الباب الأول

فـيزيـاء الصــوت اللغـوي

الفصل الأول

الصـــوت

١- ما الصوت؟

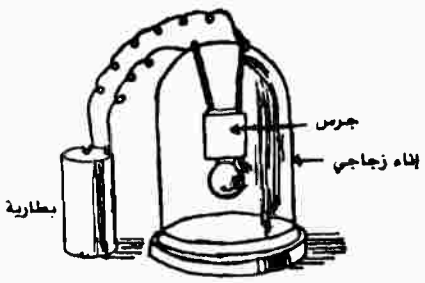
نحن في حياتنا اليومية لا نحكم بوجود صوت ما إلا عندما «نسمعه»؛ أي عندما تأخذ طبلة الأذن في الاهتزاز استجابة لاهتزاز جزيئات الهواء الملامسة لها، وتحدث هذه الظاهرة نتيجة لاهتزاز جسم من الأجسام على نحو يؤثر على العلاقات بين جزيئات الهواء المحيطة بهذا الجسم.

وبالرغم من أن جزيئات الهواء الجوي تتحرك بذاتها حركة عشوائية، حتى دون أن يكون ثمة جسم في حالة اهتزاز، فإن هذه الحركة من الضعف بحيث يمكن التجاوز عنها، وافتراض أن جزيئ الهواء يتخذ وضعاً ثابتاً، وأن إزاحته إنما تتم تحت تأثير اهتزاز جسم من الأجسام الملامسة له.

وإذن؛ فإن سماع الصوت في حياتنا اليومية يأتي نتيجة لاهتزاز جسم ما في الهواء، وتأثير الاهتزازات خلال الهواء على طبلة الأذن؛ وحينئذ يبدأ جهاز السمع في نقل هذه الاهتزازات خلال سلسلة العظيمات الثلاث إلى الأذن الداخلية، ثم عبر عصب السمع إلى المخ، حيث يتم تفسيرها.

هذا يعني أن وجود الوسط الناقل - وهو هنا الهواء - لازم لنقل حركة الجسم المهتز إلى طبلة الأذن؛ أي أن الصوت لا يمكنه أن ينتقل في فراغ. ومن اليسير إثبات ضرورة توافر الهواء بما هو وسط مادي لانتقال الصوت بالتجربة التي يشرحها الشكل ٣؛ فنحن إذا أحضرنا إناء زجاجياً يمكن التحكم في تفريغه أو ملئه بالهواء - ووضعنا تحته جرساً كهربياً متصلاً ببطارية خارج

الإناء لتوصيل التيار الكهربي إليه - فسنظل نسمع صوت الجرس ما دام الإناء ممتلئاً بالهواء، حتى إذا بدأنا في تفريغه ضعف الصوت رويداً رويداً حتى يتلاشى تماماً عندما يتم تفريغ الإناء نهائياً من الهواء. وحين نبدأ مرة أخرى في إعادة الهواء تدريجيّاً إلى الإناء ندرك بأسماعنا الصوت وهو يعلو تدريجيّاً حتى يصل إلى علوه الطبيعي.



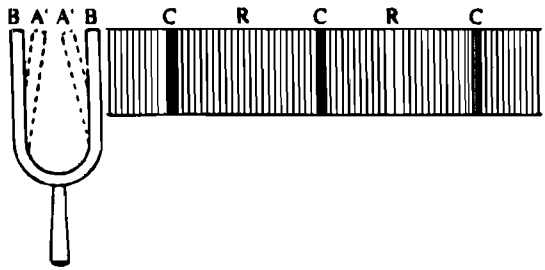
شكل (٣)
تجربة لإثبات ان الصوت لا ينتقل في فراغ

والهواء ليس الوسط المادي الوحيد المؤهل لنقل الصوت، وإن كان هو أكثر الأوساط الناقلة شيوعاً في حياتنا اليومية؛ فالصوت يمكنه أن ينتقل في أي وسط مادي تتمتع جزيئاته بخاصية المرونة elasticity. ومثل هذه الأوساط المادية المرنة إذا حملت على الحركة بفعل قوة ضاغطة عليها فإنها تقاوم القوة الضاغطة، وتميل إلى استعادة وضعها الأصلي. وهذا هو ما يسمى بخاصية القصور الذاتي inertia؛ ويعني به الفيزيائيون ميل الجسم إلى استعادة وضعه الأصلي من حيث الثبات والحركة، بأن يظل ثابتاً إن كان من شأنه الثبات، أو متحركاً إن كان من شأنه الحركة، وذلك عندما تنعدم القوة الخارجية المؤثرة التي تعمل على تحريكه أو إيقافه. وعلى ذلك تكون جميع الأوساط المادية الصلبة والسائلة والغازية مؤهلة لنقل الصوت.

ويمكن أن نتصور أثر حركة الجسم المهتز على جزيئات الهواء إذا علمنا أن الهواء الجوي ليس إلا خليطاً من بعض الغازات، يتكون من جزيئات صغيرة يصل عددها إلى ٤٠٠ بليون بليون جزيئ في البوصة المكعبة الواحدة. وهذه الجزيئات تحيط بكل الأشياء، وتتخلل كل التجاويف على سطح الأرض. والخاصية الأساسية للغازات - ومن بينها الهواء - هي قابلية الجزيئات

المكونة لها لاقتراب بعضها من بعض ولتباعد بعضها عن بعض، (أو - بعبارة أخرى - لتضاغُط بعضها إلى بعض، وتخلخل بعضها عن بعض). وتحدث ظاهرة الضغط والتخلخل هذه عند اهتزاز جسم من الأجسام اهتزازاً يؤثر على العلاقات المكانية بين جزيئات الهواء المحيطة به. ونحن إذا طرقنا شوكة رنانة، ودققنا النظر إلى ذراعها بعد الطرق، وجدناه يتحرك بفعل القوة الضاغطة التي وقعت عليه في اتجاهين متقابلين. وتنتج حركة الذراع إلى الخارج ضغطاً على جزيئات الهواء الملامسة له، على حين تؤدى حركته في الاتجاه المقابل مارّاً بوضع الراحة (أي النقطة التي يشغلها عند سكونه) إلى تخلخل جزيئات الهواء الملامسة له، وهكذا حتى يستعيد الذراع وضعه الأصلي بالقصور الذاتي، حين تكف القوة المحركة للذراع عن العمل. وبذلك تتخذ حركة جزيئات الهواء تحت تأثير اهتزاز أي جسم ملامس لها - كما يبدو في الشكل (٤) - سلسلة متتابعة من **الضغوط** compressions **والتخلخلات** rarefactions ينتشر من خلالها الصوت، ويدركه الإنسان حين تستجيب طبلة الأذن لهذه الضغوط والتخلخلات بإحداث اهتزازات مقابلة.

غير أن علينا هنا أن نلحظ أمراً مهماً؛ إنك حين تقرر أنك قد سمعت بأذنيك صوتاً ما، فلابد أن هذا كان نتيجة لاهتزاز جسم ما في الهواء. ولكن هذا لا يعني أن كل اهتزاز في الهواء ينتج عنه بالضرورة سماع صوت ما في مقابله. ونضع هذه القضية في عبارة أخرى فنقول: إن أذن الإنسان ليست مؤهلة لسماع جميع الأصوات الناتجة عن جميع الاهتزازات التي تحدث في الهواء؛ فهناك اهتزازات هي من الضعف (في التردد والعلو) بحيث لا تدركها الأذن؛ كما أن هناك اهتزازات هي من القوة (في التردد والعلو) بحيث تتجاوز قدرة أذن الإنسان على الإدراك (وسيأتي تفصيل القول في هذه المسألة إن شاء الله). وعلماء فيزياء الصوت مضطرون إلى أن يوسعوا دائرة اهتمامهم لتشمل جميع الاهتزازات التي تحدث في أي وسط مادي وليس الهواء فحسب، بما في ذلك ما يقع منها دون حساسية الأذن البشرية (ما يسمى **الموجات**



شكل (٤)
سلسلة من الضغوط والتخلخلات تولدت عن اهتزاز شوكة رنانة
(الرمز C للضغط والراء R للتخلخل)

الصوتية غير المسموعة inaudible sound waves أو الموجات الصوتية السفلى infra sonic) وما يقع فوق قدرتها على السمع (أو ما يسمى الموجات فوق الصوتية ultrasonic)؛ وبذلك يصبح مصطلح الصوت عندهم مرتبطاً بمطلق حدوث الاهتزاز في الوسط الناقل، سواء ترتب على ذلك انطباع سمعي أو لم يترتب. أما الدارس لظاهرة السمع والكلام فمن الطبيعي أن يصرف اهتمامه الأساسي إلى دراسة الاهتزازات التي ينشأ عنها انطباع سمعي، أي التي تقع آثارها ضمن حدود قدرة السمع البشري على الإدراك. وبهذا المعنى يتحدد مفهوم المصطلح acoustics؛ إذ هو مصطلح دالٌّ على الدراسة الفيزيائية للصوت الواقع في مجال السمع البشري. ومن ثم فإن ترجمته إلى الصوتيات الفيزيائية هي من باب إطلاق العام على الخاص، وهي مقبولة بهذا الشرط. ولعلها - وهي المعربة - آثر عندي من استعمال الدخيل وهو الأكوستيكيات أو ما شابهها. وإن كنا قد نلجأ لاستعمال المصطلح الأخير أحياناً إيثاراً للوضوح.

