الفصل السابع

7. الحركة الموجية والصوت

7. 1. المقدمة

إن تأثير قوة خارجية لحظية في جسم ما تجعل جزيئاته الواقعة تحت تأثير هذه القوة البدء في التحرك حركة اهتزازية حول مراكز اتزانها، ثم تنتقل الحركة منها إلى ما يليها من الجزيئات وهكذا.

تعطي الحركات المتتالية لهذه الجزيئات دفعة اضطراب تنتقل خلال الجسم، ويتخذ مثل هذا الاضطراب أشكالاً متعددة داخل الجسم تبعاً لطبيعة الجسم واتجاه القوى التي تحدث الاضطراب الذي يسمى عادة بالحركة الموجية. وأهم الموجات الحادثة نوعان هما:

1- الموجة العرضية:

إذا كان اتجاه حركة جسيمات المادة الحاملة للموجة عمودياً على جهة حركة الموجة نفسها فإن الموجة تسمى موجة عرضية. مثال على ذلك حبل مثبت من طرف واحد بينما يندفع طرفه الآخر إلى أعلى ثم إلى أسفل في حركة اهتزازية في هذه الحالة ينتقل الاضطراب خلال الحبل بينما تهتز جسيمات الحبل في حركة توافقية بسيطة في اتجاه عمودي على جهة انتشار الاضطراب.

ومن أمثلة الموجات العرضية موجات الضوء وهي موجات كهرمغنطيسية فيها الحقلان المغنطيسي والكهربائي عموديان على جهة انتشار الموجة.

2- الموجات الطولية:

تهتز جسيمات المادة فيها بجهة انتشار الموجة مثال على ذلك اهتزاز حلقات النابض في جهة حركة الموجة

7. 2. الجانب الذاتي للصوت

هناك سؤال يطرح نفسه دائماً: إذا حدث انفجار هائل في صحراء شاسعة ولم تكن هناك أذن تسمع الانفجار فهل هناك صوت ؟ للإجابة عن هذا السؤال نقول طبعاً إن هناك صوتاً، ولكن عدم سماع ذلك الصوت لا يعني عدم وجوده بل عدم وصوله إذن السامع. ومن هنا تظهر أهمية تعريف الصوت.

فمن وجهة نظر الفيزياء ما نطلق عليه كلمة (صوت) ما هو إلا سلسلة من المتتابعات السريعة لتضاغطات وتخلخلات متتالية في الهواء.

أما من وجهة النظر الفيزيولوجية فإن ما نطلق عليه كلمة (صوت) هو الإحساس بالسمع الناتج من دخول المتتابعات السريعة للتضاعفات والتخلخلات في الهواء إلى الأذن البشرية.

والموجات السمعية تقتصر على مدى التردد الذي يمكنه أن يهيئ الأذن البشرية والمخ للإحساس بالسمع، ويمتد هذا المدى من حوالي *20* هرتز إلى حوالي *20000* هرتز ويقال له مدى السمع. وهكذا يتضح أن الإجابة على السؤال تتوقف على التعريف الذي يعرف به الصوت.

إن مصادر الموجات السمعية في الطبيعة كثيرة جداً وهي الأوتار المهتزة (مثل أوتار الكمان والبيانو والقيثارة والحبال الصوتية للإنسان) والأعمدة الهوائية المهتزة (مثل الأرغن وأنابيب الرنين ومخمد الأصوات في السيارات) والصفائح والأغشية الرقيقة المهتزة (مثل الطبول والدفوف وأجهزة تكبير الصوت) وغيرها كثير.

وتختلف استجابة الأذن البشرية للصوت المسموع باختلاف خواص الصوت من حيث الشدة والتردد والطابع. ومن المفيد جداً أن نتعرف على استجابة الأذن للصوت قبل التطرق لتأثير كل من الشدة والتردد والطابع على الأذن.

7. 3. استجابة الأذن البشرية للصوت

إن الأذن البشرية هي جهاز فائق الحساسية للصوت يفوق في تحسسه أدق الأجهزة المصنوعة لهذا الغرض.

وهناك حدود لحساسية الأذن للصوت من حيث الشدة والتردد، فالحد الأدنى لشدة الصوت المسموع هو 10^{-12} واط لكل متر مربع وهذا يقابل أضعف صوت تحسه الأذن البشرية ويعادل ضغط صوتي مقداره 20×10^{-6} باسكال (20×10^{-6} نيوتن/م^2) وهذا الحد من الضغط يدعى بحافة السمع (أو عتبة السمع).

إن هذا التغير الضئيل في مقدار الضغط الجوي 20×10^{-6} باسكال (ويعادل جزءاً واحداً من 5000000000 جزء من الضغط الجوي الاعتيادي) يسبب إزاحة لغشاء الطبل بمسافة تقل عن قطر جزيء الهيدروجين.

