمن t . ونظرا لأن هذه الموجات لها شكل دالتى الجيب وجيب التمام ، لذا سميت بأسم الدالة الموجية.



الشكل يتضح أن :

$$\lambda = V\,T \quad , \quad \rightarrow V = \lambda / T \quad \rightarrow V = \lambda f \quad \rightarrow (3)$$

حيث λ الطول الموجى ، T الزمن الدورى ، V سرعة الموجة

حالات خاصة على معادلة الموجة

١-نفرض أن الدالة الموجية فى الشكل السابق عند (t = 0) على الصورة :

$$Y(x, 0) = A \sin ax \quad \rightarrow (4)$$

2-نفرض أن الدالة الموجية فى الشكل السابق عند (x = 0, t =0) على الصورة :

$$Y(0, 0) = A \sin a(0) = 0 \quad \rightarrow (5)$$

3-نفرض أن الدالة الموجية فى الشكل السابق عند ($x = \lambda/2$, t =0) على الصورة :

$$Y(\lambda/2, 0) = A \sin a(\lambda/2) = 0 \quad \rightarrow (6)$$

وحيث أن سعة الإهتزازة (A) لا تساوى الصفر، إذن لكى $\sin a(\lambda/2) = 0$ هذا يتطلب أن $a(\lambda/2) = \pi$

ومنها $a = 2\pi / \lambda$ بالتعويض فى معادلة الموجة (4)نحصل على

$$Y(x, 0) = A \sin a(2\pi / \lambda) \quad \rightarrow (7)$$

وعندما تتحرك الموجة الى اليمين بسرعة V خلال فترة زمنية t فإن :

$$Y(x, t) = A \sin [2\pi / \lambda(v\,t - x)] \rightarrow (8) \text{ or}$$

$$Y(x, t) = A \sin 2\pi (v\,t/\lambda - x/\lambda) \text{ or}$$

$$Y(x, t) = A \sin 2\pi (t/T - x/\lambda) \text{ or}$$

$$Y(x, t) = A \sin (2\pi\,t/T - 2\pi\,x/\lambda) \text{ or}$$

ويعرف المقدار $2\pi / \lambda$ بالعدد الموجى K ، $2\pi / T$ بالتردد الزاوى ω اذن تكب معادلة الموجة على الصورة :

$$Y(x, t) = A \sin (kx - \omega t) \quad ----(9)$$

بالمثل لو تحركت الموجة جهة اليسار فإن معادلة الموجة تأخذ الصورة :

$$Y(x,t) = A\sin(kx + \dot{\omega}t) \quad ----(10)$$

وعندما يكون هناك فرق فى الطور قدره Ø فإن معادلة الموجة تصبح :

$$Y(x,t) = A\sin(kx \pm \dot{\omega}t + Ø) \quad ----(11)$$

تسمى المعادلات ٩ ، ١٠ بمعادلات انتشار الموجات الصوتية ، والشكل العام لها ممثل بالمعادلة (١١) مع الأخذ فى الأعتبار الإشارات عند إتجاه الإنتشار.

وتسمى العلاقة الأخيرة بال**معادلة الموجية** المنتشرة في الوسط، أي أنها تصف حركة أي ذرة منه في أي لحظة من الزمن. أن سعة الاهتزازات لنقطة ما تعتمد على بعد النقطة عن المنبع. فلو ركزنا على نقطة معينة وأهملنا بقية الوسط وتابعنا حركتها مع مرور الزمن فإننا نلاحظ أن سعة الحركة تتغير من لحظة لأخرى.

حيث تدل الزاوية ($\omega t + \varphi$) على الطور الآني أو الطور الذي يحدد حالة الجسم المهتز في أي لحظة، ولذلك إذا قارنا بين معادلة الحركة الموجية لنقطة من وسط تنتشر فيه موجة ميكانيكية تبعد مسافة x عن المنبع، أى

$Y_p = A\sin(\omega t - kx)$ ومعادلة المنبع نفسه $y_s = A\sin\omega$ للاحظنا أن المقدار kx يمثل فرق الطور *(phase difference)* بين النقطتين .ويمكن الاستفادة من هذه النتيجة لمعرفة حركة نقطة من وسط مهتز بمقارنتها مع منبع الاهتزازات) أو أي نقطة أخرى عندئذ تصير معادلة المنبع والنقطة π من الوسط .(فإذا كان فرق الطور يساوي عددا زوجيا من متكافئتين تماما، أي أنه إذا كانت سعة واحدة أكبر مايمكن فستكون الثانية كذلك، وإذا كانت سعة الأولى معدومة تكون الثانية مثلها، وهكذا دواليك ونقول في هذه الحالة إن الحركتين متوافقتين

ثانياً :المعادلة التفاضلية للحركة الموجية :

بتفاضل معادلة انتشار الموجات الصوتية (٨) مرتين مرة بالنسبة للزمن & ومرة بالنسبة للإزاحة:

اولاً : بالنسبة للزمن:

$$\frac{dy}{dt} = \left(\frac{2\pi v}{\lambda}\right) a\cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)\right\} - - - - - - (12)$$

ثانيا : بالنسبة للإزاحة:

$$\frac{\mathrm{dy}}{dx} = -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \mathrm{a}\ \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)\right\} - - - - - - (13)$$

بمقارنة المعادلتين (١٢) & (١٣) نحصل على :

$$\frac{\mathrm{dy}}{dt} = -v\ \frac{\mathrm{dy}}{dx} \quad \text{----------(14)}$$

٣–بالتفاضل مرة أخرى بالنسبة للزمن ثم بالنسبة للإزاحة

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\left(\frac{4\pi^2\, v^2}{\lambda^2}\right) \mathrm{a\ sin\ \{2\pi/\lambda\ (vt\text{-}x)\}\text{------(15)}}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\left(\frac{4\pi^2}{\lambda^2}\right) \mathrm{a\ sin\ \{2\pi/\lambda\ (vt\text{-}x)\}\text{------(16)}}$$

بمقارنة المعادلتين (١٥) & (١٦) نحصل على :

$$\frac{d^2y}{dt^2} = v^2\ \frac{d^2y}{dx^2} \quad - - - - - (17)$$

تسمى هذه المعادلة بالمعادلة التفاضلية للحركة الموجية . والجذر التربيعى لمعادلة $\frac{d^2y}{dx^2}$ يعطى مقدار سرعة الموجة.

من المعادلات (٨) & (١٥) نجد أن:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{4\pi^2\, v^2}{\lambda^2}\ y \quad - - - - - - - (18)$$

هذه المعادلة فيها العجلة تتناسب طرديا مع الإزاحة وهى معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية تصف الحركة التوافقية البسيطة لجزئات الوسط الناقل للموجة الصوتية. والصورة العامة لمعادلة الحركة التوافقية البسيطة تعطى من العلاقة:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \omega^2\, y \quad - - - - - - - - (19)$$

من المعادلتا(18) & (19) نستنتج أن:

$$\omega = k\, v = 2\pi/T = 2\pi\, v/\lambda$$

$$v = \lambda/T = \lambda\, \upsilon$$

٣-استنتاج طاقة الموجة الصوتية:

اذا اعتبرنا أن ρ تمثل كثافة الوسط الناقل للموجات الصوتية (كثافة وحدة الحجوم) فإن مقدار طاقة الحركة لوحدة الحجوم تساوى:

$$K.E = (1/2).\rho.\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = (1/2).\rho.\left(\frac{4\pi^2}{\lambda^2}\right) v^2 a^2 \cos^2\{2\pi/\lambda\ (v\ t-x)\} \text{------(18)}$$

نفترض أن طاقة الوضع هى P.E والتى تنتج نتيجة ازاحة لجزئ الوسط عن موضع اتزانه بمقدار dy ، ويكون مقدار الشغل اللازم لإزاحته ليعود الى موضعه الأصلى يساوى القوة x الإزاحة، أى :

الشغل المبذول $= \rho \cdot \frac{d^2y}{dt^2} \cdot dy = \rho \left(\frac{4\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right) a \sin\{2\pi/\lambda\ (vt-x)\}\ dy$

$$= \rho.\left(\frac{4\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right).y\ dy - - - - - - - - (19)$$

اذن طاقة الوضع P.E = الشغل الكلى المبذول $\oint \rho.\left(\frac{4\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right).y\ dy = w$

$$= (1/2)\ \rho\left(\frac{4\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right) a^2 \sin^2\{2\pi/\lambda\ (vt-x)\} = \rho\left(\frac{2\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right) a^2 \sin^2\{2\pi/\lambda\ (vt-x)\} \text{----------}$$
$$\text{----------(20)}$$

من المعادلتان ١٨ & ٢٠ نجد ان مقدار الطاقة الكلية لوحدة الحجوم = K.E + P.E

$$=[\rho.\left(\left(\frac{2\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right)\right) a^2 \cos^2\{2\pi/\lambda(vt-x)\}]+[\rho\left(\frac{2\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right) a^2 \sin^2\{2\pi/\lambda\ (vt-x)\}]$$

$$=\left(\frac{2\rho\, a^2\pi^2 v^2}{\lambda^2}\right).[\ \sin^2\{2\pi/\lambda\ (vt-x)\} + \cos^2\{2\pi/\lambda\ (v\ t-x)\}\ ] = \frac{2\rho\, a^2\pi^2 v^2}{\lambda^2} = constant\ - - - - - - - - - - - - (21)$$

واضح من هذه المعادلة بالرغم من أن طاقتى الوضع والحركة تعتمد على (x, t) إلا أن مقدار الطاقة الكلية لوحدة الحجوم تكون دائماً مقدار ثابت. ويتضح أيضاً أن طاقة الجسم تتناسب طردياً مع مربع السعة ومربع السرعة وعكسياً مع مربع الطول الموجى.

الباب الثانى

الظواهر الصوتية

الفصل الثانى

الظواهر الصوتية

نقدم فى هذا الفصل تفسير لأهم الظواهر الصوتية مثل انعكاس الصوت ، انكسار الصوت ، تداخل الصوت، حيود الصوت ، تراكب الموجات ، الموجات الموقوفة ، تطبيقات (تجربة ميلد، اهتزاز الأوتار بإستخدام الصونومتر، الرنين فى الأنابيب الهوائية ، مسائل)

١- الخصائص العامة للصوت:

- ينتشر في في الأوساط المادية فقط في جميع الاتجاهات في خطوط مستقيمة
- ينعكس على الاسطح العاكسة وتنطبق عليه قوانين الانعكاس
- ينكسر عند انتقاله من وسط الى وسط تختلف سرعته في الأول عن الثاني وتنطبق عليه قوانين الانكسار
- الاصوات المتساوية في التردد والسعة يحدث لها تداخل
- عند مرور الموجات الصوتية من فتحة أو عند اعتراضه بعائق يحدث له

٢-ظاهرة الإنعكاس فى الصوت

ينعكس الصوت على الأسطح الصلبة وعندما يعاد سماعه مرة ثانية تسمى ظاهرة انعكاس الصوت بالصدى. ويعرف انعكاس الصوت بأنه ارتداد الموجات الصوتية عندما تقابل سطحا عاكسا Reflection of Soundبعد سقوطها عليه ، بينما تعرف ظاهرة صدى الصوت Sound Echo بأنها ظاهرة تكرار سماع الصوت الناشيء عن الانعكاس .