٢ - الموجة الصوتية

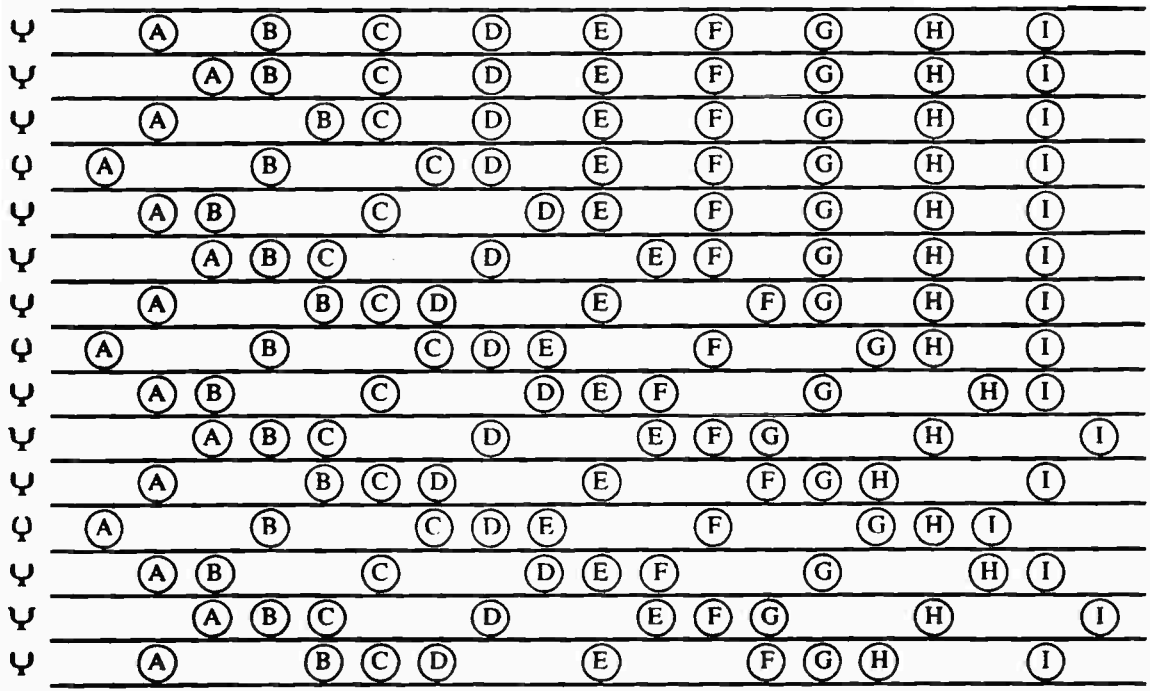
عندما تتحرك جزيئات الهواء تحت تأثير اهتزاز جسم ملامس لها ينتشر الصوت، أو - بعبارة أخرى - يتولد ما يسمى الموجة الصوتية sound wave. ولكي ندرك الكيفية التي ينتشر بها الصوت في الهواء علينا أن نتأمل طبيعة حركة جزيئ الهواء عند حدوث الموجة الصوتية؛ فقد يظن أن جزيئ الهواء إنما

يتحرك ليقطع المسافة كلها ما بين الجسم المهتز - والذي سنسميه من الآن مصدر الصوت - وطبلة الأذن. غير أن هذا ليس صحيحاً. إن حركة جزيئ الهواء إنما تتم إلى الأمام وإلى الخلف حول النقطة التي نفترض أنها نقطة الثبات أو وضع الراحة بالنسبة له، على حين تستمر الحركة الضاغطة باطراد إلى الأمام. ويوضح لنا الشكل (٥) كيف يتحرك جزيئ الهواء نتيجة حركة مصدر الصوت (وليكن شوكة رنانة في حالة اهتزاز) أثناء تولد الموجة الصوتية وانتشارها.

يصور السطر الأول من الشكل (٥) العلاقات المكانية بين جزيئات الهواء قبل أن يبدأ ذراعا الشوكة في الاهتزاز؛ أي وذراعا الشوكة في نقطة الثبات. ويصور السطر الثاني الوضع المكاني للجزيئات حين يبدأ الذراعان في الحركة، فيغادران نقطة الثبات. ويتحركان إلى خارجها. ونتيجة لذلك يترك الجزيئ A وضع الثبات متحركاً في اتجاه الجزيئ B، على حين تظل الجزيئات الأخرى ثابتة. ويصور السطر الثالث ما يطرأ على أوضاع الجزيئات من تغيير في لحظة تالية، حيث يعود الجزيئ A إلى وضعه الأول بعد اصطدامه بالجزيئ B، وهنا يبدأ الجزيئ B الحركة في اتجاه الجزيئ C. وفي اللحظة التالية التي يصورها السطر الرابع تزداد خلخلة الهواء بتجاوز ذراع الشوكة نقطة الصفر إلى الاتجاه العكسي المقابل فيتراجع الجزيئ A إلى ما وراء نقطة الثبات الخاصة به، في حين يرجع الجزيئ B إلى وضعه الأصلي بعد أن يكون قد اصطدم بالجزيئ C ليدفعه إلى الحركة في اتجاه الجزيئ D.

وهكذا تتحرك الجزيئات حول وضع الثبات أو نقطة الصفر إلى الأمام وإلى الخلف في سلسلة متتابعة من التضاغطات والتخلخلات، على حين تكون المحصلة النهائية للعملية هي تقدم سلسلة الضغوط إلى الأمام باطراد في اتجاه الأذن.

وأنت ترى في الشكل (٥) أن الجزيئ I يظل ثابتاً في مكانه حتى تصل سلسلة الضغوط إليه فيصطدم به الجزيئ H (وهذا ما يصوره السطر التاسع)، فيندفع إلى الأمام ثم تتوالى الضغوط والتخلخلات، فيهتز الجزيئ I أماماً



شكل (٥) انتشار الموجة الصوتية عبر جزيئات الهواء

وخلفاً حول نقطة الثبات الخاصة به (وهذا يبدو واضحاً في السطور التالية للسطر التاسع). وإذا افترضنا أن الجزيئ I هو الجزيئ الملامس لطبلة الأذن فإن طبلة الأذن لن تهتز - إذن - إلا بفعل الضغط الواقع عليها من هذا الجزيئ، على حين يظل الجزيئ A - وكذلك سائر الجزيئات الأخرى - يتحرك إلى الأمام وإلى الخلف حول نقطة الصفر، من غير أن يرحل بنفسه ليقطع المسافة كلها ما بين مصدر الصوت وطبلة الأذن.

وإذن؛ فنحن نعني بالموجة الصوتية حركة جزيئات الهواء في مكانها حول نقطة الثبات الخاصة بكل منهامن غير أن يتحرك الجزيئ حركة ثابتة مطردة في اتجاه واحد إلى الأمام. إن الموجة الصوتية ليست كالريح التي يتحرك بها مجموع جزيئات الهواء في اتجاه ما، كما أن الريح ليست شرطاً ضرورياً لانتشارها؛ إذ يمكن للموجة الصوتية أن تنتشر في عكس اتجاه الريح.

والموجة الصوتية، ليست إلا مثالاً واحداً من أمثلة عدة لظاهرة من أهم الظواهر التي يدرسها علم الفيزياء؛ ونعني بها ظاهرة **الحركة الموجية** wave motion، والتي نجد لها أمثلة أخرى في موجات الماء السطحية والموجات الكهرومغناطيسية.

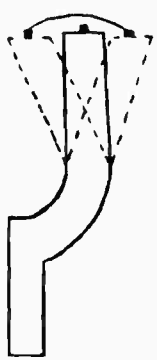
وثمة خصائص عامة تتصف بها حركة الموجات بأمثلتها المختلفة. ويمكن توضيح ذلك بمقارنة الموجة السطحية في الماء بالموجة الصوتية؛ ففي الموجات الصوتية تهتز جزيئات الهواء (أو أي وسط مادي)، وفي موجة الماء تهتز جزيئات الماء. وكما أن الموجة الصوتية تختلف اختلافاً بيناً عن الريح، فكذلك موجات الماء تختلف عن التيارات المائية التي ينتقل بها مجموع جزيئات الماء من مكان إلى مكان. إن تيار الماء في نهر النيل - على سبيل المثال - يتجه بمجموع جزيئات الماء من الجنوب إلى الشمال. أما الموجات السطحية التي يتحرك فيها جزيئ الماء في مكانه حول نقطة الثبات المفترضة فيمكن ملاحظتها بسهولة إذا وقفت على الشاطئ ودققت النظر إلى ورقة شجر طافية على سطح الماء.

غير أن ثمة اختلافاً أساسيّاً بين هذين النوعين من أنواع الحركة الموجية. ويكمن هذا الاختلاف في اتجاه حركة الجزيئات أثناء اهتزازها وانتشار الموجة. أما جزيئات الماء السطحية فتتحرك إلى أعلى وإلى أسفل على هيئة زوايا قائمة بالنسبة لاتجاه انتشار الموجة. وإذا دققنا النظر مرة أخرى إلى تلك الورقة من أوراق الشجر وهي تطفو على سطح الماء، فإننا نجدها تتحرك إلى أعلى وإلى أسفل. أما في الموجة الصوتية فإن الجزيئ يتحرك إلى الأمام وإلى الخلف، ومن ثم تُعَدُّ الموجة الصوتية موجة طولية longtitudinal wave، على حين تسمى موجة الماء موجة مستعرضة transverse wave.