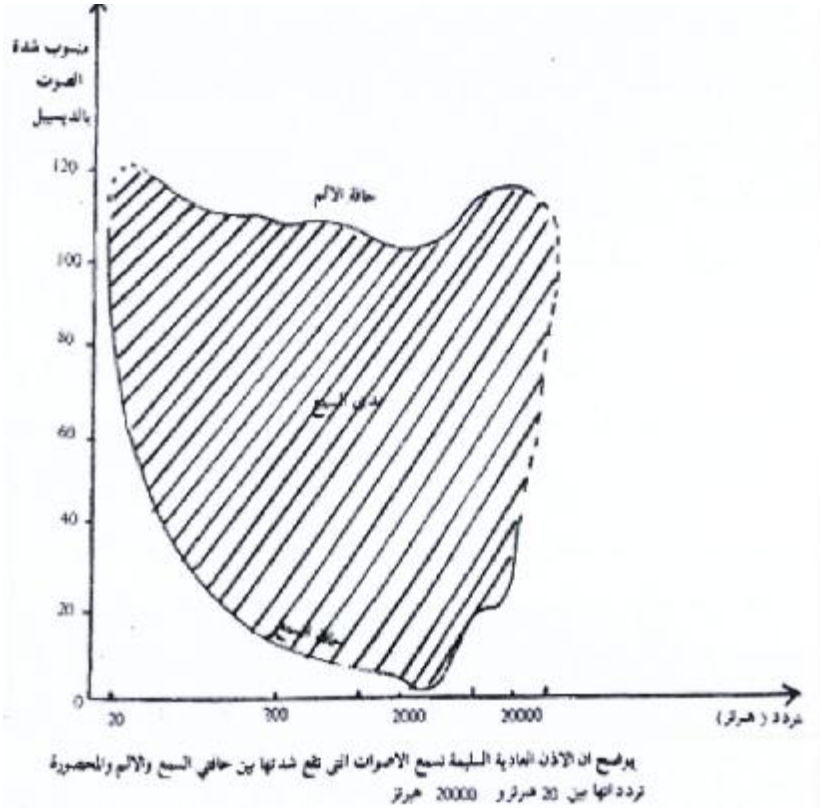
ومع هذه الحساسية الزائدة فإن الأذن البشرية تتحمل ضغطاً صوتياً يفوق قيمة أدنى ضغط صوتي مسموع بأكبر من مليون مرة، وهذا الحد من الضغط يدعى بعتبة الألم.

وهكذا يتضح أن الأذن البشرية العادية تحس بالموجات التضاغطية كصوت إذا كان ضغطها الصوتي يتراوح بين الحدين 20×10^{-6} باسكال إلى 20 باسكال وإذا كان ضغط الصوت أقل من 20×10^{-6} باسكال فأنه لم يعد مسموعاً، وإذا زاد عن 20 باسكال يسبب الألم للأذن.

أما من ناحية التردد فإن الأذن البشرية العادية تسمع الأصوات التي تقع ترددتها ضمن المدى المحصور بين حوالي 20 هرتز إلى حوالي 20000 هرتز، أما الموجات التي تقع ترددتها خارج هذا المجال فلا يمكن للأذن البشرية أن تتحسسها كصوت، وتسمى الموجات التي يقل ترددها عن 20 هرتز

بالموجات تحت السمعية وتسمى الموجات التي يزيد ترددها عن *20000* هرتز بالموجات فوق السمعية.

إن الشكل (7.1) يوضح مجالات الشدة والتردد للموجات التضاغطية التي يمكن للأذن العادية أن تحسها كصوت.



يوضح ان الأذن العادية السليمة تسمع الأصوات التي تقع شدتها بين حافتي السمع والألم والمحصورة ترددا تها بين 20 هرتز و 20000 هرتز

الشكل (7.1)

في هذا الشكل نلحظ أن أدنى شدة للصوت المسموع التي تمثل حافة السمع ليمت ثابتة مع التردد، إذ يلاحظ أن الأذن العادية تكون حساسيتها أعظم ما يمكن للأصوات التي تقع ترددا تها ضمن المجال المحصور بين حوالي *700*

هرتز و *6000* هرتز وفي هذا المجال تكون قيمة أقل ضغط صوتي مسموع هي 20.10^{-6} باسكال ولهذا السبب تم اعتبار هذه القيمة مرجعية في الصوتيات.

وتضعف حساسية الأذن للصوت كلما ابتعد التردد عن هذا المجال سواء بالزيادة أو بالنقصان، وعند الترددات المنخفضة التي تقل عن حوالي *30* هرتز أو الترددات العالية التي تزيد عن حوالي *12000* هرتز تكون الأذن العادية غير حساسة إلى حد بعيد، مما يقتضي أن ترتفع شدة الصوت كثيراً لكي يمكن سماعه.

ويلاحظ من الشكل أيضاً أن شدة الصوت التي تسبب الألم للأذن (عتبة الألم) تكاد تكون ثابتة مع التردد.

مما تقدم يتبين أن استجابة الأذن السليمة للصوت ليست خطية بل معقدة وتختلف باختلاف تردد الصوت وشدته، وهذه الصفة المميزة للأذن البشرية تفيد كثيراً في تمييز الأصوات المختلفة. وأهم الخصائص التي يعتمدها السامع لتمييز الأصوات المختلفة هي العلو والدرجة والنوعية.

7. 4. العلو

يرتبط العلو بشدة الصوت، فإذا كانت تعّرف الشدة بأنها المعدل الزمني لتدفق الطاقة الصوتية خلال وحدة المساحة وهي كمية فيزيائية يمكن قياسها وحسابها بدقة إلا أن العلو يتوقف على تأثير شدة الصوت على الأذن (أي على حُكم السامع).

وعليه يعرف العلو بأنه ذلك الإحساس الذي يتوقف على شدة الصوت المسموع، ومع أن علو الصوت يزداد مع ازدياد شدته إلا أن الأذن ليست بنفس الحساسية للأصوات ذات الترددات المختلفة ونتيجة لذلك فالأذن لا تستطيع سماع الصوت ذي التردد العالي بنفس العلو الذي تسمع به صوتاً تردده أقل وشدته مساوية لشدة الصوت الأول.