شروط سماع صدى الصوت

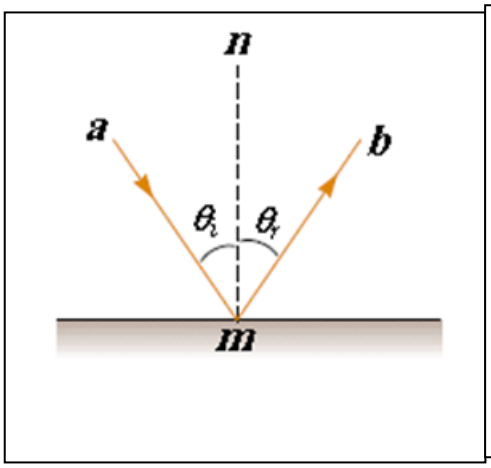
الإحساس بالصوت في الأذن البشرية يستمر ٠.١ ثانية ولذلك عند وصول الصدى للأذن قبل مضي ٠.١ ثانية فإنه يمتزج بالصوت الأصلي وبالتالي لا يمكن تميزه ولكن إذا وصل بعد مضي ٠.١ ثانية فإن الصدى يسمع

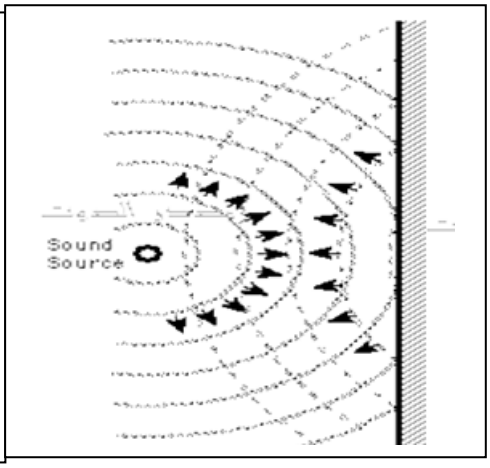
ولذلك فإن اقل مسافة يحدث عندها صدى لسطح عاكس هي مسافة ١٧ متر . بما أن سرعة الصوت = ٣٤٠ م / ث ، إذن المسافة = ٠.١ ×(340 / 2)= ١٧ مترا ذهابا وإيابا

كما اوضحنا من قبل فى الفصل الأول تنتقل الموجات الصوتية على شكل تضاغطات وتخلخلات متعاقبة على شكل كرات متحدة المركز تنعكس على السطح العاكس على هيئة موجات كروية أيضا ولكن يكون مركزها خلف الحاجز على نفس البعد من السطح العاكس أي يكون السطح العاكس في منتصف المسافة بين المصدر الأصلي ومصدر الموجات المنعكسة .

ملاحظات على انعكاس موجات الصوت

١-تنتشر الموجات الصوتية فى الهواء على شكل كرات من التضاغطات والتخلخلات مركزها المصدر الاصلى للصوت .
٢-عندما تقابل الموجات الصوتية حاجزا مستويا فانها تنعكس وتكون الموجات المنعكسة ايضا على شكل كرات متحدة المركز من التضاغطات والتخلخلات وتبدو الموجات المنعكسة كأنها آتية من مصدر آخر يقع خلف الحاجز .
٣-يكون بعد مصدر الموجات المنعكسة عن الحاجز مساويا لبعد المصدر الاصلى عنه.





٤-*الشعاع الصوتى*: خط مستقيم يدل على اتجاه انتشار الموجة الصوتية.
٥-*ينعكس الصوت تبعا لقوانين الانعكاس وهى*:-

القانون الأول

زاوية السقوط θ_i = θ_r زاوية الانعكاس

القانون الثاني

الشعاع الصوتي الساقط والشعاع الصوتي المنعكس والعمود المقام من نقطة السقوط تقع جميعا في مستوى واحد عموديا على السطح العاكس

تعريف الشعاع الصوتي : هو المستقيم الذي يدل على اتجاه انتشار الموجات الصوتية .

٣- ظاهرة الإنكسار في الصوت Refraction of sound

عند سقوط الموجات الصوتية من وسط إلى آخر يختلف عنه في الكثافة فانه يغير مساره وينحرف

٣-١ : قانونا الانكسار في الصوت

القانون الأول :

$$\frac{\sin\phi}{\sin\theta} = \frac{V_1}{V_2} = cons\tan t$$

حيث V_1 سرعة الصوت في الوسط الأول , V_2 هى سرعة الصوت في الوسط الثاني ، φ زاوية السقوط في الوسط الأول ، θ زاوية السقوط في الوسط الثاني

القانون الثاني : الشعاع الساقط والشعاع المنكسر والعمود المقام تقع في مستوى واحد عمودي على السطح الفاصل .

ملاحظات هامة على انكسار موجات الصوت

أ-ينكسر الصوت مقتربا من العمود إذا كانت سرعة الصوت في الوسط الأول أكبر من سرعة الصوت في الوسط الثاني والعكس صحيح

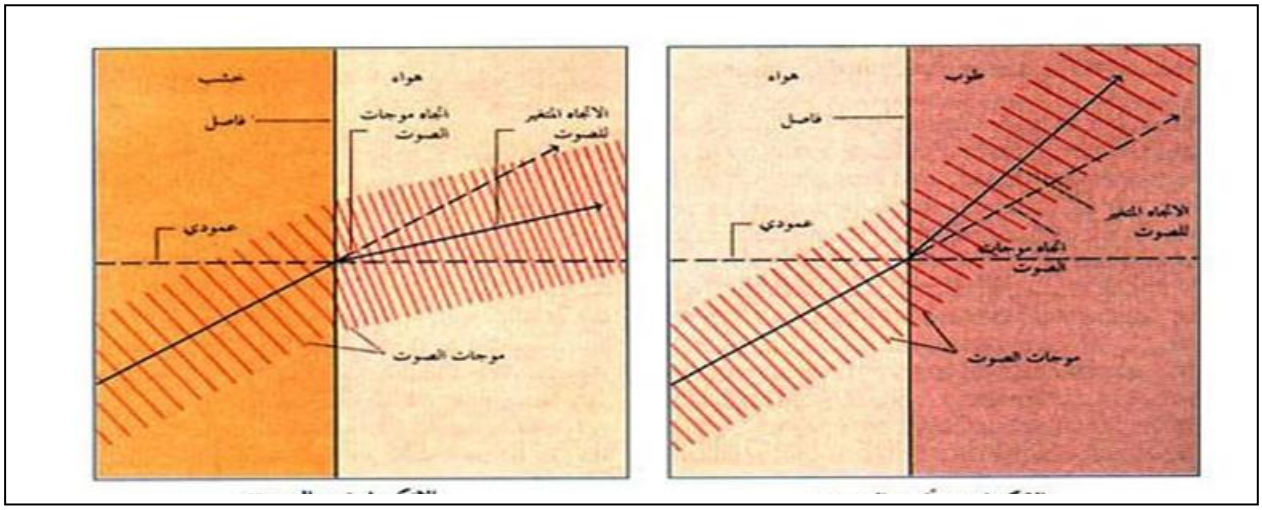
ب-سرعة الصوت في الغازات تقل كلما زادت كثافتها بينما في السوائل والأجسام الصلبة فإن سرعة الصوت تزداد مع زيادة الكثافة .

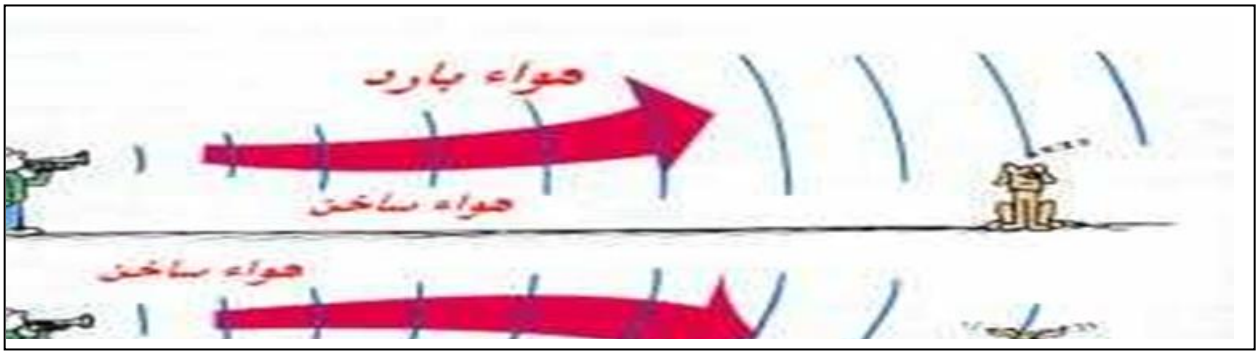
* سرعة الصوت فى الغازات تخضع للعلاقة :

$$V \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

*بينما سرعته فى السوائل والمواد الصلبة: $v \alpha \rho$

مثال لذلك : انتقال الصوت من الهواء الساخن الى الهواء البارد او انتقال الصوت من الهواء الى ثانى اكسيدالكربون.





٤-ظاهرة التداخل فى الصوت Sound Interference

تعريف التداخل : هو ظاهرة موجية تنشأ من تراكب حركتين موجيتين أو أكثر متساويتين في التردد والسعة ينتج عنها تقوية للصوت في مواضع تسمى تداخل بناء وضعف أو انعدام في الشدة في مواضع تسمى تداخل هدام .

شروط حدوث التداخل

١ -أن يكون للموجتين نفس التردد والسعة

٢- أن يكون خط انتشار الموجتين واحدا أو بينهما زاوية صغيرة جدا

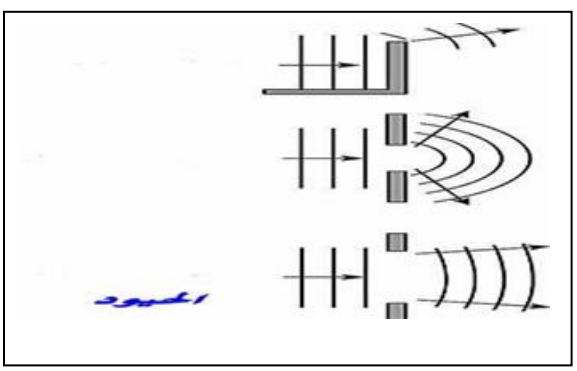
التداخل البناء : يتقابل تضاغط من المصدر الأول مع تضاغط من المصدر الثاني أو تقابل تخلخل مع تخلخل.

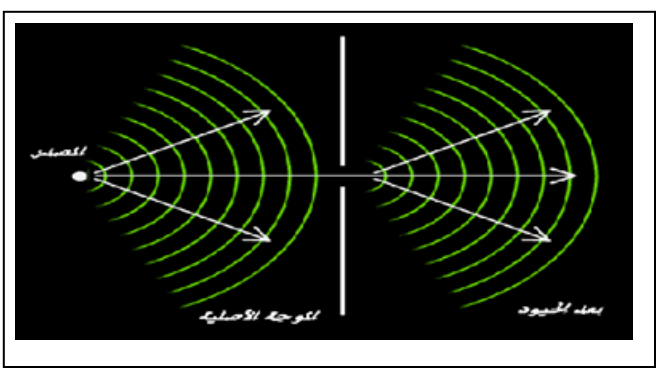
شرطه : أن يكون فرق المسير بين الموجتين = ($n\lambda$) ، حيث أن n عدد صحيح 0 , 1 , 2 , 3 ,..... n

٢- التداخل الهدام : يتقابل تضاغط من المصدر الأول مع تخلخل من المصدر # شرطه أن يكون فرق المسير بين الموجتين =λ ($\frac{1}{2}$ +n)، حيث أن n عدد صحيح 0 , 1 , 2 , 3 ,..... n.

٥-ظاهرة الحيود فى الصوت SOUND Diffraction

الحيود : هو تغير في مسار الموجة الصوتية أو انحناؤها عند مرورها في فتحة ضيقة بالنسبة لطولها الموجي أي عندما تكون أبعاد الفتحة مقاربة للطول الموجي أو عند مرورها بحافة حادة في نفس الوسط .





تفسير ظاهرة الحيود :

عند سقوط الموجات الصوتية على حاجز به ثقب اتساعه أقل من الطول الموجي للصوت نجد أن الموجات الساقطة على الحاجز عند الثقب أو الحافة تمتص أو تنعكس ولكن عند الثقب ينتج اضطراب خلف الحاجز يسبب انتشار الموجات الصوتية في مخروط أو مروحة وهذا يفسر سماع صوت شخص خلف الحاجز.