٣- تمثيل الموجة الصوتية بالرسم

أصوات الكلام موجات صوتية مسموعة. ولكن فحصها وتحديد الكميات المختلفة التي تتألف منها يقتضي تحويلها إلى صورة مرئية، (أي إلى رسم يتضح فيه نوع الاهتزاز وأبعاده).

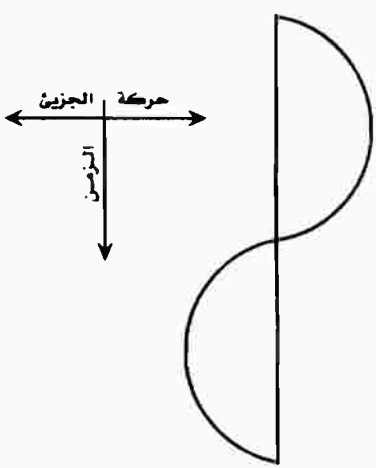
فلنفترض أننا زودنا ذراع الشوكة المهتز في الشكل (٦) بسن قلم يتحرك على صفحة من الورق (مراعين تخفيف الاحتكاك بين سن القلم وصفحة الورق، حتى لا نسرع بإيقاف الاهتزاز). حينئذ سنحصل على الرسم الموجود بالشكل المذكور. وسيكون خطاً واحداً يمثل طوله أقصى نقطتين يصل إليهما اهتزاز الذراع، وتمثل النقطة الواقعة في منتصف الخط نقطة الثبات (= نقطة الصفر في وضع الراحة) بالنسبة لذراع الشوكة. لكننا سنلحظ في هذا الرسم أن سن القلم سيتكرر مروره على الخط نفسه من غير أن يتغير مساره. ولا شك أن هذا الرسم قد أعطانا صورة ما عن أقصى مدى يصل إليه اهتزاز ذراع الشوكة، لكن



شكل (٦)
تمثيل حركة الجزيئ المهتز مع إهمال عنصر الزمن

أسئلة كثيرة لن يستطيع مثل هذا الرسم أن يساعدنا على معرفة جوابها. فكم من الزمن استمر ذراع الشوكة في الاهتزاز؟ وما التغيرات التي طرأت (أو التي يمكن أن تكون قد طرأت) على إزاحة جزيئ الهواء لحظة بعد لحظة؟ ثم ماذا لو طرقنا أكثر من شوكة في لحظة واحدة؟. إن الأذن ستدرك الأثر الناتج عن هذا العمل على هيئة صوت واحد يمثل في حقيقته مجموع خصائص الأصوات المشتركة في تكوينه. وإذن؛ كيف يمكن باستعمال هذه الطريقة الساذجة في الرسم أن نحدد علاقة الاهتزاز بالزمن في الموجات الصوتية المختلفة الناتجة عن طرق أكثر من شوكة في لحظة واحدة؟. هذه الأسئلة وغيرها لن تجد لها جواباً، ولن تستطيع لها تحديداً على الرسم الذي يقدمه لنا الشكل (٦). والسبب الأساس في قصور هذا الرسم هو عدم تمثيله لعنصر الزمن؛ أي عدم قدرته على تمثيل حركة جزيئ الهواء في الزمن. ومن ثم يقتضي الحصول على صورة أدق للموجة الصوتية تلافي هذا القصور.

والآن ربما وجدنا إذا رجعنا إلى الشكل (٥) نوعاً من الحل لهذه المشكلة؛ فهذا الشكل يقدم لنا كل سطر من سطوره - بالنسبة للسطر السابق عليه - ما يشبه أن يكون لقطة سينمائية لحركة من حركات الجزيئ في اللحظة التالية، بحيث إذا تتبعنا مثلاً حركة الجزيئ أ في السطور الخمسة الأولى استطعنا أن نتصور حركة هذا الجزيئ في الزمن. ويمكن أن نحصل على هذه الصورة بشكل أوضح إذا وصلنا ما بين جميع النقط التي تحدد موضع الجزيئ أ في السطور الخمسة الأولى. والنتيجة يقدمها لنا الشكل ٧؛ حيث يمثل الخط المستقيم وضع الثبات؛ أي حيث يكون ضغط الهواء الجوي عادياً. وتمثل النقطة

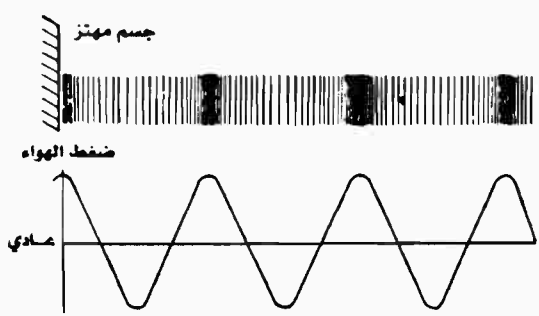


شكل (٧)
تمثيل حركة الجزيئ المهتز في الزمن

الواقعة إلى اليمين المدى الذي تصل إليه حركة الجزيئ تحت تأثير زيادة الضغط الواقع عليه من الذراع المهتز، وتمثل النقطة الواقعة إلى اليسار المدى الذي تصل إليه حركة الجزيئ عند التخلخل تحت تأثير ارتداد الذراع المهتز إلى ما وراء نقطة الصفر. ويمكن التعبير عن ذلك - على وجه الاختصار - بأن نقول: إن الخط المستقيم يمثل الضغط الجوي العادي، على حين يكون الضغط موجباً (أي زائداً على ضغط الهواء الجوي) إذا كانت حركة الجزيئ إلى يمين الخط، ويكون سالباً (أي أقل من ضغط الهواء الجوي) إذا كانت حركة الجزيئ إلى اليسار.

وتوضيحاً لذلك نعيد هنا الشكل (٤) الذي يمثل موجات الضغوط والتخلخلات الناتجة عن اهتزاز ذراع شوكة رنانة، موضحين إياه برسم يبين حركة اهتزاز الجزيئ على الطريقة الموضحة في الشكل ٦ بعد تعديل وضع الرسم، بحيث يمثل الزمن على البعد الأفقي، ويمثل كمية الضغط الموجب (+) بنقطة فوق خط الصفر، وكميات الضغط السالب (-) بنقطة تحت خط الصفر.

ومن الواضح أن الصورة التي حصلنا عليها في الشكل ٨ ليست صورة فعلية من النوع الفوتوغرافي لحركة الجزيئ، بل إن ذلك لا يفيدنا كثيراً على فرض الحصول عليه. إن ما نود الحصول عليه هو رسم بياني ذو إحداثيين، يمكن أن نشرح به الكميات التي تتألف منها الموجة الصوتية. ويهمنا منها حتى الآن بُعدان أساسيان؛ هما الزمن والإزاحة (ونعني



شكل (٨)
تمثيل الموجة الصوتية بالرسم

بالإزاحة تغير كميات الضغط الواقعة على جزيئ الهواء عند اهتزازه)؛ ولذلك يسمى مثل هذا الرسم **منحنى الإزاحة - الزمن** displacement - time curve. ويأتي نتيجة تتبع حركة الجزيئ المهتز لحظة بلحظة، وتمثيلها على الرسم بمجموعة نقاط متتابعة يتحدد مكانها رأسياً بدرجة الإزاحة، وأفقياً بزمن الحدوث.

وهكذا يتشكل منحنى الإزاحة - الزمن ليحدد **شكل الموجة الصوتية** wave shape.

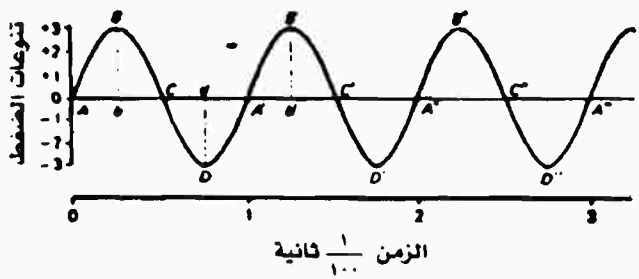
* * *

الفصل الثاني
كميات الموجة الصوتية وكيفية قياسها

١- كميات الموجة الصوتية

لا شك أن تمايز الأصوات بعضها من بعض إنما يرتبط باختلاف الكميات التي يتكون منها كل صوت. وسنناقش الآن هذه الكميات وكيفية قياسها، وسنستخدم في مناقشتنا موجة صوتية من النوع البسيط صادرة عن شوكة رنانة نقية (أي متجانسة من حيث مادة صنعها)، وهي الموجة الممثلة في الشكل (٩).

ويمكن بتأمل هذا الشكل تبين الكميات الآتية:



شكل (٩)
موجة جيبية بسيطة وبيان الكميات التي تتألف منها

(١) الإزاحة displacement

وهي حركة الجزيئ من نقطة الثبات A تحت تأثير اهتزاز ذراع الشوكة.

(٢) اتساع الضغط amplitude of pressure
(و يقال له اختصاراً : الاتساع amplitude)

وهي أقصى إزاحة يصل إليها الجزيئ في نقطة زمنية معينة، ويشمل

الاتساع الزيادة (أو النقص) في ضغط الهواء بالنسبة لضغط الهواء الجوي العادي بسبب اهتزاز مصدر الصوت في لحظة معينة، وتمثل المسافتان B - b و D - d أقصى اتساع في حالتي الضغط والتخلخل على الترتيب.