إن استجابة الأذن البشرية للأصوات التي لها نفس التردد ولكنها تختلف

بالشدة تتغير لوغاريتمياً وليس خطياً، وهذه النتيجة تتفق مع علقة فيزيولوجية أكثر شمولاً تدعى قانون ويبر-فيخنر (*weber – Fechner law*) وطبقاً لهذا القانون:

مقدار الإحساس يتناسب طردياً مع لوغاريتم الشدة

فإذا فرضنا أن مقدار الإحساس (لعلو الصوت) هو L وأن شدة الصوت I فإن:

$$L \propto LogI \qquad (7.1)$$

ويجب أن نلاحظ أن هذا القانون لا ينطبق بدقة عند حدود السمع الدنيا والعليا (أي قرب حافتي السمع والألم) أما في المجالات الأخرى فإن القانون يعطي نتاج جيدة.

ومن العلاقة الأخيرة نحصل على:

$$L = KLogI \qquad (7.2)$$

حيث أن K مقدار ثابت.

وبمفاضلة (7.2) نجد أن:

$$\frac{dL}{dI} = \frac{K}{I} \qquad (7.3)$$

أن المقدار $\frac{dL}{dI}$ يدعى بحساسية الأذن.

ويلاحظ من هذه العلاقة أن حساسية الأذن تقل مع زيادة شدة الصوت، وهذا يعنى أن الأذن تحس التغيرات في شدة الصوت بشكل أفضل كلما قلت شدة الصوت المسموع.

أي بعبارة أخرى أن شدة الصوت يجب أن تصبح عشرة أمثالها لكي تحسها الأذن وكأنها أصبحت أعلى مرتين، وأن الشدة يجب أن تتضاعف مئة مرة لتبدو للأذن أنها أعلى بثلاث مرات وهكذا ....

ولما كان العلو هو إحساس سمعي يتوقف على حكم السامع ذاته أي أنه

ظاهرة فيزيولوجية وليست فيزيائية لذلك فإنه يتعذر قياسه بدقة بأي جهاز.

إن علو الصوت يعتمد على شدة الصوت وحساسية الأذن بينما شدة الصوت تعتمد على عدة عوامل أهمها:

1- سعة الاهتزاز للمصدر:

إن شدة الصوت الناتج من أي مصدر صوتي تتناسب طرداً مع مربع سعة الاهتزاز.

2- المساحة السطحية للسطح المهتز:

إن شدة الصوت الناتج من مصدر مهتز تتناسب طرداً مع مساحة السطح المهتز.

3- المسافة بين المصدر والمستلم:

حيث أن شدة الصوت تتناسب عكساً مع مربع المسافة الفاصلة بين المصدر ونقطة الاستلام.

7. 5. درجة الصوت

تعرف درجة الصوت بأنها ذلك الإحساس الذاتي الذي يتوقف على تردد الصوت المسموع، أي أنها حدة نغمة الصوت كما تشعره الأذن البشرية، فمثلاً عند نقر وتر مشدود فإن الوتر يهتز ويستطيع أي سامع أن يقرر درجة الصوت الناتج من اهتزاز الوتر وإذا ما ازداد الشد في الوتر فإن تردد الاهتزاز يرتفع ويستطيع السامع أن يقرر حالاً أن درجة الصوت الجديد أعلى من درجة الصوت الأول، وفي هاتين الحالتين تعد درجة الصوت مرادفة لتردده وهكذا يتضح أن درجة الصوت هي الحكم الذي يصدره السامع على الأصوات ويرتبها وفق سلم في مخه وفق إحساسه لترددها.

إن درجة الصوت لا تعتمد على علو الصوت أو نوعيته، فأصوات

النساء والأطفال درجاتها عالية لأن ترددتها مرتفعة بينما صوت الرجل الكبير درجته منخفضة وأجش لأن تردده منخفض.

إذا كان الصوت المسموع ذا تردد منفرد (نغمة نقية) فعندئذ يمكن تمييزه تماماً بمعرفة علوه ودرجته فقط، أما إذا كان الصوت معقداً أي مركباً من خليط من الترددات فعندئذ نحتاج لتعيين، إلى معرفة علوه ودرجته ونوعيته.

7. 6. نوعية النغمة أو الصوت

إن نوعية النغمة هي التي تمكننا من التمييز بين صوتين لهما العلو نفسه والدرجة نفسها ولكنهما صادران من مصدرين مختلفين، وهذا يعزى إلى الاختلاف في عدد وترتيب وشدة التوافقيات التي يتألف منها كل صوت.

فمثلاً لو كان لدينا صونومتران فيهما وتران متماثلان تماماً من حيث قوة الشد والطول ومساحة المقطع العرضي والكثافة، وسمح لكلا الوترين بالاهتزاز بوساطة قوس يمر عليهما بنفس الوقت، ثم لمس الوتر الأول من منتصفه والثاني من ربعه لمساً خفيفاً فعندئذ سنلاحظ أن الوتر الأول سيهتز بكامله وبجزأين في نفس الوقت كما مبين في الشكل (7.2).

الشكل (7.2)

(أ): الوتر يهتز بكامله وبجزأين (النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الأولى)

(ب):الوتر يهتز بكامله وبأربع أجزاء (النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الثالثة)

وبذلك ينتج نغمتان هما: النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الأولى، بينما

الوتر الثاني سيهتز بكامله وبأربع أجزاء بنفس الوقت كما هو مبين في الشكل (7.2)، وبذلك تنتج نغمتان هما: النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الثالثة.