المقارنة بين الحيود والإنكسار فى الصوت	
الحيود	الانكسار
يحدث في نفس الوسط عند مرور الصوت خلال فتحة ضيقة (طولها اقل من الطول ألموجي للصوت $l < \lambda$) أو حافة حاجز	يحدث عند انتقال الصوت بين وسطين يختلفان في لكثافة نتيجة اختلاف سرعة الصوت في كل منهما
تبقى سرعة الصوت ثابتة	تتغير سرعة الصوت عند انتقالها للوسط الثاني
تنتشر الموجات بعد الحيود على شكل مخروط	تنتشر في خطوط مستقيمة قبل وبعد الانكسار

المقارنة بين التداخل البناء والتداخل الهدمى فى الصوت		
وجه المقارنة	ل البناء في الصوت	ل ألهدمي في الصوت
التعريف	تقوية في شدة الصوت في بعض المواضع جة تراكب حركتين موجيتين متساويتين في ردد والسعة	ضعف أو الانعدام في شدة الصوت في بعض اضع نتيجة تراكب حركتين موجيتين اويتين في التردد والسعة
السبب	تضاغط من الموجة الأولى مع تضاغط من جة الثانية أو تخلخل من الموجة الأولى مع خل من الموجة الثانية	تضاغط من الموجة الأولى مع تخلخل من جة الثانية أو العكس
شرط الحدوث	ون فرق المسار بين الموجتين $\Delta = m\lambda$	ون فرق المسار بين الموجتين $\Delta = (m + \frac{1}{2})\lambda$

٦-ظاهرة تراكب الموجات الصوتية Superposition principle

هى ظاهرة عبور الموجات لبعضها البعض دون أن يحدث لها أي تعديل . ويفسر مبدأ تراكب الأمواج على سبيل

المثال اذا عبرت سلك أو زنبرك أو حبل أو أي وسط آخر عدة نبضات في نفس الوقت فإن محصلة الازاحات لأي دقيقة من دقائق الوسط تساوي المجموع الجبري للازاحات الناتجة عن النبضات وعندئذ تكون المحصلة هي مجموع شدة الموجات .

ويمكن أن تتراكب الموجات المنتشرة في نفس الوسط مثل خيط أو حبل وتعطي موجة محصلة، وتكون شدة سعة الموجة المحصلة = مجموع الشدة للموجات المتراكبة .

ملاحظات

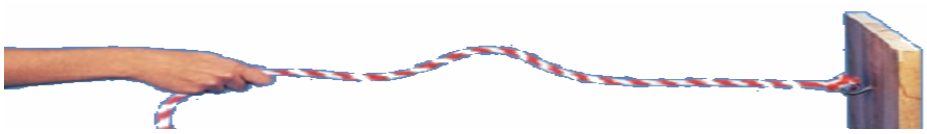
١ - اذا كانت ازاحة الموجات في اتجاه واحد الى أعلى أو إلى أسفل فإن الموجة المحصلة تساوي مجموع الازاحتين

٢ - اذا كانت الازاحتان في اتجاهين متضادين فإن الموجه المحصلة تساوي الفرق بين الازاحتين

تفسير سلوك انتقال النبضات

النبضة : هي اضطراب فردي غير متكرر (قمة مثلا أو قاع).

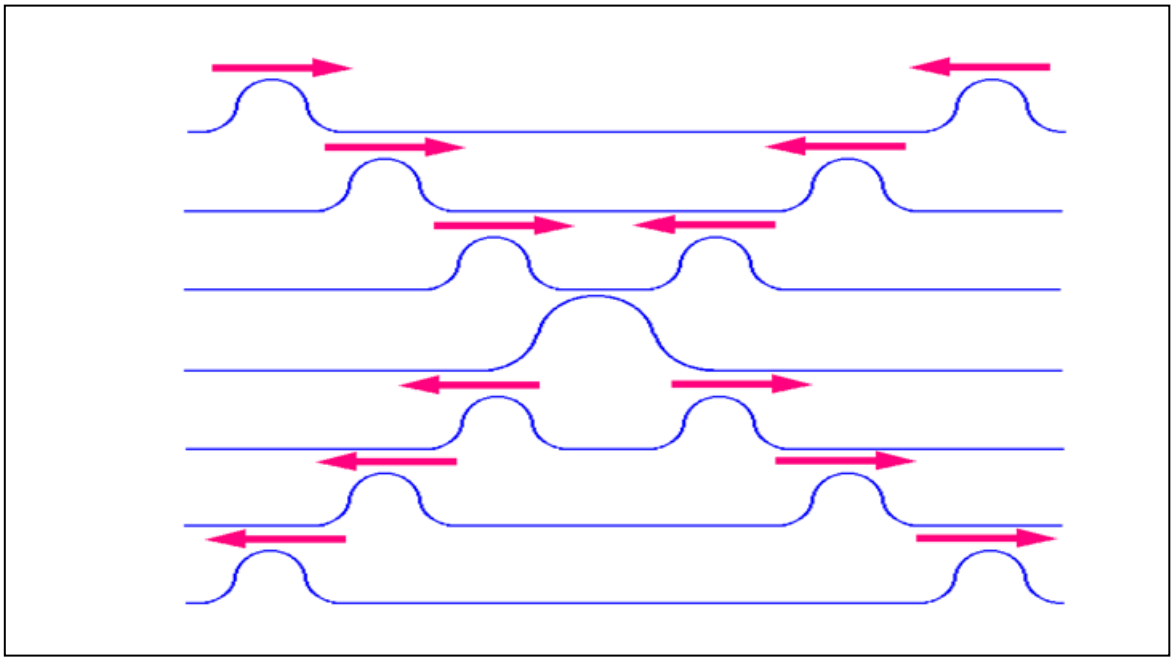
كيف تنتشر النبضة ؟ : اذا حركنا خيطا مشدودا بحيث تنطلق فيه نبضة نتيجة حركة اليد إلى أعلى أو الى اسفل فان النبضة تستمر في الخيط حتى تصل الى الطرف الاخر من الخيط



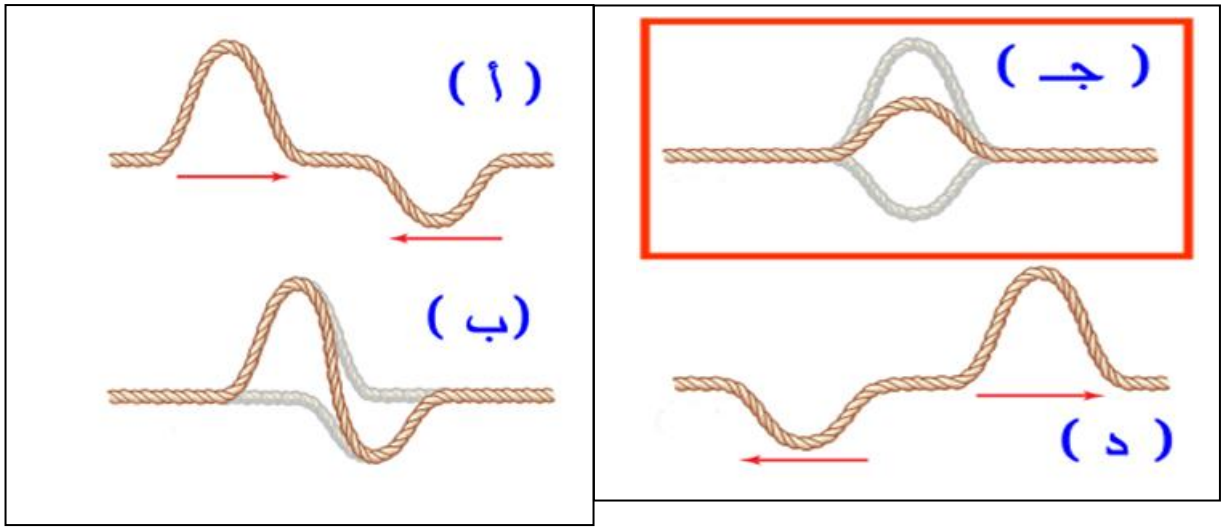
يلاحظ أن جزيئات الخيط تتحرك الى أعلى وإلى أسفل في النصف الأيسر من النبضة بينما تتحرك إلى أعلى في النصف الأيمن منها وبالتالي تتحرك جميع جزيئات الحبل دون أن تنتقل من مكانها ولكن تنتقل النبضة على طول الخيط أو الحبل

أمثلة توضيحية

١-تراكب نبضتين موجبتين [قمتين] مختلفتين في السعة في اتجاهين متعاكسين عندما تتقابل النبضتان تزداد سعة اهتزاز النبضة المحصلة وتساوي مجموع سعتي النبضتين وبعد الانفصال تسير كل من النبضتين في نفس مسارها الاصلي بنفس طاقتها تقريبا



٢-تراكب نبضتين إحداهما موجبة والأخرى سالبة ومختلفتين في السعة في اتجاهين متعاكسين. عندما تتقابل النبضتان تقل سعة اهتزاز النبضة المحصلة لأن إحداهما موجبة والأخرى سالبة وتصبح الشدة الفرق بين شدتي الموجتين وبعد الانفصال تسير كل منهما في نفس مسارها الأصلي بنفس طاقتها تقريبا



٣-انعكاس الموجات المستعرضة في حبل أو وتر : اذا سقطت نبضة مستعرضة في حبل او وتر [قمة أو قاع] فإنها ترتد

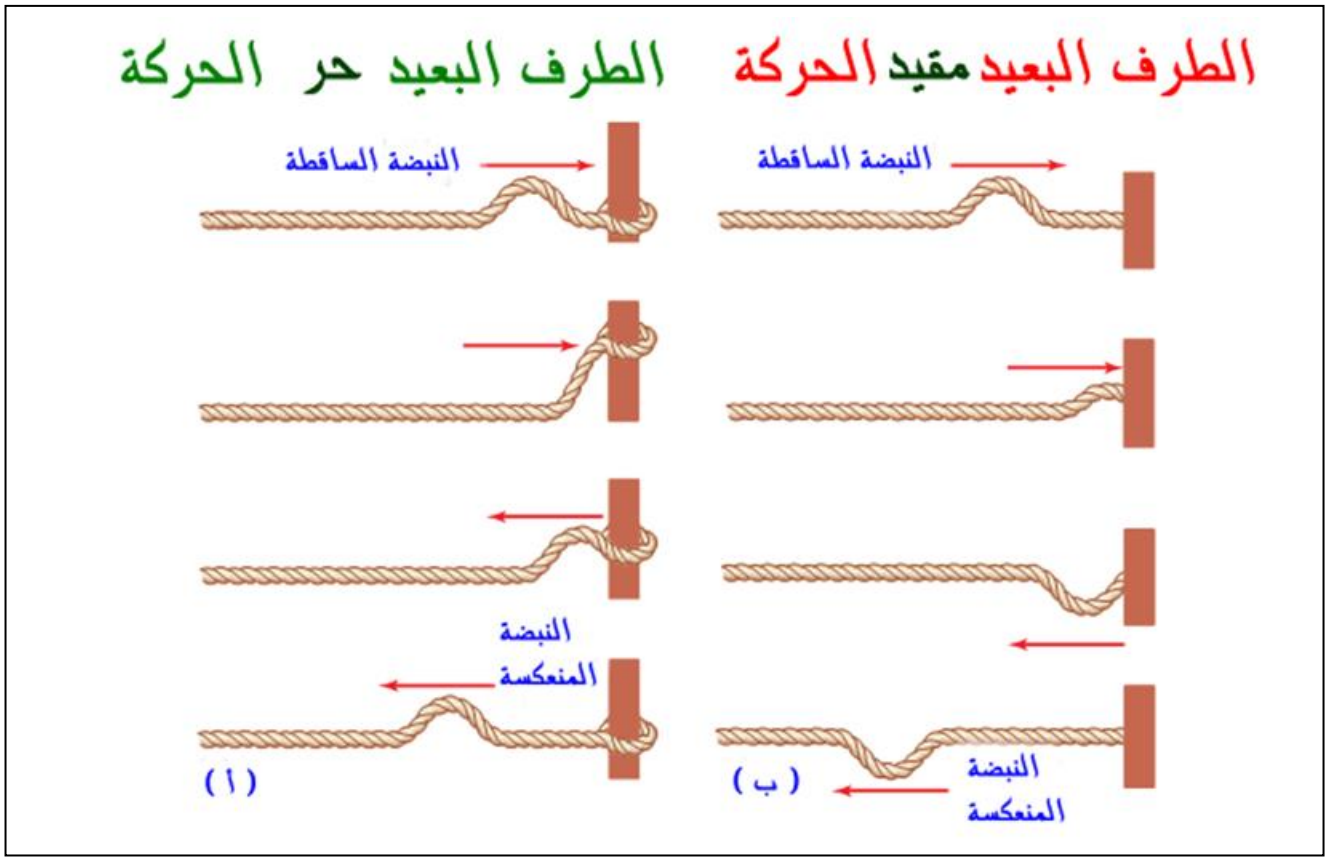
حسب تثبيت الحبل وذلك يكون في حالتين:

١-الحالة الأولى : اذا كان طرف الحبل البعيد حر الحركة

التفسير : عند وصول النبضة الى العروة تحدث قوة على نهاية الحبل حرة الحركة لأعلى فتتسبب بتحريك العروة لأعلى وبفعل مركبة قوة الشد لأسفل تبدأ الحلقة في الهبوط الى موضعها الاصلي فتنعكس النبضة غير مقلوبة لتتحرك في الاتجاه المضاد بسعة تساوي سعة النبضة الساقطة

٢-الحالة الثانية : اذا كان طرف الحبل البعيد مقيد الحركة

التفسير : عند وصول النبضة الى نهاية الحبل المثبتة في القائم الراسي يحدث الحبل قوة الى أعلى على القائم ولا يستطيع تحريكه ومن قانون نيوتن الثالث يحدث القائم قوة رد فعل لأسفل مساوية له في المقدار ومعاكسة له في الاتجاه وبسبب هذه القوة العكسية لاسفل تنقلب النبضة فترتد القمة قاع ويرتد القاع قمة



* تفسير ظاهرة تراكب الأمواج

عديد من الظواهر الهامة الموجية في طبيعتها لا يمكن وصفها بواسطة نبضة أو موجة منفردة متحركة ، و لكن بتحليل موجة مركبة بدلالة اتحاد عدد من الموجات الصوتية المتحركة تجمعت وفق مبدأ يسمى بمبدأ التراكب الموجي ، و الموجات التي تتبع هذا المبدأ تسمى الموجات الخطية و هي موجات ذات سعات موجية صغيرة.