ومن الطبيعي أن تختلف هذه المسافة زيادة ونقصاً تبعاً لاختلاف كمية القوة المحركة لذراع الشوكة. ونلاحظ أن زيادة هذه الكمية ينشأ عنها زيادة في إزاحة جزيئ الهواء، كما يؤدي نقصها إلى نقص الإزاحة. وتحكم الأذن على الصوت الأكبر إزاحةً في العادة بأنه أعلى من الصوت الأقل من حيث الإزاحة، (وذلك على فرض تساوي الكميات الأخرى وعدم تغير المسافة الفاصلة بين السامع ومصدر الصوت). وهذا يعني أن ثمة ارتباطاً بين كميات ثلاث هي: **ضغط الصوت** sound pressure (أي كمية الإزاحة)، **وشدة الصوت** sound intensity (أي كمية القوة المحركة)، **وعلو الصوت** sound loudness (أي كمية استجابة الأذن لاختلاف الصوت من حيث الضغط أو الشدة). والكميتان الأوليان من الكميات الموضوعية objective التي يمكن إخضاعها للقياس الآلي. أما الكمية الثالثة فهي ذاتية subjective، يعتمد في قياسها على استجابة الأذن للمثيرات الصوتية. ومن ثم لا ينبغي الخلط بين مفهوم مصطلحي الشدة والعلو؛ فقد يشيع استعمال الكلمتين بمعنى واحد على سبيل الترادف في الاستعمال العام، ولكنهما بالمصطلح الفيزيائي كميتان متمايزتان.

وحسبنا هنا الإشارة إلى الارتباط بين هذه الكميات الثلاث. وسنعالج الكميتين الأوليين في هذا الفصل بعد الفراغ من تسمية الكميات الأخرى. أما بيان علاقتهما بعلو الصوت وهو الكمية الذاتية المقابلة، فسنتركه إلى مكانه من الكتاب إن شاء الله، حيث نعالج الجوانب المختلفة المتعلقة بإدراك الصوت (الباب الرابع).

(٣) الذبذبة Cycle (Hertz)

تمثل المسافة، A - A' في الشكل (٩) ذبذبة كاملة، وهي تمثيل لحركة

الجزيئ من نقطة الثبات A إلى B (أقصى اتساع ضغط)، ثم من B إلى D (أقصى اتساع تخلخل) ماراً بخط الصفر في النقطة C، ثم من D إلى A' برجوعه إلى خط الصفر مرة أخرى.

وحين يستمر الجزيئ في الحركة بعد ذلك يكون قد بدأ ذبذبة جديدة، وهذا ما يمثله الرسم بالمسافة "A - A' وهكذا.

(٤) التردد frequency

وهو عدد الذبذبات الكاملة التي يتمها الجزيئ في ثانية واحدة. وتختلف الأجسام من حيث تردد الصوت الناتج عن اهتزازها تبعاً لتركيبها الفيزيائي وللطريقة التي تثار بها. ويظل تردد الصوت ثابتاً مهما اختلف الاتساع. وفي الشكل (٩) نجد الجزيئ قد أتم ثلاث ذبذبات كاملة في $\frac{٣}{١٠٠}$ من الثانية، أي أن الذبذبة الواحدة تستغرق $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية. وهذا يعني أن الجسم يتم في كل ثانية مائة ذبذبة كاملة. وإذن؛ فتردد الصوت الناتج عن اهتزاز ذراع هذه الشوكة هو ١٠٠ ذبذبة في الثانية، وتكتب اختصاراً ١٠٠ ذ/ث (وقد شاع الآن استعمال المصطلح هيرتز علَماً على هذه الوحدة، فيكون تردد هذا الصوت هو ١٠٠ هيرتز).

والتردد كمية موضوعية يمكن قياسها آليّاً. أما الانطباع السمعي الذاتي الناتج عن تغير التردد زيادة ونقصاً فيسمى **درجة الصوت** pitch؛ ونعني به حكم الأذن على الصوت بالحدة أو الغلظ. وإذن؛ فدرجة الصوت كمية ذاتية تقاس من خلال استجابة الأذن للمثيرات الصوتية المختلفة؛ أي أن الحكم فيها هو للإنسان وليس للآلة. وتترجم الأذن زيادة التردد عادة إلى إحساس بحدة الصوت (هذا على فرض التساوي بين الأصوات في الكميات الأخرى).

وهذا التحفظ الأخير غاية في الأهمية، لأن العلاقة بين الكميات الموضوعية والكميات الذاتية - سواء في ذلك العلاقة بين الاتساع والعلو أو بين التردد والدرجة - ليست علاقة تناسب بسيط، أي أن استجابة الأذن لا

تسير في خط متواز مع زيادة الكمية الموضوعية ونقصها. ويزيد في تعقيد العلاقة أن حكم الأذن على صوت ما بالحدة أو الغلظ يتأثر في ظروف معينة بشدة الصوت، ولذلك لا تظهر العلاقة بين الكميات الموضوعية والذاتية عند تمثيلها بالرسم البياني على هيئة خطوط مستقيمة بل على هيئة منحنيات، تسمى في علم النفس الفيزيائي **المنحنيات النفسية - الأكوستيكية** psycho - acoustic curves. وسنتناول بيان هذه العلاقة في الباب الرابع إن شاء الله.

(٥) مدة الذبذبة period

وهي الفترة الزمنية التي يستغرقها إتمام ذبذبة واحدة. ويمكن معرفة مدة الذبذبة في صوت ما إذا عرفنا التردد، وذلك بقسمة ١ على التردد، ويعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية:

$$P = \frac{1}{F}$$

كما أن التردد يمكن معرفته أيضاً إذا علمت المدة، وذلك بالمعادلة:

$$F = \frac{1}{P}$$

حيث F هو التردد frequency، وP مدة الذبذبة period. وعلى ذلك إذا كان تردد الصوت ١٠٠ذ/ث فإن مدة الذبذبة تكون $\frac{1}{100}$ من الثانية.

(٦) سرعة الصوت velocity

وهي السرعة التي تنتشر بها الموجة الصوتية في الوسط الناقل. وتصل سرعة الصوت في الهواء إلى ١١٣٠ قدم في الثانية (وتكتب اختصاراً ١١٣٠ق/ث)، وذلك في درجة حرارة ٢٠° (= ٦٨ فهرنهيت). وهذا يعني أن سرعة الصوت ليست ثابتة في جميع الظروف: فهي تتأثر بضغط الهواء الجوي، وبدرجة الحرارة (إذ تنقص في درجة الصفر المئوية إلى ١٠٨٩ق/ث).

وتتأثر سرعة الصوت بكثافة الوسط الناقل، فسرعة الصوت في المواد

الصلبة أكبر منها في المواد السائلة، وهي في المواد السائلة أكبر منها في المواد الغازية.

(٧) طول الموجة wave length

وهو المسافة (الطولية وليست الزمنية) بين ذروتين من ذرى الضغط، ويمثلها في الشكل ٩ المسافة B - B'. وهذا المصطلح كثيراً ما نسمعه من محطات الإذاعة عند إعلانها عن موجات إرسالها. ويحسب طول الموجة بقسمة سرعة الصوت على التردد، ويعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية:

$$L = \frac{C}{F}$$

حيث L هو طول الموجة، و C سرعة انتشار الصوت، و F التردد.

ومن الواضح أن طول الموجة يقصر بزيادة ترددها؛ وذلك لأن زيادة التردد يعني زيادة عدد الذبذبات في الثانية، وهذا بدوره يعني أن المسافة الطولية بين ذروتين من ذرى الضغوط (وهو طول الموجة) ستكون أقصر.

ومثال ذلك أن الموجة التي ترددها ٥٠ذ/ث سيكون طولها ٢٢,٦ق/ث [وهو ناتج قسمة ١١٣٠ (سرعة الصوت) على ٥٠ (التردد)]. أما إذا زدنا تردد الموجة إلى ٥٠٠ذ/ث فإن طول الموجة سيصبح ٢,٢٦ق/ث، وهكذا.

٢- قياس ضغط الصوت

سبق أن قررنا وجود ارتباط بين الاتساع amplitude، وضغط الصوت pressure sound، وشدة الصوت sound intensity. وسنعالج في هذه الفقرة والفقرة الآتية إن شاء الله كيفية قياس هاتين الكميتين على الترتيب.

إن الانحراف عن ضغط الهواء الجوي العادي بزيادة أو نقص نتيجة لاهتزاز جسم ما في الهواء هو - كما سبق أن ذكرنا - السبب الذي يرجع إليه الإحساس بصوت ما. والوحدة المستخدمة في قياس الضغط هي الداين في

السنتيمتر المربع (داين/سم^2). ولكي نتصور كمية القوة التي يمثلها الداين نقول: إنك لو وضعت في راحة يدك جسماً زنته $\frac{1}{2}$ جرام فإن قوة الجاذبية التي تأخذ في دفع راحة اليد والضغط عليها في هذه الحالة تساوي ٥٠٠ داين. ومعنى ذلك أنه إذا كانت مساحة الجزء المتصل بهذا الجسم من راحة اليد هو ٢سم^2 فإن ضغط الجسم الذي كتلته نصف جرام على راحة اليد تساوي ٢٥٠ داين/سم^2.

ويتضح من ذلك أن الداين يمثل كمية صغيرة جداً من الضغط، ولذلك يصعب استخدامه في كثير من الأغراض العملية نظراً لما يترتب على ذلك من استعمال أرقام ضخمة؛ فضغط الهواء في إطار السيارة يبلغ حوالي ٧٠٠,٠٠٠ داين/سم^2. أما إذا استخدمنا وحدة أخرى في القياس مثل الرطل في البوصة المربعة فإن الكمية السابقة تساوي ١٠ أرطال في البوصة المربعة.