وعند سماع الصوتين الناتجين من اهتزاز الوترين نلاحظ أن هناك اختلافاً بينهما ناتجاً من اختلاف النوعية، وهذا يعزى إلى اختلاف النغمات التوافقية المصاحبة للنغمة الأساسية.

وعلى هذا الأساس يمكن التمييز بين الأصوات المنبعثة من الآلات المختلفة في جوقة موسيقية حتى وإن كانت جميعها تعزف نغماً واحداً بالشدة نفسها.

ومن الجدير بالملاحظة أن النغمات الموسيقية الممزوجة بالتوافقيات يكون صوتها غنياً وجميلاً وبدون هذه التوافقيات يكون الصوت ثقيلاً وفي الواقع لو كانت جميع الآلات الموسيقية تبعث نغمات نقية خالية من التوافقيات تماماً لكانت أصواتها متشابهة وليس لها عذوبة أو جرس موسيقي.

ولو فرضنا أن شخصاً يناديك، فإنك ستدرك حال سماعه من خلال علو ودرجة صوته إن كان صوت رجل أو طفل أو امرأة، أما نوعية الصوت فستساعدك على التعرف على الشخص المنادي وتميزه، وهذا هو السبب الذي يجعل صفة الصوت (النوعية) تؤدي دوراً مهماً في تمييز الأصوات، وإلا فإن أصوات كافة الأشخاص ستكون متشابهة.

7. 7. الأصوات الصامتة (أو غير المسموعة)

لقد وجدنا أن الموجات الصوتية المسموعة هي تلك التي لا يقل ضغطها الصوتي عن 20.10^{-6} باسكال ويتراوح ترددها بين *20* هرتز و*20000* هرتز.

أما الموجات التي تقع ترددتها خارج هذا المجال من التردد فإنها غير

مسموعة، وتسمى الموجات التي يقل ترددها عن *20* هرتز بالموجات تحت السمعية ومثل هذه الموجات تتولد عادة عن المصادر الضخمة كما عند الهزات الأرضية أو العواصف أو الأعاصير، وتسمى الموجات التي يزيد ترددها عن *20000* هرتز بالموجات فوق السمعية ويمكن توليدها بوساطة الاهتزازات المرنة لبلورة الكوارتز التي تتجاوب مع مجال كهربائي متناوب (التأثير الكهروضغطي) وقد أمكن بهذه الطريقة توليد موجات فوق سمعية تزيد تردداتها عن 6.10^8 هرتز وفي هذه الحالة يكون الطول الموجي المقابل في الهواء حوالي 5.10^{-5} سم وهو ما يتساوى مع طول الموجات الضوئية، ولهذه الموجات تطبيقات عملية واسعة في عالم اليوم وسيكون لها شأن كبير في عالم المستقبل.

7. 8. المستوى الصوتي وواحداته

إن الحد الأدنى لشدة الصوت المسموع بالكاد للأذن البشرية السليمة هو 10^{12} واط لكل متر مربع (وهذا يقابل ضغطاً صوتياً قيمته 20.10^{-6} باسكال أي 20.10^{-6} نيوتن لكل متر مربع) بينما الحد الأقصى لشدة الصوت الذي يمكن للأذن العادية أن تتحمله هو حوالي *1* واط لكل متر مربع (وهذا يقابل ضغطاً صوتياً قيمته *20* باسكال).

من هذه القيم يتضح أن مدى شدة الصوت الذي تستطيع الأذن أن تسمعه واسع جداً، وهذا يقتضي التعامل مع أرقام هائلة تتراوح قيمتها بين 10^{-12} و*1* واط لكل متر مربع، وهذا أمر غير عملي تماماً.

وقد وجدنا من قانون ويبر-فيخنر أن استجابة الأذن البشرية لشدة الصوت المسموع هي لوغاريتمية وليست خطية، أي أن الإحساس بعلو الصوت في أي تردد معين لا يزداد خطياً مع الشدة بل مع لوغاريتم الشدة.

وعلى ضوء هذه الحقائق يمكن اقتراح وحدة مقياس لوغاريتمي لشدة الصوت المسموح يتحقق منه فائدتان هما:

أولاً: أنه يعطي تقريباً أفضل بكثير للإحساس البشري للعلو النسبي للصوت من مقياس وحدة الشدة المباشر.

ثانياً: أنه يضغط مجال الأرقام الهائلة التي يصعب التعامل معها إلى أرقام عملية صغيرة نسبياً يسهل تداولها.

وعليه يمكن تعريف المقياس اللوغاريتمي لشدة الصوت في شكل رياضي كما يلي:

$$\text{منسوب شدة الصوت} = \log\frac{I}{I_0} \text{ بيل} \qquad (7.4)$$

حيث I هي شدة الصوت المقاس بوحدة الواط لكل متر مربع وI_0 هي شدة الصوت المرجعية وهي كمية اختيارية وتؤخذ عادة مساوية للحد الأدنى لشدة الصوت المسموع وهي 10^{-12} واط لكل متر مربع.

إن وحدة منسوب شدة الصوت هي الـــ (بل) نصبة إلى الكساندر غراهام بل مخترع التليفون، وعملياً تعدّ وحدة الـــ(بل) كبيرة لذلك يفضل استخدام غالباً الديسيبل وهذه:

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

وهكذا يتضح أن الديسيبل ليست وحدة قياس مطلقة، بل إنها لوغاريتم النسبة بيم القيمة المقاسة وأخرى مرجعية متفق عليها وهي حافة السمع.