إذا إنتشر فى وسط ما مجموعة من الموجات فى نفس الوقت فإن ذبذبة جسيمات الوسط تكون حاصل الجمع الجبرى للذبذبات الناشئة عن كل موجة على حدة عندما تمر فى الوسط. أى أن الموجات تجمع بساطة على بعضها ولاتؤثر واحدة على الأخرى. تعرف هذه الظاهرة بالتراكب أو التجميع. وتعتمد المحصلة الناتجة من عملية التجميع على سعة الموجتين وفرق الطور بينهما.

٢-تداخل الأمواج الصوتية Interference of sound waves

تعريف التداخل : هو ظاهرة موجية تنشأ من تراكب حركتين موجيتين أو أكثر متساويتين في التردد والسعة ينتج عنها تقوية للصوت في مواضع تسمى تداخل بناء وضعف أو انعدام في الشدة في مواضع تسمى تداخل هدام

شروط حدوث التداخل

١ -أن يكون للموجتين نفس التردد والسعة

٣- أن يكون خط انتشار الموجتين واحدا أو بينهما زاوية صغيرة جدا

نفرض وجود موجتين صادرتين لهم نفس التردد والسعة وتتحركان بنفس السرعة وفى نفس الإتجاه الى اليمين $(+x)$ ولكنهما تختلفان فى الطور بمقدار φ ، تكون معادلة الموجة لكل منهما هى

$$y_1 = A\sin(kx - \omega t) \quad \text{----------} \quad (١)$$

$$y_2 = A\sin(kx - \omega t + \varphi) \text{----------} \quad (٢)$$

محصلة الموجتين تعطى بـ

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \varphi)]$$

(٣) ----------

من حساب المثلثات

$$\sin a+\sin b=2\sin\tfrac{1}{2}(a+b)\cos\tfrac{1}{2}(a-b)$$

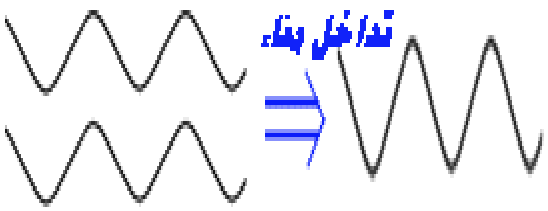
$$\therefore y=2A\cos\frac{\varphi}{2}\sin(kx-\omega t+\frac{\varphi}{2})\quad\text{--------(٤)}$$

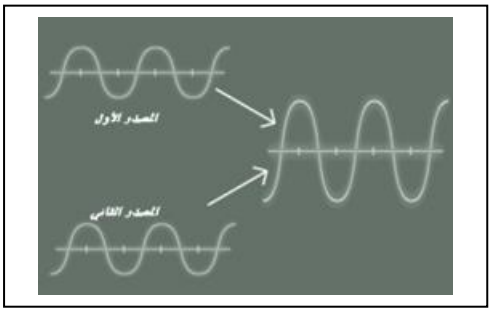
وهى معادلة موجة لها نفس تردد الموجات الأصلية ولكن سعتها $2A\cos\frac{\varphi}{2}$. ويتوقف شكل الموجة المحصلة على فرق الطور φ. ومن المعادلة السابقة يمكننا الحصول على حالتين هامتين جدا وهم:

أ-التداخل البناء Constructive interference:

ظاهرة التداخل : هي ظاهرة فيزيائية تحدث بين الموجات نتيجة لتراكب موجتين أو أكثر لها نفس التردد مما يؤدي إلى إحدى الحالتين:

أ- **تداخل بناء** : حيث تتطابق القمم مع القمم و القيعان مع القيعان (بالنسبة للأمواج المستعرضة) و التضاغطات مع التضاغطات و التخلخلات مع التخلخلات(بالنسبة للأمواج الطولية) فتعزز الواحدة الأخرى و يشكلان موجة ذات سعة محصلتها تساوي الجموع الجبري لسعات الموجات المتراكبة , و يكون ذلك عندما تكون متفقة بالطور.





A=A1+A2

مثال: إذا كان فرق الطور بين الموجتين يساوى الصفر $\varphi=0$ فإن $\cos0=1$ وبالتالى فإن المحصلة تأخذ الشكل

$$y = 2A\sin(kx - \omega t) \qquad (١)$$

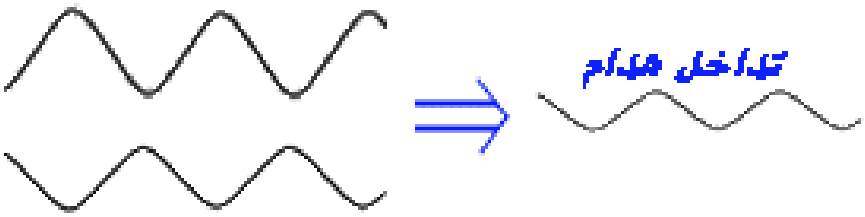
ضعف السعة الأصلية وتنطبق الموجتين كل منهما الأخرى $2A$ أى تكون سعة الموجة المحصلة ضعف وتقويان بعضهما البعض ويسمى التداخل بالتداخل البناء كما فى شكل (ا)

ب- التداخل الهدام Destructive interference:

حيث تتطابق القمم مع القيعان بالنسبة للأمواج المستعرضة) و التضاغطات مع التخلخلات (بالنسبة للأمواج الطولية) فتفني كل واحدة الأخرى , و يكون هذا عندما يكون فرق الطور بينهما(180°) أى أن :

$$|A|=A1-A2$$

•أما في حالة التداخل الهدام فتصبح$A=0$ ، ورأينا حالة التداخل البناء و إذا كانت $A1=A2$ عندها$A=2A$.

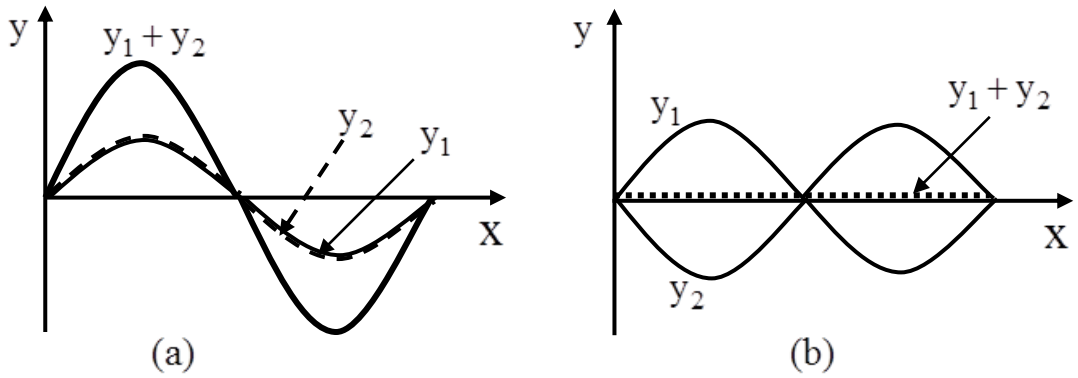


مثال : إذا كان فرق الطور بين الموجتين يساوى $\varphi = \pi$ فإن $\cos\frac{\pi}{2} = 0$ وبالتالى فإن المحصلة تأخذ الشكل

(ب)

$$y = y1 + y2 = 0$$

أى أن السعة المحصلة تصبح صفرا لأن قمة إحدى الموجتين تقع فوق قاع الأخرى ولذلك تهدم الموجتين بعضهما. ويسمى التداخل فى هذه الحالة بالتداخل الهدام كما فى شكل (b)



وبصفة عامة فإن الإزاحة y عند أى بعد x هى المجموع الجبرى للإزاحتين عند نفس البعد وأن الموجة المحصلة هى موجة جيبية مثل الموجتين الأصليتين. ويكون التداخل بناء إذا أخذ فرق الطور بين الموجتين القيم

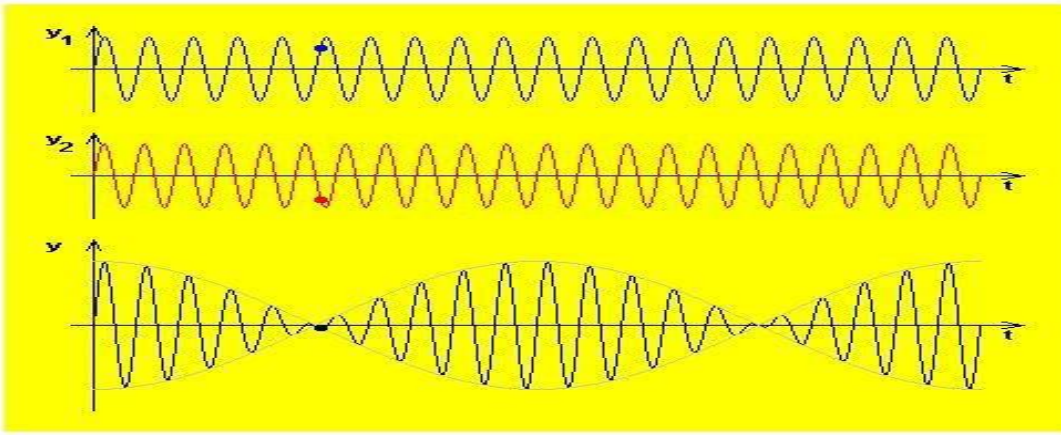
$$\varphi = 2n\pi, \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

ويكون التداخل هدام إذا أخذ فرق الطور القيم

$$\varphi = (2n+1)\pi$$

٧- ظاهرة الضربات:

أما في حال اختلاف الطور بين الموجات فإننا نحصل على درجات مختلفة من التطابق بين القمم و القيعان وفقاً لفروق الطور بين هذه الموجات. فإذا كانت شدة الموجة الناتجة عن التداخل ثابتة عند نقطة معينة فهذا يعني أن التأثير ناتج عن " **تداخل مكاني** " بين الموجات , أما عندما يكون تردد الموجة الأولى قريب جداً من تردد الموجة الثانية فإننا نلاحظ أن الشدة الناتجة للموجة المحصلة عند نقطة معينة تتغير مع الزمن مما يعني أن هناك **" تداخل زمني** " تنتج عنه موجة لها ضربات صوتية منتظمة مختلفة عن تردد الموجتين الأصليتين ,و لذا تسمى هذه الظاهرة **بظاهرة الضربات**، ويمكن **تعريف ظاهرة الضربات** بأنها: **ظاهرة تتكون من تداخل موجتين مختلفتين في طول الموجة و متحركتين في نفس الاتجاه و لهما نفس التردد تقريب.**



لنفترض موجتين لهما السعة نفسها و تنتشران في نفس الاتجاه خلال وسط معين , و لهما الترددان f_1 ,f_2 اللذان يختلفان اختلافاً طفيفا نكتب سعة اهتزاز الموجة الأولى و الثانية على الترتيب كما يلي:

$$S_1 = S_o \cos 2\pi f_1 t \text{ ----------(3)}$$

$$S_2 = S_o \cos 2\pi f_2 t \text{---------- (4)}$$

و باستخدام مبدأ التراكب الموجي فإن سعة اهتزازة الموجة المحصلة تساوي:

$$S= S_1 + S_2 = S_o (\cos 2\pi f_1 t + S_o \cos 2\pi f_2 t) \quad (5)$$

و باستخدام العلاقة المثلثية

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha-\beta}{2}\cos\frac{\alpha+\beta}{2}$$