وبالنسبة لضغط الصوت فإن الداين يُعدُّ وحدة مناسبة للقياس. فضغط الهواء الجوي العادي يصل إلى حوالي مليون داين/سم^2. أما أقل ضغط أو انحراف عن ضغط الهواء الجوي يمكنه أن يسبب صوتاً مسموعاً للإنسان فهو ٠,٠٠٠٢ داين/سم^2. وحين يبلغ ضغط الصوت ٢٠٠٠ داين/سم^2 فإن ذلك يمكن أن يسبب ضرراً بالغاً لجهاز السمع عند الإنسان.

٣- قياس شدة الصوت

تنتقل الطاقة الناتجة عن اهتزاز جسم ما في الهواء، فتحدث تغييراً في الضغط. لذلك كان من البدهيّ أن يتناسب الاتساع amplitude مع الطاقة المتولدة من الاهتزاز زيادة ونقصاً. وإذا افترضنا وجود سامع في طريق انتشار الموجة الصوتية، فإن هذه الطاقة سيستمر تأثيرها على جزيئات الهواء في المسافة الواقعة ما بين مصدر الصوت وطبلة الأذن، حتى يصل تأثيرها إلى الطبلة، فتحملها على الاهتزاز. وكلما بَعُدَت المسافة بين مصدر الصوت وطبلة الأذن زاد عدد جزيئات الهواء التي تتأثر بانتقال الطاقة، أو - بعبارة

أخرى - توزعت كمية الطاقة على عدد من جزيئات الهواء أكبر. وهذا يفسر لنا زيادة ضعف الصوت بزيادة المسافة الفاصلة بين السامع ومصدر الصوت.

وقياس شدة الصوت هو قياس للطاقة المنتقلة عبر نقطة ما على طول انتشار الموجة الصوتية. ويمكن أن تكون هذه النقطة هي طبلة الأذن مثلاً.

والسؤال الآن: ما الوحدة التي نستخدمها في قياس الطاقة؟

هناك ثلاث وحدات لقياس كمية الطاقة أو القوة. أما الوحدة الأولى فهي **الإرج** erg، وهو كمية القوة التي يستهلكها داين واحد لتحريك جسم ما لمسافة ١سم^{٢}. ولما كانت كمية القوة اللازمة لتحريك جسم ما مساوية لكمية العمل الناتجة عن هذه القوة بحيث تستلزم زيادةُ كمية العمل زيادةً في كمية القوة، وتنتج زيادةُ كمية القوة زيادةً في كمية العمل؛ ولذلك شاعت الصيغة الآتية في تعريف الإرج بأنه:

«كمية العمل الناتجة عن تحريك داين واحد لجسم ما لمسافة واحد سم^{٢} في الثانية.»

(ويعبر عن هذه الوحدة اختصاراً بالإرج/الثانية).

وهذه الكمية من الصغر بحيث لا تصلح لكثير من الأغراض العملية؛ كقياس قوة المحركات والمولدات. وتفادياً لاستخدام الأرقام الضخمة في القياس ابتكرت وحدتان لقياس القوة هما: الواط والحصان. والنسبة بين الوحدات الثلاث هي على النحو التالي:

١٠ مليون إرج = ٧٤٦ واط = حصان واحد

والمراد بشدة الصوت (وتسمى أحياناً **القوة الأكوستيكية** acoustic power) هو على وجه التحديد كمية القوة المنتقلة عبر جزيئات الهواء في مسافة ١سم^{٢}، على زاوية قائمة بالنسبة لاتجاه انتشار الموجة الصوتية. والوحدة المناسبة لقياس هذه القوة هي الواط في السنتيمتر المربع

(واط/سم^{2})، وأقل قوة ينتج عنها صوت مسموع يمكن تمييزه من الصمت هي ١٠-^{١٦} واط/سم^{2} (أي ١٠ أس ناقص ١٦، ويساوي $\frac{١}{١٠}$ كادرليون من الواط، أي كسر عشري يتكون من واحد صحيح وخلفه ١٦ صفراً). وهذه الكمية تساوي من حيث الضغط ٠,٠٠٠٢ داين/سم^{2}. وحين تتجاوز قوة الصوت ١٠-^{٤} وات/سم^{2} (وهو ما يقابل٢٠٠٠ داين/سم^{2}) فإنها تعرض وظائف الأذن لأضرار بالغة.

٤- النسبة بين الاتساع وشدة الصوت

قلنا إن جزيئ الهواء يهتز إلى الأمام وإلى الخلف في مكانه حول نقطة الصفر بترددات معينة واتساع معين. ولتحديد التناسب بين الاتساع وشدة الصوت سنفترض أن الاتساع قد تضاعف فجأة عند نقطة ما. إن ذلك سيؤدى بالضرورة إلى مضاعفة المسافة ما بين نقطة الصفر وأقصى نقطة يصل إليها جزيئ الهواء في اهتزازه. وبما أن تردد الصوت (أي عدد ذبذباته في الثانية) ثابت، وبما أن تضاعف حركة الجزيئ يتم في إطار المدة الزمنية نفسها التي كانت موجودة قبل هذا التضاعف المفاجئ في الاتساع - لذلك فإن الطاقة المنتقلة عبر جزيئ الهواء في هذه اللحظة ستزيد، كما ستتضاعف شدة الصوت (أي كمية القوة المنتقلة بزاوية قائمة بالنسبة لاتجاه الموجة). وحاصل ذلك أن مضاعفة الاتساع - على فرض ثبات التردد - تؤدي إلى أن تصل شدة الصوت إلى أربعة أمثال الاتساع، وحين يزيد الاتساع إلى ثلاثة أمثاله تزيد شدة الصوت في مقابل ذلك إلى تسعة أمثال الاتساع وهكذا، أي أن: شدة الصوت تساوي مربع الاتساع.

٥- النسبة بين شدتَيْ صوتين (أي بين اتساعَيْهما) بالديسبيل

بما أن الأذن ليست مؤهلة لإدراك جميع الاهتزازات التي تحدث في الهواء، وبما أن أقل قوة (أو شدة) تستطيع الأذن العادية تمييزها من الصمت هي ١٠-^{١٦} واط/سم^{2} (= ٠,٠٠٠٢ داين/سم^{2})، وبما أن زيادة قوة الصوت (أي

شدته) على ١٠-٤ واط/سم٢ (= ٢٠٠٠ داين/سم٢) تلحق بجهاز السمع عند الإنسان أضراراً بالغة - لذلك لم يهتم علماء الصوتيات بقياس الكم المطلق للشدة أو الضغط، بل صرفوا اهتمامهم إلى قياس التناسب بين كميتين أو أكثر من كميات الشدة أو الاتساع الواقعة بين هاتين النقطتين؛ نعني النقطة التي تمثل أقل شدة أو ضغط ينتج عنه صوت مسموع، والنقطة التي تمثل أكبر شدة أو ضغط يمكن للأذن إدراكها من غيرألم. ولهذا الغرض ابتكرت وحدة الديسبيل (وقد سميت هذه الوحدة باسم الكسندر جراهام بل).

وإذن، فالديسيبل (ويكتب اختصاراً د. ب) ليس مقياساً ذاتيّاً من مقاييس الإدراك، ولكنه مقياس موضوعي لحساب النسبة بين كميتين (أو أكثر) من كميات القوة أو الاتساع بالقياس إلى الكمية ١٠-١٦ واط/سم٢ (= ٠,٠٠٠٢ داين/سم٢)، وهي نقطة البداية بالنسبة لقدرة السمع البشري على تمييز وجود الصوت من الصمت (أو ما يسمى عتبة السمع threshold of hearing).

والأذن قادرة على تمييز عدد هائل من كميات القوة (والاتساع أيضاً) فيما بين النقطتين المحددتين لمجال السمع عند الإنسان. إن شدة أعلى صوت يمكن للأذن سماعه تصل إلى بليون مِثْل بالنسبة لشدة أخفض صوت يمكن لها تمييزه. ومع ضخامة هذه النسبة، وتفادياً لضخامة الأرقام المستخدمة فيها، حدد التناسب بين شدتيْ (أو ضغطيْ) أي صوتين باستخدام العلاقة اللوغارتيمية للأساس ١٠، ويمكن حساب النسبة بين قوتيْ صوتين بالديسبيل باستخدام المعادلة الآتية:

$$\text{د النسبة بالديسيبل} = ١٠ \text{ لو } \frac{ق_١}{ق_٢}$$

حيث ق١ هي قوة الصوت الأول و ق٢ هي قوة الصوت الثاني، أي أن النسبة بالديسيبل تساوي ١٠ أمثال لوغاريتم النسبة للأساس ١٠ بين قوتيْ صوتين. فإذا أردنا إيجاد النسبة بين صوتين نسبة قوة أحدهما إلى الآخر

١:١٠٠٠ فإن لوغاريتم النسبة بينهما تكون:

$$\frac{١٠٠٠}{١} = ١٠٠٠ = \text{لو}٣$$

وبتطبيق المعادلة السابقة ينتج:

$$\text{د} = ١٠ \text{ لو} \frac{\text{ش}_١}{\text{ش}_٢} = ١٠ \times ٣ = ٣٠ \text{ د. ب}$$

أي أن شدة الصوت الأول تزيد على شدة الصوت الثاني بمقدار ٣٠ د. ب.. ولما كانت القوة تساوي مربع الضغط كما ذكرنا، فإن النسبة بين قوتي صوتين بالديسيبل تساوي النسبة بين مربعيّ ضغطيهما؛ أي أن:

$$\frac{\text{ص}_١^{٢}}{\text{ص}_٢^{٢}} = \frac{\text{ش}_١}{\text{ش}_٢}$$

حيث ص$_١$ هو ضغط الصوت الأول، وص$_٢$ هو ضغط الصوت الثاني. وإذا كانت العلاقة اللوغاريتمية بين لوغاريتم مربع العدد والعدد نفسه تحددها المعادلة الآتية:

$$\text{لو} (\text{أ}^{٢}) = ٢ \text{ لو } ١$$

حيث أ هو العدد موضوع العلاقة - لذلك تستخدم المعادلة الآتية في حساب النسبة بين ضغطي صوتين بالديسيبل:

$$\text{د} = ١٠ \text{ لو} \frac{\text{أ}^{٢}}{\text{ب}^{٢}} = ٢ \text{ لو } \frac{\text{أ}}{\text{ب}}$$

حيث ب هو الصوت المطلوب مقارنة ضغطه بالصوت أ.