وعلى هذا الأساس فإن منسوب شدة الصوت عند حافة السمع هو 0 ديسيبل ومنسوب شدة الصوت عند عتبة الألم هو 120 ديسيبل، وأن نغمة صوتية شدتها *10* مرات القيمة المرجعية للشدة لها منسوب شدة يساوي *1* بيل أو *10* ديسيبل وصوت له شدة تعادل *100* مرة القيمة المرجعية للشدة لها

منسوب شدة يعادل *2* بيل أو *20* ديسيبل.

ونلاحظ إذا ازداد منسوب شدة الصوت بمقدار *1* ديسيبل، فإن هذا يعني زيادة في شدة الصوت تعادل *26* بالمئة، والأذن السليمة تدرك حسياً هذا المقدار من الزيادة في الشدة في المدى المتوسط من الترددات المسموعة، وعليه فإن أقل تغير في منسوب الشدة يمكن أن تحسه الأذن البشرية العادية هو *1* ديسيبل. ولما كانت معظم أجهزة القياس تعطي القياس المباشر للضغط الصوتي وليس الشدة، وحيث أن شدة الصوت I تتناسب طردياً مع مربع الضغط الصوتي لذلك فإن:

$$\text{منسوب شدة الصوت بالديسيبل} = 10\log\left(\frac{P}{P_0}\right)^2$$

حيث أن P هو الضغط الصوتي المقاس وأن P_0 هو الضغط الصوتي المرجعي ويساوي 2.10^{-5} نيوتن لكل متر مربع وهو يمثل أقل ضغط صوتي مسموح أي حافة السمع والعلاقة الأخيرة تصبح:

$$\text{منسوب الضغط الصوتي بالديسيبل} = 20\log\frac{P}{P_0}$$

وهذا يساوي عددياً منسوب شدة الصوت بالديسيبل. والجدول (*1*) يبين القيم التقريبية لشدة بعض الأصوات حينما يكون الشخص السامع قريباً من مصدر الصوت.

الجدول (7.1)

يبين القيم التجريبية لمنسوب شدة بعض الأصوات

نوع مصدر الصوت	منسوب شدة الصوت بالديسيبل
طنين الذبابة (أدنى صوت مسموع)	0
حفيف الشجر - غرفة النوم	10
الهمس المتوسط العلو	15-20
في مكتبة عامة	30
الموسيقى الخفيفة	40
في غرفة الطعام	50
التخاطب العادي	60-65
رنين الهاتف	60-70
طريق كثيف المرور	70-85
ساعة توقيت	80
زئير الأسد (على بعد 6 متر) والشلال	90
ثقابة الصخور تعمل بالهواء المضغوط	100
الرعد	100-110
مطار الطائرات النفاثة (عند التحليق)	115-120
المدفع الرشاش	130
منطقة هبوط حاملة الطائرات (على بعد 20 متر)	150-155
الصاروخ الفضائي	175

7. 9. الضوضاء أو الضجيج

يمكن أن تصنف الأصوات المسموعة علمياً إلى صنفين:

أ- الأصوات الموسيقية

الأصوات الموسيقية هي تلك الأصوات المسموعة وتمتاز بكونها أصواتاً ذات إيقاع خاص أو تكرار دوري محدد، وعليه تعدّ الأصوات الناتجة من اهتزاز أوتار الكمان أو عزف الناي هي أصوات موسيقية.

بينما الأصوات التي تولد تأثيراً مزعجاً للأذن البشرية تدعى بالضجيج، وتمتاز بكونها أصوات متقطعة وغير دورية وتنتج عادة من عدم انتظام الاهتزاز في المصدر الصوتي مثل الأصوات المتولدة من دق المطرقة أو سقوط طبق على الأرض، أو بوق سيارة أو مدفع.

لقد اعتمدنا في تصنيف الأصوات المسموعة بأنها موسيقية أو ضجيجاً استنادا إلى طبيعتها. ولما كان السامع هو الحكم النهائي الذي يقرع مدى تقبله أو رفضه للأصوات المسموعة لذلك يجب أن نضع تعريفاً شاملاً للضجيج يراعى فيه أساسا رد فعل السامع وليس طبيعة الصوت المسموع وعلى هذا الأساس يكون التعريف الذاتي للضجيج بأنه:

(أي صوت مسموع غير مرغوب فيه) وهذا يعني أن ما يمكن عده ضجيجاً في وقت من الأوقات قد لا يكون كذلك في وقت آخر وأن أرق الأصوات الموسيقية قد يعد ضجيجاً بالنسبة للسامع إن لم يكن راغباً في سماعها فعلاً لسبب من الأسباب.

ورغم أن هذا التعريف ليس موضوعياً لأنه يستند على عوامل ذاتية للسامع إلا أنه معتمد ويعول عليه دولياً بشكل عام.

إن الضجيج تأثير في صحة الإنسان يتوقف على الشدة والتردد وفترة التعرض.

7. 10. ظاهرة التشتت

يمكن وصف ظاهرة التشتت بأنها التغير في سرعة تقدم الموجة الجيبية في الوسط المادي مع الطول الموجي أو التردد. وعموماً فإن أي إشارة أو اضطراب يتألف من خليط من الترددات المختلفة.

وفي الواقع فإن معظم الأصوات التي نتعامل معها هي أصوات معقدة تتركب من مزيج من الترددات ونادراً ما نتعامل مع صوت أحادي التردد (أو نغمة نقية تماماً).

ومن حسن الحظ أن ظاهرة التشتت في مجال الصوت محدودة وليس لها الأهمية كما في مجال الضوء أو الموجات الكهرومغناطيسية عموماً، ولكن بالنظر لأهمية هذه الظاهرة في النظرية العامة للحركة الموحية يجب أن نتعرف عليها بشيء من التفصيل.