و ذلك بجعل $\beta = 2\pi f_2 t$ & $\alpha = 2\pi f_1 t$

فإننا نكتب العلاقة (5) على النحو التالي:

$$S = [2S_o \cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t]\cos 2\pi\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) - (6)$$

,وهى معادلة موجة توافقية بسيطة ترددها f يساوي:

$$f=\frac{f_1-f_2}{2} \quad \text{_____(7)}$$

أما سعتها فهى $S = 2S_o \cos 2\pi\left(\frac{f_1-f_2}{2}\right)t$ .....(٨)

و نلاحظ أن السعة تتغير مع الزمن و أن ترددها f هو:

$$f= \frac{f_1-f_2}{2} \quad \text{----------(9)}$$

يلاحظ من المعادلة (8) أن **السعة القصوى** تتحقق عندما تكون:

$$\cos 2\pi\left(\frac{f_1-f_2}{2}\right)t = \pm ١ \text{.....(10)}$$

و هذا يعني أن تردد كل دورة تحتوي على سعتين قصوتين,و لأن السعة تتغير مع التردد وفق: $\frac{f_1-f_2}{2}$ ، فإن تردد الضربات الناتجة هو ضعف هذا المقدار أي أن:

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| - - - - - - - - (11)$$

٨- ظاهرة الرنين والموجات الموقوفة

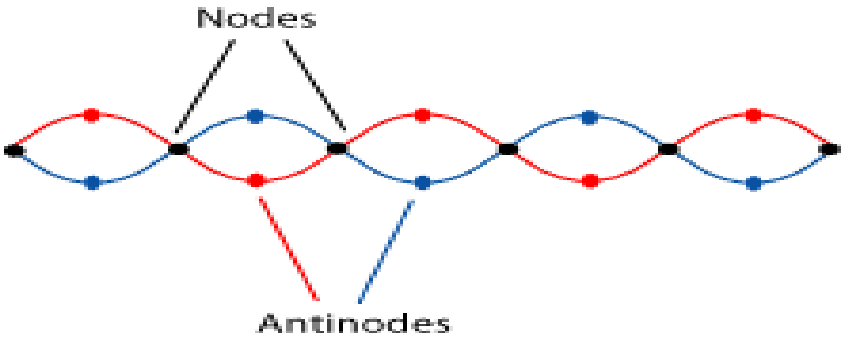
أولاً : الموجات الموقوفة فى الأوتار

إذا شددت وتر وتركته يهتز بحرية، سوف يهتز الوتر عند ترددات محددة بسعة كبيرة. يسمى هذا التأثير الرنين. وتتكون هذه الظاهرة نتيجة التداخل بين الموجات الساقطة والموجات المرتدة مكونة ما يسمى **بالموجات الموقوفة**. والموجات الموقوفة تتكون عندما تتداخل موجتين بحيث تتوفر الشروط التالية:

١-لهما نفس السعة

2- لهما نفس التردد

3- تنتقلان في اتجاهين متعاكسين.



والموجة الموقوفة تتكون من عقد وبطون . عند العقدة تكون الإزاحة تساوي صفر بينما عند البطن تكون الإزاحة اكبر ما يمكن. ودائما تتكون العقدة عند الطرف الثابت. واقل تردد يمكن ان يحدث عنده الرنين يسمى التردد الأساسى والنغمة الصادرة من الوتر تسمى بالنغمة الأساسية أو النغمة التوافقية الأولى والذي تكون السعة أكبر ما يمكن فى منطقة الوسط من الوتر.

تفسير النغمات التوفقية التوافقية:

الشكل التالي يوضح الأنماط المختلفة للنغمات التوافقية المكونة من الموجات الموقوفة مع سعاتها وترددتها.

Standing Wave Form	Harmonic	Wavelength λ	Frequency f
	1st	$2L$	f_1
	2nd	L	$2f_1$
	3rd	$2L/3$	$3f_1$
	4th	$L/2$	$4f_1$
	5th	$2L/5$	$5f_1$
	6th	$L/3$	$6f_1$
	7th	$2L/7$	$7f_1$

١-النغمة التوافقية الأولى (الهرمونى الأول):

يوضح المخطط عند اهتز وتر مشدود طوله (L) بحيث تكونت عليه موجة موقوفة واعطت الشكل الأول بحيث تكونت بطن فى المنتصف وعقدتين عند الطرفين. فإن النغمة الصادرة تسمى بالنغمة الأساسية (النغمة التوافقية الأول) والتردد الذى يهتز به الوتر يسمى بالتردد الأساسى (f_1) . فإذا كانت v هى سرعة الموجة الصوتية و λ هو طول موجتها سنجد أن:

$$L = \frac{1}{2}\lambda_1 \qquad or\ \lambda_1 = 2L$$

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = 1.\frac{c}{2L} \text{----------(1)}$$

هذه المعادلة تعطى أقل تردد يهتز به السلك المشدود

٢-النغمة التوافقية الثانية (الهرمونى الثانى)

أما النمط الثانى لإهتزاز الوتر يمثله الشكل الثانى فى المخطط ويهتز فيه الوتر بتردد (f_2) وطول موجى (λ_2) ويسمى الإهتزاز فى هذه الحالة بالهرمونى الثانى وتمثله المعادلة:

$$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = 2.\frac{c}{2L} = 2f_1 \text{----------(2)}$$

٣-النغمة التوافقية الثالثة (الهرمونى الثالث)

أما النمط الثالث لإهتزاز الوتر يمثله الشكل الثالث فى المخطط ويهتز فيه الوتر بتردد (f_3) وطول موجى (λ_3) ويسمى الإهتزاز فى هذه الحالة بالهرمونى الثالث وتمثله المعادلة:

$$f_3 = 3\frac{c}{\lambda_3} = 3\ \frac{c}{2L} = 3f_1 \text{----------(3)}$$

وهكذا ..... يمكن الحصول على النغمات التوافقية المتتابعة. أذن ممكن تعميم علاقة التردد :

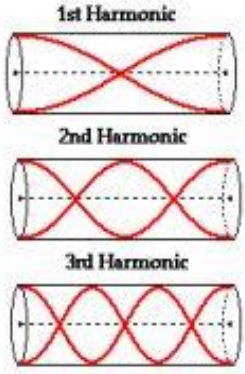
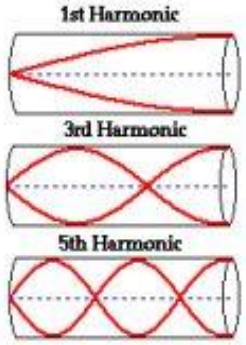
$$f_n = n\frac{c}{\lambda_n} = n\frac{c}{2L} = n\ f_1 \text{----------(3)}$$

أى أن تردد النغمات التوافقية يساوى عدد صحيح من التردد الأساسى. واذا اردنا أن نوجد علاقة بين التردد والخواص الميكانيكية للوسط الذى تنتشر فيه الموجة الصوتية وهو الشد والكثافة الطولية ρ

$$f_n = \frac{n}{2L}\left(\sqrt{\frac{T}{\rho}}\right) \text{----------(4)}$$

ثانياً : الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية

الشكل التالي يوضح الأنماط المختلفة للموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية.

Open at Both Ends	Harmonic	Wavelength λ	Frequency f
	1^{st}	$2L$	f_1
	2^{nd}	L	$2f_1$
	3^{rd}	$2L/3$	$3f_1$
	Odd and Even Harmonics		
Closed at One End			
	1^{st}	$4L$	f_1
	3^{rd}	$4L/3$	$3f_1$
	5^{th}	$4L/5$	$5f_1$
	Odd Harmonics		

بنفس الطريقة التى تكونت بها النغمات التوافقية بالموجات الموقوفة فى الوتار تحدث فى الأنابيب الهوائية. عند النفخ في أنبوبة هوائية ، فأن الهواء بداخله يهتز ويعطي صوت. والموجات المتكونة في الأعمدة الهوائية هي موجات طولية. فعندما يهتز الهواء في الأعمدة الهوائية تتكون موجة موقوفة نتيجة التداخل بين موجة ساقطة وموجة منعكسة مساوية لها فى السعة والتردد وهنا تتكون عقدة عند الطرف المغلق وبطن عند الطرف المفتوح. والمخطط التالى يوضح النغمات التوافقية المصاحبة:

أولاً : فى الأنابيب الهوائية المغلقة

١-النغمة التوافقية الأولى (الهرمونى الأول):

$$f_1 = \frac{c}{4l} = 1\ f_1 \text{----------(1)}, \qquad \lambda = 4L$$

٢-النغمة التوافقية الثانية (الهرمونى الثانى):

$$f_2 = 3\frac{c}{4l} = 3\,f_1$$----------(2),

٣-النغمة التوافقية الثالثة (الهرمونى الثالث):

$$f_3 = 5\frac{c}{4l} = 5\,f_1$$----------(2),

ويمكن تعميم علاقة التردد

$$f_n = n\frac{c}{4l} = n\,f_1$$----------(2),

ثانيا : فى الأنابيب الهوائية المفتوحة

بالمثل فى النابيب المفتوحة تتكون الموجات الموقوفة بحيث نسمع النغمة الأساسية بترددها الأساسى f_1 :

١-النغمة التوافقية الأولى (الهرمونى الأول):

$$f_1 = \frac{c}{2l} = 1\,f_1$$----------(1), $\lambda = 4L$

٢-النغمة التوافقية الثانية (الهرمونى الثانى):

$$f_2 = 2\frac{c}{2l} = 2\,f_1$$----------(2),

٣-النغمة التوافقية الثالثة (الهرمونى الثالث):

$$f_3 = 3\frac{c}{2l} = 3\,f_1$$----------(2),

ويمكن تعميم علاقة التردد

$$f_n = n\frac{c}{2l} = n\,f_1$$----------(2),

ظاهرة دوبلر

إذا كان كل من مصدر الصوت والسامع والوسط ثابتاً بالنسبة لبعضهما ، فإن السامع يسمع صوتاً تردده مساوياً لتردد المصدر.

أما لو تحرك أي منهم بالنسبة لبعضهما البعض، فإن التردد المسموع سيختلف عن تردد المصدر وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة دوبلر.

وتبحث ظاهرة دوبلر في تغير تردد الموجة المسموعة التي يصدرها مصدر في حالة وجود حركة نسبية بين المصدر والسامع.

فعندما يتحرك المصدر مقترباً من مراقب ثابت فإن التردد المقاس بواسطة المراقب يزداد.

وعندما يبتعد المصدر عن المراقب الثابت يصبح التردد المقاس أقل من تردد المصدر في حالة سكون.

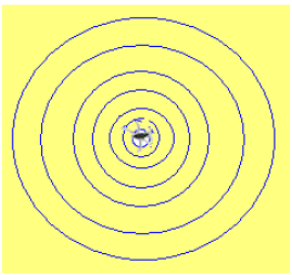
تزداد درجة صوت الصافرة باقتراب القطار من السامع وتقل بابتعاده عنه.

وتستخدم ظاهرة دوبلر في رادارات سيارات شرطة المرور لمعرفة سرعة السيارات المخالفة للسرعة القانونية، كما لها تطبيقات عدة في مجال الطب حيث يتم التعرف على نبضات الجنين وكذلك سرعة تدفق الدم في الأوعية الدموية باستخدام الأمواج فوق الصوتية وظاهرة دوبلر.

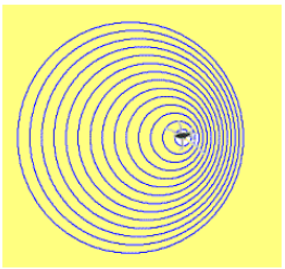
ظاهرة اختراق حاجز الصوت

تحدث ظاهرة اختراق حاجز الصوت عندما يتحرك الجسم بسرعة اكبر من سرعة الصوت.

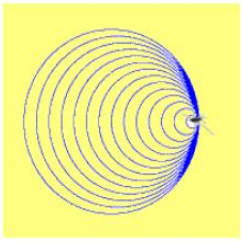
لنتصور طائرة تصدر صوتاً وهي ساكنه قبل الاقلاع فتنتشر الأمواج الصوتية على شكل حلقات تكون الطائرة في مركزها.