ولذلك تحسب العلاقة بين القوة والضغط بالديسيبل باستخدام المعادلة الآتية:

$$\text{د} = ١٠ \text{ لو} \frac{\text{ش}_١}{\text{ش}_٢} = ١٠ \text{ لو } \frac{\text{ص}_١^{٢}}{\text{ص}_٢^{٢}}$$

$$= ١٠ \text{ لو}_٢ \frac{\text{ص}_١}{\text{ص}_٢}$$

أي أن $\text{د} = ٢٠ \text{ لو } \frac{\text{ص}_١}{\text{ص}_٢}$

وبتطبيق المعادلة على المثال السابق، وهو إيجاد النسبة بين ضغطي صوتين نسبة قوة الأول إلى الثاني ١٠٠٠:١ نجد أن:

$$\frac{١٠٠٠}{١} = \frac{(١٠٠٠)^{٢}}{(١)^{٢}} = \frac{١٠٠٠٠٠٠}{١} = \text{لو } ٦$$

وإذن تكون:

$$\text{د} = ١٠ \times \text{لو}_{١٠} = ٦٠ \text{ د.ب}$$

ويمكن أيضاً حساب النسبة بطريقة أخرى على النحو الآتي:

$$\text{د} = ١٠ \times ٢ \text{ لو } \frac{١٠٠٠}{١}$$

$$= ١٠ \times ٢ \text{ لو}_{١٠} = ٦٠ \text{ د.ب}$$

أما إذا كانت النسبة بين قوتي صوتين تمثل قيمة وسيطة وليست مضاعفات للأساس ١٠، وذلك كأن تكون النسبة بينهما ٢:١؛ فعلينا أولاً إيجاد لوغاريتم النسبة بينهما (أي القوة التي ترفع إليها ١٠ لتكون النتيجة ٢). وبما أن لوغاريتم النسبة ٢:١ هو ٠,٣، وبما أن النسبة بين القوتين بالديسيبل تساوي ١٠ أمثال اللوغاريتم ٠,٣ - فإذن تكون النسبة بينهما بالديسيبل ٠,٣ × ١٠ = ٣ د.ب، أي أن قوة الصوت الأول تزيد على قوة الصوت الثاني بمقدار ٣ د.ب.

ويوضح الجدول الآتي النسبة بالديسيبل بين مجموعة مختارة من القوى والاتساعات:

نسبة القوة (الشدة)	القوة المقابلة بالديسيبل	نسبة الضغط	القوة المقابلة بالديسيبل
١٠ : ١	١٠	١٠ : ١	٢٠
١٠٠ : ١	٢٠	١٠٠ : ١	٤٠
١٠٠٠ : ١	٣٠	١٠٠٠ : ١	٦٠
١٠٠٠٠ : ١	٤٠	١٠٠٠٠ : ١	٨٠
١٠٠٠٠٠ : ١	٥٠	١٠٠٠٠٠ : ١	١٠٠
١٠٠٠٠٠٠ : ١	٦٠	١٠٠٠٠٠٠ : ١	١٢٠
١٠٠٠٠٠٠٠ : ١	٧٠	١٠٠٠٠٠٠٠ : ١	١٤٠
٢ : ١	٣	٢ : ١	٦
٤ : ١	٦	٤ : ١	١٢
٨ : ١	٩	٨ : ١	١٨

وهكذا إذا زدنا قوة صوت ما ١٠,٠٠٠,٠٠٠ مرة فإننا في الوقت نفسه نزيده بنسبة ٧٠ دب، على حين أننا إذا زدنا الضغط بالمقدار نفسه فإن شدة الصوت تزيد بنسبة ١٤٠ دب.

الفصل الثالث
أنواع الموجات الصوتية

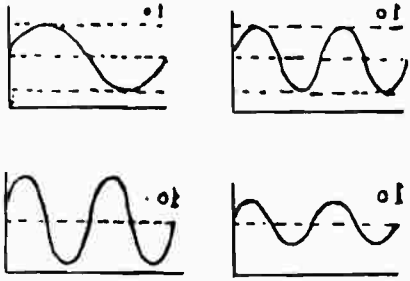
تختلف الموجات الصوتية ويتميز بعضها من بعض تبعاً لاختلاف مصدر الصوت ونوع الحركة التي يقوم بها أثناء اهتزازه. ويمكن تصنيف الموجات الصوتية على اختلافها إلى ثلاثة أنواع رئيسة نعالجها فيما يلي:

(١) الموجة التوافقية البسيطة simple harmonic wave

يقوم ذراعا الشوكة الرنانة النقية إذا ما حركا بإصدار صوت ينتج عن حركتها المنتظمة. ويتميز هذا الصوت بأنه يتكون من تردد واحد بسيط، أو - بعبارة أخرى - أن الموجة الصوتية المتولدة في هذه الحال يكون اتساع الضغط فيها مساوياً تماماً لاتساع التخلخل، وتتميز بأن عدد الذبذبات في الثانية (التردد) ومدة الذبذبة تظل ثابتة طوال فترة انتشار الموجة. كما يستأثر التردد بكل الطاقة التي انتقلت إلى الهواء بحركة الذراعين، فيصبح هو التردد الوحيد الذي تشتمل عليه الموجة، وينعدم أثر أي ترددات أخرى.

وتعد الشوكة النقية استثناء من بين مصادر الصوت، فليس هناك مصدر في الطبيعة قابل للاهتزاز يمكنه أن يصدر مثل هذا الصوت ذي التردد الدوري البسيط. ويمثل لنا الشكل (١٠) رسماً نمطيّاً لعدد من الموجات الصوتية الصادرة عن شوكات رنانة نقية. ويسمى مثل هذا الرسم الذي يتم باستخدام منحنى الإزاحة - الزمن **الرسم الذبذبي** oscillogram. ويلاحظ أن جميع الرسوم التي أوردناها للموجات الصوتية حتى الآن هي من النوع الذبذبي.

وتبدو هذه الموجات البسيطة في الشكل (١٠) (وكذلك في الشكلين السابقين) مكونة من قمم تمثل مناطق الضغط، ووديان تمثل مناطق التخلخل. وتأخذ هذه القمم منحنيات تشبه جيوب الزوايا خالية من الاهتزازات المفاجئة، يتساوى فيها الاتساع على جانبي خط الصفر. وقد تختلف أشكال



شكل (١٠)
موجات جيبية بسيطة

هذه المنحنيات الجيبية تبعاً لكمية الإزاحة وعلاقتها بمحور الزمن والتردد كما يبدو في الشكل، إلا أن طبيعتها الجيبية البسيطة تظل واحدة، ومن ثم يطلق على هذا النوع **الموجات الجيبية البسيطة** sine or sinusoidal waves. ومهما تكن درجة النقاء التي تتمتع بها مثل هذه الشوكات النقية فإنها تعود إلى الصمت بعد مدة من طرقها، ما لم تستمر عملية الطرق. ومعنى هذا أن اتساع الموجة الصوتية يتناقص تدريجياً بفعل القصور الذاتي إلى أن يصل إلى الصفر، حتى يعود الذراعان إلى الثبات. غير أن تناقص الاتساع في هذه الحالة يتم بمعدل صغير جداً يمكن إهماله رياضياً، ومعاملة الصوت الناتج عن اهتزاز الشوكة النقية كما لو كان مستمراً إلى ما لا نهاية من غير تغير في الاتساع، **أي بوصفه صوتاً غير مضمحل** undamped sound. وبذلك يتميز هذا النوع من أنواع أخرى يتم فيها تناقص الاتساع بمعدل سريع ومؤثر لا يمكن تجاهله، مما يؤدي إلى اضمحلال الموجة الصوتية (وسيأتي في الفصل الرابع من هذا الباب بيان تفصيلي للمقصود بظاهرة الاضمحلال).

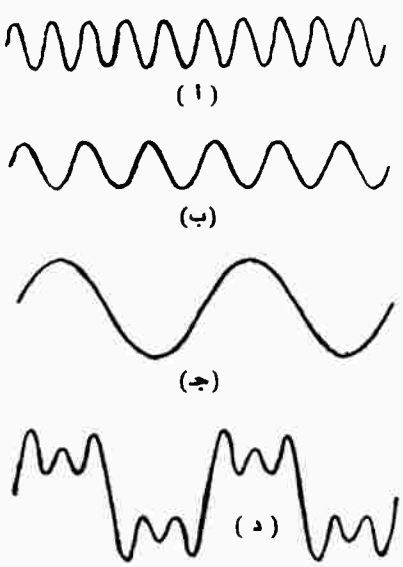
وبسبب بساطة التردد الصادر عن الشوكات الرنانة النقية وضعف تأثير الاضمحلال عليه، فيجعله يستمر لمدة أطول، نجدها تحتل مكاناً خاصاً في مَعامل الطبيعة ومختبرات الدراسات الصوتية، كما تستخدم في اختبارات السمع وفي ضبط ترددات الآلات الموسيقية.