إذا ما تحركت مجموعة من الموجات ذات الأطوال الموحية المختلفة في وسط مادي مشتت فإن كل موجة تتحرك بسرعة تختلف عن سرع الموجات الأخرى.

وبذلك فإن هذه الظاهرة تعني أنه بعدما كانت جميع الموجات في الموقع نفسه في لحظة ما فإنها تصبح منفصلة عن بعضها في موقع آخر في لحظة أخرى نتيجة اختلاف سرعها.

وخير مثال عملي على هذه الظاهرة في مجال البصريات هو تحلل الضوء الأبيض إلى مركباته بوساطة الموشور، وذلك بسبب تباين سرع المركبات (أي الموجات المختلفة التي يتألف منها الضوء الأبيض) خلال مرورها بمادة الموشور، ونتيجة ذلك تنكسر هذه المركبات بزوايا مختلفة.

ومثال آخر على هذه الظاهرة في مجال الصوتيات هو تحلل الصوت المركب من عدة ترددات إلى مركباته عند مروره خلال ثاني أكسيد الكربون.

ويقال للوسط المادي الذي تعتمد فيه سرعة انتقال الموجة على الطول الموجي (أو التردد) بأنه وسط مشتت مثل أي وسط شفاف كالزجاج أو الماء أو الهواء بالنسبة للموجات الضوئية. وفي مثل هذه الأوساط تكون العلاقة بين سرعة الضوء C والطول الموجي l هي:

$$\frac{1}{c} = A + \frac{B}{l^2} \qquad (7.5)$$

حيث A وB ثابتان بالنسبة للوسط المعني.

ومن الأمثلة الأخرى في الفيزياء على توقف سرعة الموجة على الطول الموجي هو الموجات السطحية في سائل عمقه h وكثافته p ووتوتره السطحي T، حيث سرعة الموجة السطحية هي C:

$$C^2 = \left(\frac{g}{2pk} + \frac{2pkT}{r} \right) \tanh(2pkh) \qquad (7.6)$$

حيث g هو تسارع الجاذبية الأرضية وK هو العدد الموجي.

7. 11. السرع في الحركة الموجية:

في البداية يجب أن نؤكد أن الوسط الناقل للموجة كالهواء مثلاً، ليس متصلاً بل متقطعاً ويتألف من عدد هائل من الجزئيات منفصلة عن بعضها تماماً.

ولكن مصادر الصوت تكون عادة كبيرة جداً بالمقارنة مع الأبعاد الفاصلة بين الجزيئات تحت الشروط الجوية الاعتيادية وإن هذه الجزيئات المنفردة التي يتألف منها الوسط لا تنتقل مع الموجة بل تهتز موضعياً حول نقاط توازنها وعلى هذا الأساس يمكن اعتبار الجزئيات عبارة عن مهتزات تهتز بحركات توافقية بسيطة اهتزازاً طولياً حول مواضع توازنها. وطبيعي أن جميع هذه المهتزات لا تهتز بالطور نفسه بل بأطوار مختلفة تتغير دورياً.

واختلاف طور حركة هذه المهتزات هو الذي نلاحظه كموجات.

وهناك ثلاث سرع في الحركة الموجية متميزة عن بعضها تماماً ولكن ترتبط مع بعضها بعلاقات رياضية، وهي

1- سرعة الجسيم

2- سرعة الموجة أو سرعة الطور (لموجة منفردة)

3- سرعة المجموعة (لعدد من الموجات المركبة)

وبالنظر لأهمية هذه السرعات في الحركة الموجية سنتطرق لكل منها بشيء من التفصيل على افتراض أن الموجات التي سنتعامل معها جيبية.

7. 12. سرعة الجسيم

وهي السرعة التوافقية البسيطة للجسيم حول موضع توازنه، وهي مقدار متغير، وتكون قيمتها عظمى عند لحظة مرور الجسيم في موضع توازنه وتكون صفراً عندما يكون في أقصى إزاحة عن موضع التوازن.

الإزاحة الآنية x للجسيم في أية لحظة زمنية t هي:

$$x = a\sin(wt - kx) \qquad (7.7)$$

حيث الرموز تحمل معناها الاعتيادي.

$$w = kc$$

ولدينا $k = \frac{2p}{l}$

وبذلك تصبح المعادلة (7.7) كالآتي:

$$x = a\sin\frac{2p}{l}(ct - x) \qquad (7.8)$$

حيث c هي سرعة الموجة.

إن سرعة الجسيم u هي:

$$u = \frac{dx}{dt}$$

وبمفاضلة المعادلة (7.8) بالنسبة للزمن نحصل على:

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{2pac}{l}\cos\frac{2p}{l}(ct - x) \qquad (7.9)$$

إن هذه المعادلة توضح العلاقة بين سرعة الجسيم المهتز u وسرعة الموجة c إن القيمة العظمى لسرعة الجسيم هي u_0 حيث $u_0 = \frac{2pac}{l}$

وهذه العلاقة توضح أن:

أقصى سرعة للجسيم $u_0 = \frac{2pa}{l} \times$ سرعة الموجة c

وفي الواقع فإن سرعة الجسم u هي السرعة التي يزودها المصدر الصوتي المهتز لجسيمات الوسط وتتوقف على سعة الاهتزاز واتجاهه وتختفي عندما يتوقف السطح المهتز عن الاهتزاز وهذه السرعة تختلف عن السرع الجزيئية العشوائية المرتبطة بالحركة المستمرة لجسيمات الوسط سواء كانت هناك حركة اهتزازية أو لم تكن.