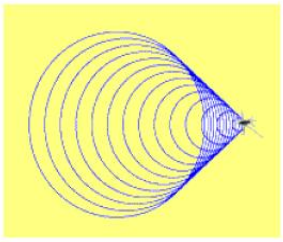
عندما تتحرك الطائرة فطبقاً لظاهرة دبلر يكون تردد الأمواج الصوتية امام الطائرة أكبر من ترددها خلف الطائرة.



عندما تصل سرعة الطائرة إلى سرعة الصوت فيصبح انتشار الامواج الصوتية الناتجة من الطائرة تساوي سرعة الطائرة نفسها فتتراكم جبهات الموجات الصوتية امام الطائرة مباشرة لتكون ما يسمى بموجة الصدمة.



ما تصبح سرعة الطائرة أكبر من سرعة الصوت فإن كل جبهات الموجات الصوتية الناتجة من محرك
ئرة تتراكم فوق بعضها البعض على جانبي الطائرة وتتداخل تداخلاً بناءً لتشكل جبهة موجة واحدة ذات سعة
ة جداً هي موجة الصدمة ولكن في هذه الحالة على جانبي الطائرة وتنتشر في الهواء على شكل مخروط
زه مقدمة الطائرة.



ما تصل موجة الصدمة على طرفي المخروط الصوتي سطح الأرض يصدر صوتاً مزعجاً يحدث ضرراً لأذن
سان وقد يحطم نوافذ المباني.

ن صور لطائرات اثناء اختراق حاجز الصوت

الصوتيات البيئي

م الصوتيات البيئي أحد فروع علم الصوتيات، الذي يهتم بالتحكم في التلوث الضجيجي، والتخفيف من آثاره.

سجيج أو الضوضاء فهي عبارة عن صوت معقد أو خليط من العديد من الترددات المختلفة لا يوجد تناغ
وتي بينها.

صادر الضجيج عديدة، مثل: الطائرات ومواقع البناء والصناعات والسيارات والأجهزة المنزلية.

ضجيج المتواصل، حتى لو لم يكن صاخباً، يسبب الإرهاق والصداع، وفقدان السمع، والتوتر والغثيان.

لأفراد الذين يتعرضون للضجيج المرتفع، لفترات طويلة، قد يعانون فقدان السمع، المؤقت أو الدائم.

كن التحكم في تلوث الضجيج بعدة طرق.

ن وسائل تقليل ضجيج السيارات كاتم الصوت "الشكمان"، الذي يجعل محركات السيارات أهدأ.

المباني، يمكن استخدام الجدران السميكة الثقيلة، والأبواب والنوافذ، التي يمكن إحكام إغلاقها.

الباب الثالث

إنتقال الموجات الصوتية

الفصل الثالث
إنتقال الموجات الصوتية

العوامل المؤثرة على سرعة موجة الصوت في الهواء

تختلف سرعة الصوت حسب نوع الوسط الذي تنتشر فيه الموجات الصوتية ودرجة الحرارة فتكون أعلى في المواد الصلبة وأقل في السوائل وأقل بكثير في الغازات. وبالنسبة لانتشار الصوت في الهواء فيعتمد على الضغط ، أي أن سرعة الصوت تقل بالارتفاع عن سطح الأرض.

1-تأثير تغيير درجة الحرارة على سرعة الصوت-:

كلما ارتفعت درجة الحرارة كلما زاد انطلاق الصوت فنلاحظ عند زيادة درجة الحرارة درجة سليليزية واحدة فان انطلاق الصوت يزداد بمقدار 0.61

m / sec

صيغة تطبيقيّة لسرعة الصوت للهواء الجاف

تختلف سرعة الصوت باختلاف المواد التي ينتقل خلالها، فهى تعتمد على المادة ودرجة الحرارة، فسرعة الصوت في الهواء عند درجة حرارة 0^oC تساوي m/s ٣٣١ ووجد أنها تزداد لنفس المادة بزيادة درجة الحرارة بمعدل 0.6m/s لكل ارتفاع في درجة الحرارة مقداره درجة مئوية واحدة. أي ان سرعة الصوت في الهواء الجاف (٠% رطوبة) تعطى من العلاقة:

$$V_{air} = 331.3\, m.s^{-1} \sqrt{1 + (\frac{T}{273.15C^o})}$$

حيث Tهي درجة الحرارة المئوية (C°). وباستخدام علاقة لابلاس التقريبية تكون سرعة الصوت عند أى درجة حرارة قريبة من الصفر تعطى من العلاقة :

$$V_{air} = \left(331.3 + (0.606\, C^{-1}.T)\right) m.s^{-1}$$

لاحظ ان سرعة الصوت تصبح ٣٣١.٣ م/ث عند الصفر المئوي وقد تمّ الحصول عليها من افتراض قانون الغاز المثالي .

درجة الحرارة T (^{o}C)	سرعة الصوت (m/sec)
0	331
15	342
30	349
100	386

٢- <u>تأثير تغير الضغط على سرعة الصوت-:</u>

وبالنسبة لانتشار الصوت في الهواء فيعتمد على الضغط ، أي أن سرعة الصوت تقل بالارتفاع عن سطح الأرض.

أن سرعة تقدم الموجة الصوتية في الهواء لا يتأثر إذا تغير ضغط الهواء و ذلك لان أي تغيير في ضغط كتلة معينة من الهواء يولد تغييرا مقابلا في حجم الهواء.

<u>3-تأثير تغير الرطوبة على سرعة الصوت-:</u>

أذا كانت سرعة الصوت تزداد كلما قلت كثافة الوسط لذلك فان سرعة الصوت في الهواء تزداد مع زيادة رطوبته علما أن الهواء الرطب تكون كثافته اقل من كثافة الهواء الجاف

<u>4-تأثير الرياح على سرعة الصوت-:</u>

عندما تهب الريح بنفس اتجاه تقدم الموجة الصوتية فإن سرعة الصوت تزداد، اما اذا كانت تهب الريح عكس اتجاه تقدم الموجة الصوتية فإن سرعة الصوت تقل ، اما اذا كان اتجاه الريح عمودى على اتجاه تقدم الصوت فلا يكون للريح أى تأثير على سرعة الصوت.

<u>5-تأثير التردد و الطول ألموجي على سرعة الصوت-:</u>

ان سرعة الصوت فى الهواء لاتعتمد على التردد υ أو الطول الموجى λ وذلك لآن العلاقة الفيزيائية بينهما: $V = \upsilon \lambda = Constant$ وتكون سرعة الصوت ثابتة طالما أن خواص الوسط (الهواء) ثابتة.

6-تأثير السعة على سرعة الصوت-:

ان سرعة الصوت فى الهواء لا تتوقف على السعة ما لم تكون السعة كبيرة ، ففى الأصوات الإعتيادية حيث السعة صغيرة تكون سرعة الصوت ثابتة وهى سرعته فى الهواء، أما فى حالة الأصوات الشديدة العالية كالصادرة من المدفعية أو من الإنفجارات حيث تكون السعة كبيرة، فإن الصوت يتقدم بسرعة أكبر من سرعته الإعتيادية.

وكما ذكرنا ان الصوت ينتقل عبر مواد أخرى غير الهواء ، فالسوائل تنقل الصوت ايضا حيث يمكننا تحت الماء ان نسمع صوت ارتطام حجرين كذلك نستطيع سماع الصوت المنتقل عبر المواد الصلبة كمثال سماع صوت القطار القادم عند وضع الأذن على قضبان السكة الحديد. وتتم عملية انتقال الصوت في الغازات والسوائل عن طريق انتشار موجات الضغط والكثافة حيث تتذبذب الجزيئات فيها في اتجاه انتشار الصوت (أي تتأرجح جزيئات الوسط إلى الأمام وإلى الخلف وهكذا من دون أن تنتقل من مكانها . تلك الحركة تسمى موجة طولية . وتكون سرعة الصوت دالة لكثافة الوسط ρ و معامل الحجم B (أي قابلية المادة على الانضغاط) وفق المعادلة التالية :

$$V_{fluid\,,gas} = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

أي ان سرعة الصوت في وسط غازي أو سائل تزداد بزيادة قابلية الوسط على الانضغاط وتقل مع زيادة كثافة الوسط . ويمكن تعميم المعادلة العامّة لسرعة الصوت باستخدام الميكانيكا الكلاسيكيّة:

$$V^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho}$$

أي باشتقاق نسبة التغيّر الاديباتي. وفي حالة أخذ النسبيّة الخاصّة بعين الاعتبار يمكن اشتقاق سرعة الصوت من معادلات ايولر النسبيّة. تكون السرعة مستقلّة عن التردّد إذا كان الوسط غير مبدّد أمّا إذا كان مبدّدا فتكون السرعة دالة في التردّد. مثلا يعتبر الهواء وسط غير مبدّد عند التردّدات السمعيّة ثمّ يصبح مبدّدا عند التردّدات فوق السمعية بسبب وجود ثاني اكسيد الكربون في الهواء الجوّي وهو وسط مبدّد.

السرعة في الغاز المثالي والهواء

$$V = \sqrt{\gamma . \frac{P}{\rho}}$$

حيث γ معامل يمثل النسبة بين السّعة الحراريّة للغاز عند ثبات الضغط إلى السعة الحرارية عند ثبات الحجم . (للهواء : $\gamma = C_p/C_v = 1.4$)، p الضغط، ρ الكثافة. ولكن في الغاز المثالي:

$$p = \frac{nRT}{V}$$

وبالتعويض عن ρ بدلالة V/nM تصبح العلاقة كالتّالي:

$$V_{ideal} = \sqrt{\gamma . \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma . R . T}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma . K . T}{m}}$$

حيث V_{ideal} سرعة الصوت في الغاز المثالي، R (تقريبا ٨.٣١٤٥ J^{-1} . mol K^{-1} الثابت الجزيئي للغاز، K ثابت بولتزمان، γ (جاما) العامل الاديباتي، T الحرارة المطلقة مقدرة بالكلفن، M الكتلة الجزيئية بالكيلوجرام لكل مول، m كتلة الجزيء الواحد بالكيلوجرام.

معامل ماخ : يعتبر معامل أو رقم ماخ مفيدا في حساب سرعة جسم ما نسبة إلى سرعة الصوت وهو دالة في الحرارة. بافتراض غاز مثالي يمكن اشتقاق رقم ماخ لتدفق تحت صوتي انضغاطي من معادلة بيرنولي.

$$M = \sqrt{5\left[\left(\frac{q_c}{P} + 1\right)^{\frac{2}{7}} - 1\right]}$$

حيث M رقم ماخ ، q_c الضغط المؤثر، P الضغط الساكن. وتشتق معادلة حساب رقم ماخ في جريان انضغاطي فوق صوتي من رقم رايلاي:

$$M = 0.88128485\sqrt{\left[\left(\frac{q_c}{P}+1\right)\left(1-\frac{1}{[7M^2]}\right)^{2.5}\right]}$$

يلاحظ وجود رقم ماخ M في طرفي المعادلة وبالتّالي يتمّ حلّ المعادلة بالتحليل العددي والاستعانة بالحاسوب.