وتمتاز الموجة الجيبية البسيطة بأن المدة التي يستغرقها إتمام الذبذبة periodثابتة؛ أي أن الذبذبات تتكرر بشكل دوري، ولهذا تتصف الموجة الجيبية البسيطة **بأنها موجة مكررة** repititive **أو دورية** periodic، كما يعزى الصوت الصادر عنها إلى مجموعة الأصوات التي تسمى **النغمات** tones؛ لأن تكرارية الذبذبات أو دوريتها تجعل الأذن تستريح إلى سماعها. وبذلك تحتل درجة من

درجات السلم الموسيقي بوصفها **نغمة توافقية** harmonic **يمكن أن تشكل مع غيرها من النغمات الجيبية البسيطة تكويناً توافقياً (هارمونيا) بشروط معينة** سيأتي بيانها في الفقرة الآتية.

٢- الموجة التوافقية المركبة complex harmonic wave

إذا طرقنا ثلاث شوكات رنانة نقية: الأولى ترددها ٥٠ذ/ث، والثانية ١٥٠ ذ/ث، والثالثة ٢٥٠ذ/ث في لحظة واحدة، فإننا لن نسمع ثلاث موجات صوتية منفصلة، بل سنستمع إلى موجة صوتية واحدة مركبة من مجموع هذه الموجات الثلاث البسيطة. إن كل شوكة من هذه الشوكات الثلاث ستنتج موجة جيبية بسيطة لها شكل الإزاحة الخاص بها، ولكن طَرْقها جميعاً في لحظة واحدة سينتج موجة مركبة، يكون تمثيلها على منحنى الإزاحة - الزمن حاصل جمع الإزاحات الثلاث سلباً وإيجابياً على محور الزمن. ذلك ما يظهره بوضوح الشكل (١١)، الذي يمكن أن نستنتج منه أيضاً أن أي رسم ذبذبي لموجة مركبة لا يمكن أن يأتي على شكل منحنى جيبي بسيط، ذلك لأنه حاصل جمع مجموعات جيبية مختلفة التردد. ويبرهن الشكل (١٢) بوضوح على أنه كلما أضفنا عدداً من الترددات البسيطة إلى الموجة المركبة، أو غيَّرنا الترددات الداخلة في تكوينها، تغير تبعاً لذلك شكل الموجة المركبة.



شكل (١١)
موجة مركبة من موجات توافقية بسيطة

ونلاحظ في الشكل (١١) أن تردد الموجة الثانية هو ثلاثة أمثال تردد الموجة الأولى، وأن تردد الثالثة خمسة أمثال تردد الأولى؛ أي أن كلاً من الموجتين الثانية والثالثة مضاعفة للأولى. هنا نقول إن العلاقة بين الموجات الثلاث تحكمها ظاهرة

التوافقية harmony، ومن ثم تسمى الموجات التي تحظى بمثل هذا التكوين موجات توافقية مركبة. وتمتاز الموجات التوافقية المركبة بالخصائص الآتية:

(١) أنها تعد من الموجات المكرورة أو الدورية؛ نظراً لأن مدة الذبذبة ثابتة.

(٢) أن ترددها هو القاسم المشترك الأعظم لمجموع الترددات التوافقية الداخلة في تكوينها. وبتطبيق ذلك على المثال السابق يكون تردد النغمة التوافقية المركبة هو ٥٠ذ/ث، ويسمى هذا تردد الأساس fundamental frequency.

(٣) أن التردد الأساسي للنغمة التوافقية المركبة ليس شرطاً أن يكون تردداً لإحدى الموجات المكونة لها، أو بعبارة أخرى لا يشترط أن يكون نغمة توافقية داخلة في تكوينها. ونلاحظ في المثال الوارد في الشكل (١١) أن تردد النغمة التوافقية المركبة قد اتفق مع تردد النغمة التوافقية الأولى. ولكن هذا الاتفاق محض مصادفة، فلو أننا أضفنا إلى هذه النغمة المركبة مكوناً آخر تردده ٧٥ ذ/ث لأصبح تردد الأساس ٢٥ذ/ث بدلاً من ٥٠ذ/ث، إذ سيصبح التردد ٢٥ذ/ث هو القاسم المشترك الأعظم للترددات ٥٠، ٧٥، ١٥٠، ٢٥٠، علماً بأن تردد الأساس لن يكون في هذه الحالة من بين مكونات النغمة التوافقية المركبة.

(٤) أن كل النغمات التوافقية الداخلة في تكوين النغمة المركبة تلتقي جميعها على خط الصفر عند نهاية كل ذبذبة من ذبذبات تردده الأساس، ولكن بعد أن تكون كل منها قد أتمت عدداً من الذبذبات يتفق مع ترددها. وفي الشكل (١١) تلتقي الموجة أ مع تردد الأساس بعد أن تكون قد أتمت خمس ذبذبات، وتلتقي الموجة ب بالنقطة نفسها بعد أن تكون قد أتمت ثلاث ذبذبات، وهكذا. (هذا مشروط بأن تبدأ الموجات الثلاث انتشارها في لحظة واحدة).

(٥) أن أول نغمة توافقية بعد نغمة الأساس (أي نغمة الأساس × ٢) تسمى بالنغمة التوافقية الأولى، ثم تتوالى التوافقيات الثانية والثالثة والرابعة والخامسة...إلخ.

(٦) أن الطاقة الناتجة عن اهتزاز مصدر (أو مصادر) النغمة المركبة والتي تنتقل إلى الهواء لا يختص بها تردد واحد من الترددات الداخلة في تكوينها، وإنما يتم توزيعها على الترددات التوافقية. وإذا كان من الممكن أن يستدل باتساع النغمة على قوتها فإننا نستطيع بتأمل (الشكل ١١) أن نستنتج حقيقة مهمة عن توزيع القوة على النغمات التوافقية البسيطة المكونة للنغمة المركبة؛ وهي أن توزيع القوة بين المكونات لا يتم بالتساوي، بل تحظى نغمة الأساس بأكبر اتساع، تليها النغمة التي ترددها ٢٥٠ذ/ث. هذا مع وجود فرص لإعادة توزيع القوة على المكونات بتقوية بعضها وإضعاف بعضها من خلال عمليات الرنين والترشيح والتقوية التي سنتناولها بالحديث إن شاء الله في الفصل الرابع من هذا الباب.

(٧) أن منظر منحنى الإزاحة - الزمن بالنسبة لأي موجة توافقية مركبة، (وهو ما يسمى عادة **شكل الموجة** wave shape، وأحياناً **البروفيل** profile of the wave يتحدد بناء على العوامل الآتية:

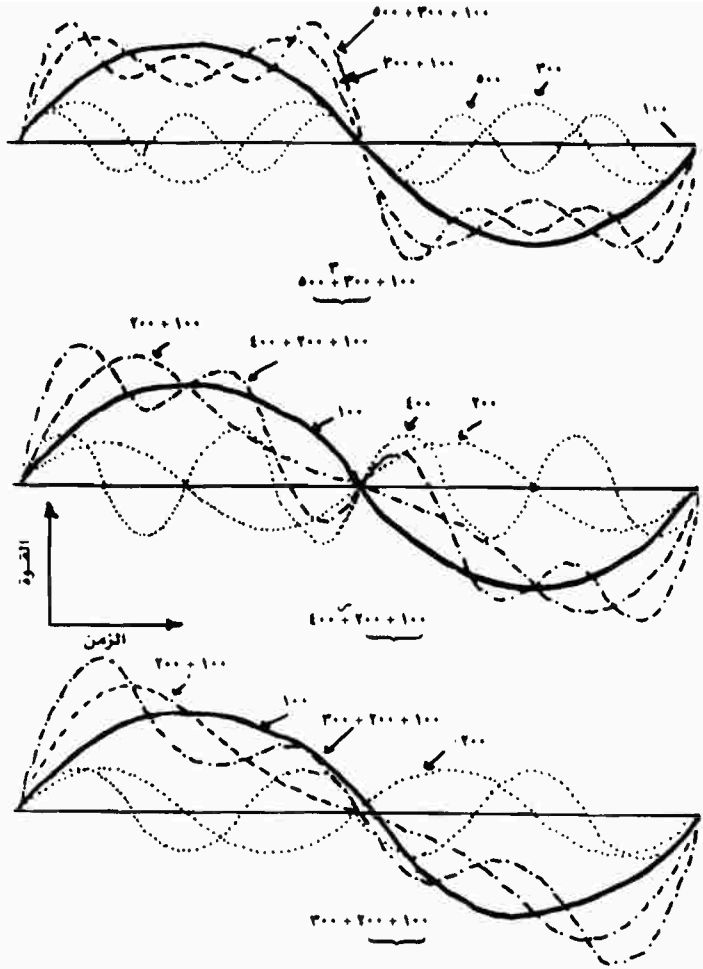
(أ) عدد النغمات البسيطة الداخلة في تكوينها.