وطبقاً للنظرية الحركية للغازات فإن جزيئات أي غاز في حالة حركة دائمة في الفضاء بسرع مختلفة تتفاوت في المقدار من الصفر إلى ما لانهاية تقريباً (وفق توزيع ماكسويل لسرع الجزيئات).

وإذا فرضنا أن متوسط مربع سرعة هذه الجزيئات هو $\bar{v}^2$ فإن الضغط الناتج من تصادم هذه الجزيئات مع أي سطح هو p_0 وهذا الضغط يعطى بالعلاقة:

$$p_0 = \frac{1}{3} r_0 \bar{v}^2 \qquad (7.10)$$

حيث r_0 هي كثافة الغاز و p_0 هو ضغط الغاز.

ولما كانت سرعة الموجة الصوتية في أي غاز تحت شروط ثابتة (اديباتيكية) هي c حيث:

$$c = \sqrt{\frac{g\,p_0}{r_0}}$$

ومنها نجد أن:

$$p_0 = \frac{1}{g}\, r_0 c^2 \qquad \textbf{(7.11)}$$

حيث g هي النسبة بين السعة الحرارية للغاز تحت ضغط ثابت c_p إلى سعته تحت حجم ثابت c_v: $\left(g = \frac{c_p}{c_v} \right)$

وبتعويض p_0 من المعادلة (7.10) في المعادلة (7.11) نحصل على:

$$c = \sqrt{\frac{1}{3} g v^2} \qquad \textbf{(7.12)}$$

من هذه المعادلة يتضح أن هناك علاقة مباشرة بين سرعة الموجة الصوتية c والجذر التربيعي لمتوسط مربع سرعة جزيئات الغاز $\sqrt{v^2}$ وإذا علمنا أن قيمة g تعتمد على عدد درجات الحرية للجزيئة المكونة للغاز وفق العلاقة:

$$g = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{2}{n}$$

حيث n هو عدد درجات الحرية. فللغازات الأحادية الذرة ($n=3$). وللغازات الثنائية الذرة ($n=5$) وللغازات الثلاثية الذرة ($n=7$) وعليه فإن قيم g لهذه الغازات هي *1.29, 1.40, 1.66* على الترتيب.

ومن مقارنة المعادلتين (7.10) و(7.11) يبدو واضحاً أن هناك تطابق في الشكل، وبتعويض القيمة المناسبة لـــg في المعادلة (7.12) يتضح أنه طبقاً للنظرية الحركية للغازات أن سرعة تقدم الموجة الصوتية في أي غاز لها نفس

المرتبة من المقدار للجذر التربيعي لمتوسط مربع السرع الجزيئية لذلك الغاز (يعتبر الهواء غاز ثنائي الذرة).

وهذه النتيجة تبدو صحيحة إلى حد كبير إذا علمنا أن مرتبة القيمة لسرع الجسيمات الناتجة عن مرور الموجات الصوتية ذات الشدة الاعتيادية (كما في الموجات المرافقة للكلام والموسيقى) لا يتجاوز *10* سم/ثا بينما متوسط السرعة للحركة الجزيئية العشوائية هي في حدود 10^4 إلى 10^5 سم/ثا تحت الشروط الاعتيادية. وعلى ضوء ما تقدم يمكن تصور عملية تقدم الموجة الصوتية كالآتي:

عندما يهتز المصدر الصوتي فإن بعض الجزيئات تندفع نحوه نتيجة الحركة العشوائية وتتلامس مع السطح المهتز، وبذلك تستلم كمية حركة إضافية صغيرة بالمقارنة مع متوسط كمية الحركة التي تمتلكها قبل التلامس.

ولما كانت كمية الحركة كمية متجهة، لذلك فإن الزيادة بكمية الحركة التي اكتسبتها الجزيئات التي تلامست مع السطح المهتز ستنتقل (بنفس المقدار والاتجاه) إلى الجزيئات الأخرى التي ستصطدم معها، وهذا الاضطراب المصاحب لعملية انتقال كمية الحركة من جزيء إلى آخر سينتقل باتجاه محدد في الفضاء بسرعة تحددها أساساً السرع الجزيئية العشوائية وليس سرعة الجسيم التي استلمها من المصدر المهتز.

وجدير بالملاحظة أن هذا التصور يتفق مع الحقيقة التي تشير إلى أن سرعة الموجة مقدار ثابت (في الأوساط غير المشتتة) حتى على مسافات بعيدة بما فيه الكفاية لكي تصبح سرعة الجسيم المصاحبة للموجة ضئيلة جداً.

وفي الواقع إذا كانت الزيادة في سرعة الجسيم التي يكتسبها من السطح المهتز كبيرة بالمقارنة مع متوسط السرعة العشوائية للجزيئات فإن سرعة الموجة تصبح، وكما هو متوقع أكبر من قيمتها الاعتيادية بالنسبة للموجات ذات السعات الصغيرة.