سرعة الصوت في الاجسام الصلبة:

ينتقل الصوت في الاجسام الصابة في هيئة موجة طولية (حيث تكون اتجاه أرجحة الذرات موازيا لاتجاه تقدم الموجة) وكذلك في هيئة موجة عرضية (حيث يكون اتجاه تأرجح الذرات عموديا على اتجاه تقدم الموجة). وبالنسبة للموجة الطولية في مادة صلبة تعتمد سرعة الصوت على كثافة ρالمادة ، و نسبة بواسون μ و معامل يونج Y للمادة . وتنطبق المعادلتان :

$$V_{solid,\ longtudinal}=\sqrt{\frac{Y.(1-\mu)}{\rho(1-\mu-2\mu^2)}}$$

$$V_{solid,\ transversal}=\sqrt{\frac{Y}{2\rho(1+\mu)}}$$

سرعة الصوت في السوائل:

تحسب سرعة الصوت فى حالة السوائل من خلال المعادلة التالية:

$$V_{fluid} = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad , \quad B = -\Delta P/\Delta v$$

حيث B هو معامل المرونة الحجمى للسائل elastic modulus وρ هي الكثافة density، P الضغط ، v الحجم ، وبالتالي تكون سرعة الصوت في وسط من الهيليوم أسرع منها في الهواء لأن كثافة الهيليوم أقل من الهواء ، ونستنتج أيضا من المعادلة السابقة أن سرعة الصوت في المواد الصلبة اسرع من سرعة

الصوت فالمواد السائلة والمواد الغازية لأن معامل المرونة للمواد الصلبة أكبر من المواد الأخرى، وفي الجدول التالي يمكنك ان تتعرف على سرعة الصوت في مختلف المواد كما هو موضح بالجدول التالى :

الصلب		السائل ($25\ ^oC$)		الغاز	
الصلب	(m/s)	السائل	(m/s)	الغاز	(m/s)
الماس	١٢٠٠٠	الجلسرين	١٩٠٤	الهيدروجين ($0\ ^oC$)	1286
الزجاج المصقول	٥٦٤٠	مياه البحر	١٥٣٣	هيليوم ($0\ ^oC$)	٩٧٢
الحديد	٥١٣٠	الماء	١٤٩٣	الهواء ($20\ ^oC$)	342
الومنيوم	٥١٠٠	الزئبق	١٤٥٠	الهواء ($0\ ^oC$)	331
النحاس	٣٥٦٠	الكيروسن	١٣٢٤	-	-

بالمقارنة بين سرعات الصوت في المواد المختلفة وسرعة الضوء التي تبلغ 300000000m/s نستنتج سبب سماعنا لصوت الرعد يأتي بعد ضوء البرق ويمكن من معرفة الفارق الزمني بين رؤية البرق وسماع الرعد. تقدير بعد مصدر الصوت منا فكل فارق زمني قدره خمس ثواني واحدة يعني ان المصدر يبعد 1600m.

العلاقة بين تردد الصوت وشدته sound frequency and loudness

يميز الانسان الصوت من خلال تردده وشدته وكلا من التردد والشدة موضوعان مختلفان، **فتردد الصوت frequency** يمكن ان يكون مرتفع مثل صوت الكمان الموسيقي الذي يصدر اصوات ذات ترددات عالية أو ان يكون التردد منخفض مثل الأصوات الصادرة من الطبلة. والأذن البشرية تستطيع سماع الأصوات التي يقع ترددها في المدى من(٢٠ HZ إلى 20000Hz) التردد يقاس بوحدة الهيرتز وهي عدد الذبذبات في الثانية الواحدة) ويختلف هذا المدى من شخص لآخر ويقل هذا المدى للأعمار فوق الاربعين حيث يقل مدى الترددات العالية التي تستطيع الأذن سماعها إلى 10000Hz كما تجدر الأشارة إلى أن بعض الحيوانات مثل

الكلاب تستطيع سماع الترددات التي تصل إلى 50000Hz والخفاش يسمع الترددات التي تصل إلى 100000H.

تصنيف الصوت من حيث الترددات :

الترددات التي تقل عن 20Hz تسمى ترددات تحت سمعية أو انفراسونيك infrasonic بينما الترددات التي تفوق 200000Hz تسمى ترددات فوق سمعية أو التراسونيك ultrasonic والأجسام التي تنطلق بسرعة تفوق سرعة الصوت تنطلق بترددات عالية جداً صدمية أو سوبرسونيك.supersonic . فالاصوات التي تكون في مدى infrasonic مثل الاصوات التي تصدر من الزلازل والبراكين والمعدات الثقيلة يكون لها اثار مدمرة على حاسة السمع للأنسان.

عوامل اختلاف الأصوات أو النغمات:

العوامل التي تميز الأصوات أو النغمات بعضها عن بعض ثلاثة هي الجهارة ، والدرجة والنوع. وتعتمد الجهارة إلي حد كبير على شدة الصوت وتعتمد الدرجة على التردد ويعتمد النوع على تراكب النغمة الأساسية والنغمات التوافقية المصاحبة. وتتوافق هذه الخصائص أو العوامل تماما مع ثلاث كميات فيزيائية هي، التردد والسعة ونمط الموجة.

أولاً: الجهارة:-

يقصد بجهارة الصوت ذلك الإحساس السمعي بالصوت المسموع وهي ظاهرة فسيولوجية ويرتبط هذا الإحساس ارتباطاً وثيقاً بشدة الصوت. وتعرف شدة الصوت بأنها الطاقة الصوتية التي تمر في الثانية الواحدة بوحدة المساحات العمودية على اتجاه انتشار الأمواج. إذن تعتبر شدة الصوت كمية فيزيائية بينما تعتبرالجهارة درجة الإحساس بهذه الشدة أى تزداد جهارة الصوت بزيادة شدته والعكس صحيح.

مفهوم شـــدة الصـــوت (I)

تتوقف شدة الصوت على مجموعة من العوامل هى :

أ) المسافة بين مصدر الصوت والأذن (تتناسب شدة الصوت عكسياً مع مربع المسافة)

ب) سعة الاهتزازه لمصدر الصوت (تتناسب شدة الصوت طردياً مع مربع سعة الاهتزازه)

ج) مساحة السطح المهتز (تزداد شدة الصوت عند زيادة مساحة السطح المهتز)

د) كثافة الوسط (تزداد شدة الصوت بزيادة كقافة الوسط الذى ينتقل خلاله الصوت)

هـ) اتجاه الرياح (تزداد شدة الصوت إذا كان فى نفس اتجاه الرياح والعكس صحيح)

هي معدل الطاقة التي تعبر عمودياً وحدة المساحة أو هى القدرة المتدفقة عبر وحدة المساحة عمودياً على انتقال الموجة. و تقاس شدة الصوت بوحدة هي وات لكل وحدة مساحة (W/m^2) ، وتعتمد شدة الصوت على خواص الموجات الصوتية (تردد وسرعة) وعلى كثافة الوسط المار فيه (مثل الكثافة).

$$\text{Intensity} = \frac{\text{Energy}}{\text{Time} * \text{Area}} \quad \text{or} \quad \text{Intensity} = \frac{\text{Power}}{\text{Area}}$$

$$\boxed{I = \frac{P}{4\pi r^2}} \Longleftarrow \text{للموجة الكروية فقط}$$

حيث r تمثل البعد عن المصدر، P قدرة المصدر (وحدتها واط W). هذه العلاقة تبين أن شدة الصوت تتناسب طردياً مع قدرة المصدر $(I \propto P)$ وعكسياً مع مربع البعد عن المصدر $(I \propto \frac{1}{r^2})$ ، كما نستنتج انه بزيادة شدة الصوت يزيد ارتفاع الصوت.

علاقة شدة الصوت بالضغط

$$I = \frac{1}{2}\,\rho\, VA^2(2\pi f)^2 = \frac{1}{2}\,Z\,(A\omega)^2$$

حيث A سعة الذبذبة أي الأزاحة الكبرى لذرات أو جزيئات المادة من نقطة الأتزان، ω التردد الزاوي، Z المعاوقة الصوتية Acoustic Impedance [$Z = \rho v$ $kg/m^2.s$] ، وإذا كان (P) يمثل التغير النهائي في الضغط (أى متوسط الجذر التربيعي لضغط الموجات الصوتية). اذن :

$$I \propto P^2 \rightarrow \quad I = \frac{P^2}{2Z}$$

والشدة I المقابلة للضغط P تتغير بتغير **الحرارة** أما أرتفاع الصوت L (Loudness) تعتمد فقط على **الضغط** ، لذلك فأنة من المناسب وصف الضغط الناشئ عن الموجات الصوتية بواسطة مستوى الضغط الناتج عن ضغطين P_o & P ، اذن إرتفاع الصوت L يعطى من :

$$L = 2\,Log\left(\frac{P}{P_0}\right) Bel \;\; \& \;\; L = 20\,Log\left(\frac{P}{P_0}\right) dB$$

ملاحظات هامة

١-أقصى شدة يستطيع الأنسان سماعها هى $1\ W/m^2$؛ وتردد 1000 Hz؛ وضغط $29\ N/m^2$

٢-أقل شدة يستطيع الأنسان سماعها هى $10^{-12}\ W/m^2$؛ وتردد 20 Hz؛ وضغط $2.9x\ 10^{-5}\ N/m2$

كما بينا تستطيع الأذن البشرية سماع ذات الشدة المنخفضة التي تصل إلى$1x10^{-١٢}\ W/m^2$ مثل صوت حك اليدين بلطف ، وسماع الأصوات التي تصل شدتها إلى $1W/m^2$ ، والاصوات التي تزيد عن ذلك تسمع ولكن تسبب مشاكل وتكون مزعجة جداً. لاحظ أن مدى حساسية سماع الأذن هو مدى واسع جداً جداً بين الأصوت المنخفضة الشدة والأصوات المرتفعة الشدة والتي يصل اتساع هذا المدى إلى ترليون درجة 10^{12} ولهذا السبب استخدم تدريج لوغرتمي لقياس شدة الصوت بدلاً من وحدة W/m^2 وهذه الوحدة تسمى البيل Bel نسبة إلى العالم جراهام بيل Graham Bell مخترع الهاتف، وتستخدم وحدة البيل مقسومة على ١٠ لتعرف بوحدة الديسيبل decbel حيث أن

$$10\ dB = 1\ bel$$

<u>استنتاجات :</u>

١-عندما تنتشر موجة صوتية نجد أن شدة الصوت لهذه الموجات المنتشرة تضعف كلما بعدنا عن مصدر الصوت حيث تتوزع الطاقة على مساحة أكبر و شدة الصوت تعتمد على مربع التغير في ضغط الوسط كما تعتمد على مربع سعة الموجة

٢- كلما زادت كتلة الهواء المهتز كلما كان الصوت أعلى وأشد فنجد أن سماعة التليفون يمكننا أن نسمع بها بوضع إذا ما قربناها للآذان وذلك يرجع إلى أن الجزء المعدني الدائري بداخل السماعة له مساحة صغيرة مما يؤدى الى اهتزاز كمية الهواء الملاصقة لهذه المساحة فيكون الصوت أشد كلما اقتربنا منها. في حين أن سماعة الراديو أو التليفزيون يمكننا أن نسمع منها صوتاً أعلى وأشد وذلك يرجع إلى ان السماعة المخروطية الشكل لها مساحة سطح كبيرة نسبياً مما يؤدي الى اهتزاز كمية الهواء بشكل أكبر.

٣- مستوى الشدة : من أهم خواص الأذن أنها تستجيب لمختلف مستويات شدة الصوت بشكل يتناسب طردي اً مع log I و لذا فإن الوحدة المناسبة للقياس على المقياس السمعي للتعبير عن مستوى شدة الصوت هي وحدة الديسيبل.

والديسيبل (dB) : هو وحدة قياس لغارتمية تستخدم لقياس نسبة. فإذا فرضنا أن " جهارة الصوت" (مستوى الشدة)هي β فإن:

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

حيث I هى شدة الصوت المقاس ، I_oهى شدة الصوت الأصلية التي تم اختيارها وهي أقل شدة للصوت الذي يمكن أن تستشعره الأذن و تساوي 10-12W/m2 و تقاس β بوحدة " الديسيبل" .

للتعبير عن طريقة استجابة الإذن للأصوات بطريقة أفضل يُستخدم عادةً مقياس شدة الصوت، أو مقياس الديسيل، المبني على قوى الرقم ١٠.

ويمكن أن نلاحظ في مقياس الديسيبل أن الحد الأدنى لشدة الصوت المسموع بالكاد للإذن المتوسطة أي ($10^{-12}W/m^2$) هو الصفر في مقياس الديسيبل، وكلما ازدادت شدة الصوت ١٠ أضعاف يرتفع مستوى شدة الصوت بالديسيبل بمقدار ١٠ وحدات، وقد وجد أن الإذن تحكم على الأصوات طبقاً لمقياس الديسيبل.

<u>على سبيل المثال</u> : إذا كانت , I=1W/m2 فإن جهارة الصوت هي:

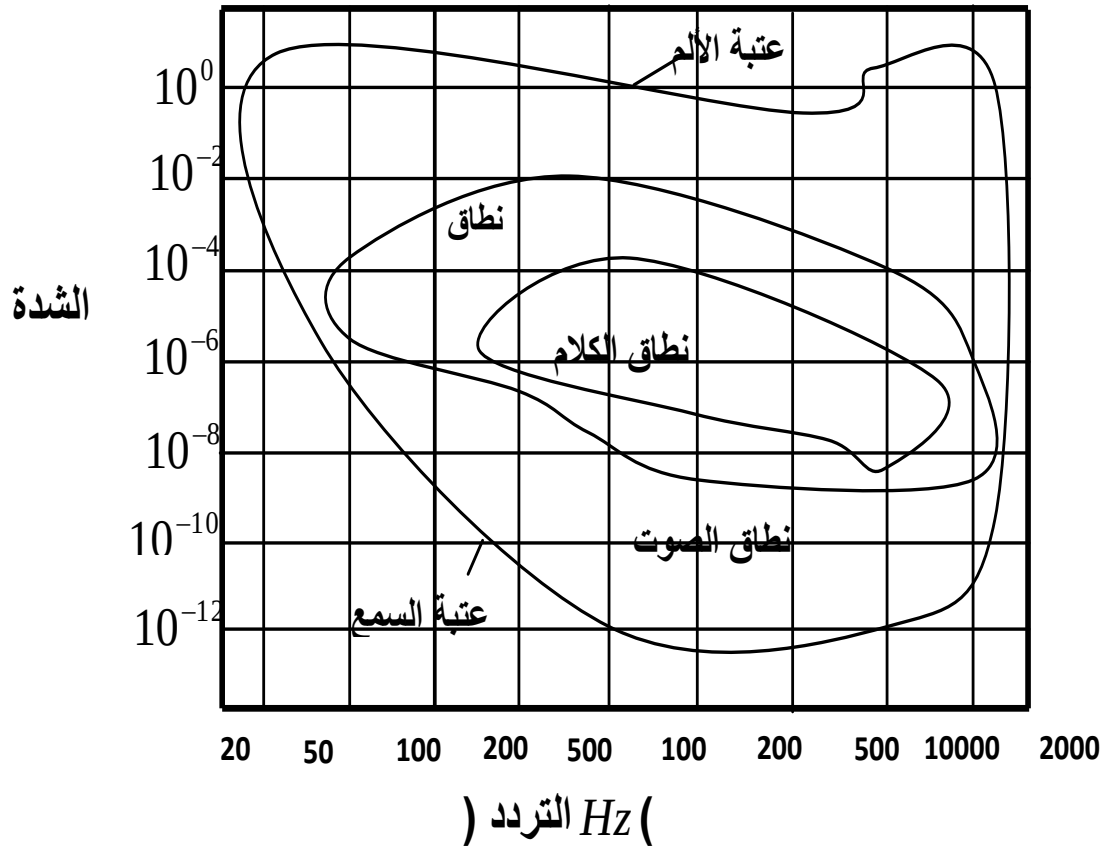
$$\beta = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} \qquad = 10 \text{ Log } 10^{12} = 120 \text{ dB}$$

و بهذه الطريقة يمكن حساب β المسموح بها في الحالات الطبيعية , و لهذه الحسابات تطبيقات كثيرة و بحوث مختلفة من أهمها " التلوث السمعي" (الضجيج) في المدن حيث يتم تجميع القياسات الميدانية في مناطق واختناقات محددة على الطرق و بخاصة من المناطق الصناعية والأحياء المزدحمة ولقد وجد أن القيمة المناسبة "لجهارة الصوت " التي يمكن للأذن أن تتحملها تساوي 90dB تقريب .

نوع الصوت	ى شدة الصوت (ديسبل)	نوع الصوت	ستوى شدة الصوت (ديسبل)
عتبة السمع	صفر	ساعة توقيت أو صوت المذياع	٨٠
حفيف الأوراق	١٠	قطار يسير في محطة	٩٠
غرفة هادئة (معدل الهمس)	٢٠	ة أحجار تعمل بالهواء المضغوط	١٠٠
مكتبة عامة	٣٠	الرعد	١٠٠ – ١١٠
غرفة معتدلة الهدوء	٤٠	تحليق الطائرات	١١٥ – ١٢٠
غرفة طعام	٥٠	المدفع الرشاش	١٣٠
تخاطب اعتيادي	٦٠	عتبة الألم	١٤٠
المرور في شارع عام	٧٠	تلف طبلة الأذن	١٦٠
محرك صاروخي	١٨٠		

<u>العلاقة بين شدة الصوت ومستوى شدة الصوت</u>

الصوت (W/m^2)	10^{-}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-}	10^{-}	10^{-}	10^{-}	10^{-}	10^{-}	10^{-2}	10^{-1}	10
ى شدة الصوت(dB)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	١٢



يوضح الرسم ما يلى :

١-الأصوات التي يقل ترددها عن **(20Hz)** والتي يزيد ترددها عن **(20000Hz)** لا يمكن سماعها مهما كانت شدتها .

٢-الاصوات ذات الترددات المنخفضة والأصوات ذات الترددات المرتفعة لا تسمع إلا على شدة كبيرة نسبياً .

٣-عتبة السمع وعتبة الألم يلتقيان عند الطرفين الأدنى والأعلى للطيف .

٤-عتبة السمع تقع ضمن الترددات $(50\,HZ)$ و $(12000\,Hz)$. وعند عتبة السمع تكون الشدة = $(10^{-12}\,W/m^2)$.

٥-بينما عند عتبة الألم تكون الشدة = $\left(10^{0}\,1W/m^2\right)$.

ثانياً : الدرجـة:-

درجة الصوت هي كمية فسيولوجية تتوقف على التردد (كلما زاد تردد الصوت تزداد درجته ويصبح الصوت حاد والعكس عندما يقل تردد الصوت تقل درجته ويصبح غليظ. اذن هى مقياس مدى حدة الصوت المسموع

أو غلظته . فالصوت الحاد تكون درجته مرتفعة وتردده مرتفع. والصوت الغليظ تكون درجته منخفضة وتردده منخفض. فصوت الرجل أغلظ من صوت المرأة وصوت الطبول أغلظ من صوت الأجراس. فإذا كان الصوت حاداً قيل فأن درجته تكون عالية وإن كان غليظاً فإن درجته تكون منخفضة.

ثالثاً: نوع الصوت:-

يتوقف نوع الصوت على النغمات التوافقية . عند استخدم شوكة رنانة ، ووتر عود ، ووتر كمان وأطرق كل منها على حدة للحصول على ثلاثة نغمات متساوية في الشدة ومتفقة في الدرجة فإنه يمكن للإنسان أن يميز نوع الصوت الصادر من كل واحد منها على حدة من حيث مصدر هذا الصوت. مثل هذه الخاصية التي تميز بها الأذن الأصوات أو النغمات المتساوية في الشدة والمتفقة في الدرجة والتي تصدر من مصادر صوتية مختلفة تسمي نوع الصوت.

تقسيم الموجات الصوتية طبقا للتردد

١-الموجات المسموعة

هي تلك الموجات التي تقع ترددتها بين ٢٠ هرتز و٢٠.٠٠٠ هرتز، وتمثل الصوت المسموع بواسطة الأذن البشرية العادية. حيث أن الحد الأدنى لتردد الصوت التي تحس بها الأذن البشرية الطبيعية هو ٢٠ هيرتز تقريبا بينما الحد الأعلى هو ٢٠ الف هرتز، وينخفض هذا المدى عند كبار السن إلى حوالي ١٢.٠٠٠ هرتز. وأقصى درجات الإحساس بالصوت لأذن بشرية عادية يقع في المدى بين ٥٠٠٠ هيرتز و٨٠٠٠ هيرتز والذي يشمل ذبذبات الحروف الهجائية. وكما هو معروف يمكن أحداث الموجات السمعية عن طريق الاحبال الصوتية في الإنسان والآلات الموسيقية سواء الوترية أو النحاسية أو الأنبوبية وغيرها من الآلات الأخرى.

٢-الموجات الفوق سمعية

هي الموجات التي تزيد ترددتها على ٢٠ الف هيرتز والتي تقع خارج نطاق حاسة الاذن البشرية. وهذا النوع من الموجات ما زال موضع بحث واهتمام مكثف نظرا للتطبيقات المهمة التي تمس مجالات عديدة في الصناعة والطب وغيرهما. وقد أصبح بالإمكان إنتاج موجات فوق صوتية تزيد ترددتها على ١٠٠٠٠٠٠ هيرتز ولاتختلف هذه الموجات من حيث الخواص عن الموجات الصوتية الاخرى إلا أنه نظرا لقصر طول موجاتها فإنه بالإمكان تنتقل على هيئة أشعة دقيقة عالية الطاقة.

٣-الموجات تحت السمعية

هي الموجات الصوتية التي يقل ترددها عن ٢٠ هرتز ولاتستطيع الاذن البشرية الإحساس بها واهم مصدر لها هو الحركة الاهتزازية والانزلاقية لطبقات القشرة الأرضية وما ينتج عنها من زلازل وبراكين وعليه انها مهمة جدا في رصد الزلازل وتتبع نشاط البراكين. وتستطيع بعض الحيونات الإحساس بالزلازل قبل حدوثها .

بعض التطبيقات العملية لإستخدام الأمواج فوق السمعية أو الصوتية

١- **الكشف عن الطائرات في الجو والغواصات في أعماق البحار**

نظراً لإمكانية الحصول علي إشارات موجهة في الموجات فوق الصوتية فإن هذه الموجات تستخدم للكشف عن وجود الطائرات والغواصات ، فعندما تسقط الموجات فوق الصوتية على طائرة مثلاً فإنها تنعكس عنها ويمكن الكشف عن الموجة المنعكسة باستخدام مستقبل مصنوع من بلورة من الكوارتز وتسمي السونار وتستخدم في الكشف عن حطام السفن في الأعماق.

٢- **قياس عمق البحر:**

يمكن قياس عمق البحار بقياس الزمن الذي يمضي بين أصدار الموجات فوق الصوتية واستقبالها بعد انعكاسها من الأعماق.

وقد تم تصميم جهاز مبني علي هذه القاعدة بحيث يعطي العمق مباشرة. وفي هذا الجهاز تستخدم موجات فوق صوتية ذات تردد عالي ويوضع المرسل والمستقبل بجوار بعضهما ، ويمكن حساب العمق من العلاقة:

العمق = سرعة الصوت × زمن الذهاب والعودة للموجات فوق الصوتية

٣- **التأثير الميكانيكى:-**

إذا سقطت أمواج فوق صوتية ذات تردد عالي مركزه على لوح زجاجي أو معدني فإنها تكون قادرة على حفر ثقب في هذا اللوح. كما أنها تكون قادرة أيضاً على حفر ثقب في سبيكة أو معدن صلب أو حتي في الماس.

كما أن الموجات فوق الصوتية ذات التردد ٦٠٠٠٠ ذبذبة/ثانية قادرة علي فصل المادة الزيتية من المعادن ولهذا يستخدمها المهندسون لإزالة الشحم أو التراب وخلافه.

ويستخدم الأطباء الموجات فوق الصوتية لعلاج وشفاء:-

* الآلام العصبية.
* الآلام الروماتزمية.
* التخلص من الأنسجة المتقيحة في مختلف أنحاء الجسم.

* التخلص من الحصوات الكلوية والمرارية.

٤- **الكشف عن الشقوق فى المعادن:**

توجه الذبذبات من بلورة من الكوارتز في مولد ذبذبات فوق الصوتية إلي المعدن المراد اختياره من إحدي نهايته. وعند الطرف الآخر يوجد كاشف لهذه الموجات المتصل براسم ذبذبات كاثودي عن طريق مكبر.

فإذا لم يكن هناك تغير في نبضة الموجه المستقبله عن الموجة الساقطة كان المعدن سليماً. إما إذا كان هناك شقاً في المعدن كانت هناك زيادة في النبضات المستقبلة.

٥- **صناعة بعض السبائك:**

تستخدم حزمة قوية من الموجات فوق الصوتية في تحضير بعض السبائك ذات التركيب المنتظم. ويتضح من هذا أهمية هذه الموجات في علم المعادن.

٦- **التأثير البيولوجى:**

وجد بعض العلماء أن الموجات فوق الصوتية يمكنها قتل بعض الأسماك والضفادع والفئران إذا وضعت في مجال الموجات فوق الصوتية كما أن هذه الموجات لها القدرة على إيقاف نمو الخميرة إذا تعرضت لها. كما سيأتي اليوم الذي يمكننا فيه قتل الحشرات مثل البعوض والذباب باستخدام مثل هذه الموجات فوق الصوتية.