فالاضطرابات المتولدة من الانفجارات الشديدة في الهواء تنتقل في المناطق القريبة من موقع الانفجار بسرعة تفوق عدة مرات سرعة الموجات الصوتية، وهذا يشكل ما يدعى بالموجات الراجة (اختراق جدار الصوت)

7. 13. سرعة الموجة (أو سرعة الطور)

وهي سرعة تقدم طور معين للموجة المفردة وهي مقدار ثابت في الوسط الواحد وتساوي حاصل ضرب التردد f في الطول الموجي l أي أن:

$$fl = c \quad \text{(مقدار ثابت)}$$

وهذا المقدار الثابت c (سرعة الموجة) يعتمد على الثوابت الفيزيائية للوسط، فمثلاً سرعة الموجة الطولية في عمود المائع (سائل أو غاز) هي مقدار ثابت يتوقف على ثوابت الوسط k وP_0 أي أن:

$$c = \sqrt{\frac{k}{r_0}} \qquad (7.13)$$

وسرعة الموجة المستعرضة في سلك متوتر تحت شد معين هي مقدار ثابت يتوقف على ثوابت السلك F وm أي أن:

$$c = \sqrt{\frac{F}{m}} \qquad (7.14)$$

ولأهمية توضيح مفهوم سرعة الطور (أو سرعة الموجة) بطريقة تحليلية سنختار للسهولة موجة مستعرضة تنتقل في سلك طويل مشدود على

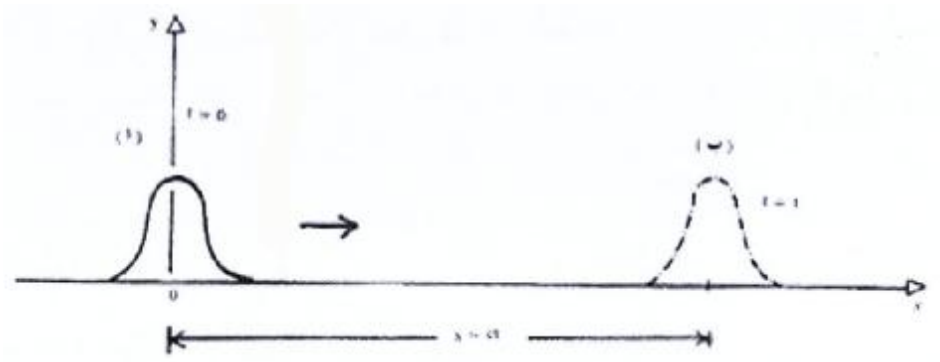
طول المحور السيني x، نفرض أنه في لحظة معينة، ولتكن $t=0$، يمكن تمثيل شكل الموجة (أي شكل الاضطراب الموضعي في السلك) بالمعادلة:

$$y=f(x) \quad \textbf{في الزمن } t=0 \qquad (\textbf{7.15})$$

حيث y هي الإزاحة المستعرضة للسلك عند x كما هو مبين في الشكل (7.3)

وإذا فرضنا أنه بمرور الزمن تنتقل هذه الموجة على طول السلك دون أن يتغير شكلها، وبعد مرور الزمن t تكون الموجة قد انتقلت المسافة ct إلى اليمين، حيث c هي مقدار سرعة الموجة، بفرض ثبوتها. وبذلك تكون معادلة الموجة بعد مضي الزمن t هي:

$$y=f(x-ct) \quad \textbf{في الزمن } t=t \qquad (\textbf{7.16})$$



الشكل (7.3)

يبين شكل التشوه في السلك (في هذه الحالة نبضة)

(أ) النبضة عند الزمن $t=0$

(ب) النبضة عند الزمن $t>0$ وقد تحركت إلى اليمين مسافة $x=ct$

إن هذه المعادلة تعطي نفس الشكل الموجي حول النقطة $x=ct$ عند الزمن t كما كانت تعطيها المعادلة (7.15) حول $x=0$ عندما $t=0$ وفي الحقيقة إن هذه المعادلة تعد المعادلة العامة لأية موجة على أية شكل تتحرك إلى اليمين.

والآن لنتأمل هذه المعادلة بشكل دقيق، إذا أردنا أن نتابع جزءاً معيناً من حركة (أو طور) الموجة مع مرور الزمن، فيجب أن نبحث عن قيمة خاصة للمتغير y (كأن نقول، قيمة النبضة مثلاً) وفي هذه الحالة الخاصة تكون قيمة y ثابتة لأنها تصف جزءاً معيناً من طور الموجة.

أما من وجهة النظر الرياضية، فإن هذا يعني أننا نبحث عن كيفية تغير x مع t عندما يأخذ المقدار $(x-ct)$ قيمة معينة ثابتة، وعند ثبوت $(x-ct)$ فإن ذلك يعني أنه بازدياد t يجب أن تزداد x حتى يبقى المقدار $x-ct$ ثابتاً، ومن ثم فإن المعادلة (7.15) تمثل في الواقع، موجة تتحرك إلى اليمين (اتجاه تزايد x)، أما إذا أردنا أن نمثل موجة تتحرك إلى اليسار فإننا نكتب:

$$y=f(x+ct) \qquad \textbf{(7.17)}$$

حيث أن الموضع للطور الثابت $(x+ct)$ للموجة يتناقص بازدياد الزمن t، وهكذا يتضح أنه يمكن بسهولة الحصول على سرعة طور معين للموجة، فلطور معين لموجة تتحرك إلى اليمين يجب أن يتوفر الشرط التالي:

$$x-ct = \textbf{مقدار ثابت} \qquad \textbf{(7.18)}$$

وبإجراء التفاضل ينتج أن:

$$\frac{dx}{dt}-C \qquad \textbf{(7.19)}$$

ومن ثم فإن c هي سرعة طور الموجة، أما الموجة التي تتحرك إلى اليسار فإننا نحصل بالطريقة نفسها على سرعة طورها $(-c)$.

وبنفس الطريقة تماماً يمكننا تطبيق التحليل نفسه على الموجات الطولية.