(ب) كون التوافقيات فردية (أي أن النغمة المركبة تتكون من التوافقيات الأولى والثالثة والخامسة..إلخ) أو زوجية (أي أنها مكونة من الثانية والرابعة والسادسة..إلخ).

(جـ) توزيع القوة على هذه النغمات التوافقية.

وجدير بالذكر هنا أن شكل الموجة المركبة ذو صلة وثيقة بتعيين نوع الصوت، وذلك لأن هذا الشكل يتم تعديله نتيجة لإضافة نغمات توافقية بسيطة. وعلى الرغم من أن تردد نغمة الأساس في الموجة المركبة يظل ثابتاً مهما أضفنا إليها من مضاعفات إلا أن هذه المضاعفات تؤثر على إدراك الأذن للصوت.

وحاصل هذا الأمر أن اختلاف موجتين توافقيتين في عدد التوافقيات واتفاقهما في تردد الأساس ينشأ عنه تمييز الأذن بين الموجتين. وهذه هي الخاصية التي تسمى **نوع الصوت** sound quality.



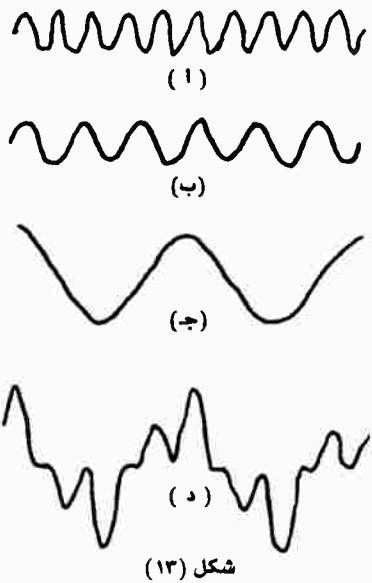
شكل (١٢) موجات مركبة متنوعة

(٨) أن الموجات التوافقية المركبة تُعدّ المادة الأساسية للتأليف الموسيقي، وأن النشاز في أي قطعة موسيقية مرتبط باختلال التكوين التوافقي (الهارموني) للنغمات فيها.

(٩) أن جميع الموجات التوافقية المركبة يمكن تكوينها بتجميع أي عدد من النغمات التوافقية البسيطة، كما يمكن في الوقت نفسه تحليلها واكتشاف مكوناتها لمعرفة الترددات التوافقية الداخلة في تكوينها. وهذا النوع من التحليل يسمى **التحليل التوافقي** harmonic analysis.

٣ - الطـور phase

فرغنا من ذكر العوامل الثلاثة التي تحدد شكل الرسم الذبذبي للنغمة المركبة، وحددناها بعدد الترددات المكونة، وما إذا كانت توافقيات فردية أو زوجية، وتوزيع القوة على هذه الترددات.



شكل (١٣)
موجة مركبة ذات مكونات مختلفة في الطور

غـيـر أن الشكل ١٣ (وهو نفس الموجة المركبة ونفس التوافقيات الممثلة في الشكل ١١) يعطينا دليلاً على أن النغمة المركبة قد تتخذ شكلين مختلفين (أو أكثر)، حتى مع ثبات هذه العوامل الثلاثة. ويحدث ذلك إذا ما اختلفت إحدى التوافقيات (أو أكثر) فيها يسمى **الطور** phase.

ويراد بالطور المرحلة التي تمر بها الذبذبة في لحظة معينة من حيث الضغط والتخلخل.

إن الموجات الثلاث تبدأ جميعها في لحظة واحدة، حيث تكون جميعها في حالة ضغط، أي أن جميع هذه المكونات في هذه اللحظة توجد في **طور واحد** in phase. أما في اللحظة التالية فسنجد أن الموجتين أ، ب قد مرتا بعدد من مناطق الضغط، على حين أن الموجة جـ لا تكون قد وصلت إلى منطقة الضغط التالية، حينئذ نقول إن الموجة جـ قد أصبحت **مختلفة في الطور** out of phase.

وهكذا يمكننا بمقارنة الأشكال ١١، ١٢، ١٣ أن نستنتج حقيقة مهمة هي:

أن الاختلاف بين النغمات المركبة في شكل الموجة يمكن أن يرجع إلى أحد السببين الآتيين أو كليهما:

الأول : أن تكون النغمات المختلفة تجميعاً لترددات مختلفة ذات قوى مختلفة (كما يبدو في الشكل ١١).

الثاني: أن تتحد فيها الترددات وتوزيع القوى، ولا تختلف إلا في الطور (انظر الشكل ١٣).

وهنا يرد سؤال مهم:إلى أي من هذين السببين يرجع تمايز الأصوات عند إدراكها؟ وهل تدرك الأذن النغمات المركبة المختلفة من حيث التكوين التوافقي وتوزيع القوى على أنها نغمات مختلفة متمايزة؟ وهل ينتج عن اتفاق النغمات في التكوين الترددي، واتفاقها في توزيع القوى - مع اختلافها في الطور فحسب - أن تميز الأذن بينها على أنها نغمات مختلفة؟

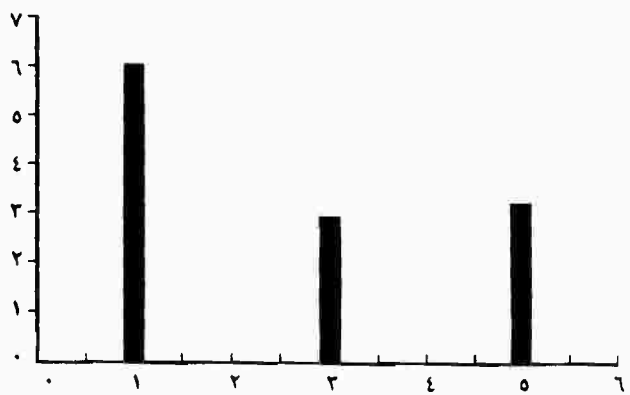
الثابت من التجربة أن الأذن لا تميز إلا بين النغمات التي يرجع اختلاف شكل الموجة فيها إلى السبب الأول. أما النغمات التي ينحصر الفرق بينها في شكل الموجة (أي في الطور فقط)، مع اتحادها في الترددات وتوزيع القوى، فإن الأذن تقوم بتحييد الفرق في الطور، وتدركها على أنها نغمات متحدة. ومن هنا نستنتج أن المعول في تمايز الأصوات المركبة بعضها من بعض على التكوين التوافقي وتوزيع القوى على الترددات. أما إذا كان الاختلاف بين نغمتين مركبتين محصوراً في الطور فحسب فإن ذلك لا يؤثر بحال على الأذن، وستحكم عليهما بأنهما نغمة واحدة.

هذه النتيجة تحدد، موقفنا بوصفنا دارسين للسمع والكلام من ظاهرة الطور. إننا لا ندرس فيزياء الصوت لذاتها، ولكننا ندرسها لنحاول من خلالها الوصول إلى فهم أمثل لعمليتي السمع والكلام، ومن ثم فمن حق دارس الفيزياء - بل ربما كان من واجبه - أن يهتم بظاهرة الطور. أما نحن فعلى العكس من ذلك نعمل على أن نحيد الطور في التحليل، كما تحيده الأذن في الإدراك، ونود أن نطمئن تماماً إلى عزل الطور بحيث لا يؤثر في أحكامنا على أصوات الكلام.

ومن ثم ينبغي لنا أن نركز الاهتمام على العاملَيْن اللذين يؤثران على إدراك الأذن للموجات المركبة وهما: التكوين التوافقي للموجة، والتوزيع

النسبي للقوة على هذه التوافقيات. وهذان العاملان يشكلان ما يسمى **التكوين الطيفي للصوت** sound spectrum، كما يسمى الرسم الذي يمثل لنا التكوين الطيفي لأي صوت **الرسم الطيفي** spectrogram، وهو وسيلة أخرى لتصوير الصوت بالإضافة إلى الرسم الذبذبي. ونحن نتوقع من الرسم الطيفي أن يقدم لنا صورة للصوت لا تتأثر باختلاف الطور.

بذلك، يتم عزل الطور على نحو يشبه سلوك جهاز السمع حيال الأصوات المركبة، وذلك على عكس الرسم الذبذبي الذي يكون الطور من أهم ملامحة البارزة. وإذا نظرنا إلى الرسم الطيفي في الشكل ١٤ وجدناه يمثل كلتا النغمتين المركبتين - المختلفين شكلاً والمتحدتين تكويناً وتوزيعاً للقوى - برسم واحد لا يختلف. وهذا هو ما نعنيه بقولنا إن الرسم الطيفي يقدم تحليلاً للصوت يناظر تحليل الأذن له على خلاف الرسم الذبذبي.



شكل (١٤)

رسم طيفي يمثل الموجة المركبة في كل من الشكلين ١١، ١٣

وقد تمخض التقدم العلمي في مجال دراسة الصوت عن إنتاج جهاز **المطياف** (الراسم الطيفي للصوت) sound spectrograph والذي يمكننا باستخدامه وتغذيته بأي رسالة صوتية يراد تحليلها أن نحصل على رسم طيفي للصوت، يشمل كل المعلومات التي يراد معرفتها عن التكوين الطيفي لهذه الرسالة. (سنعود بالشرح لتركيب هذا الجهاز وإمكانات استخدامه وكيفياتها. ولمن شاء معرفة المزيد عن هذا الجهاز أن يرجع إلى كتاب **إرنست بولجرام:**

Introduction to the Spectrography of Speech ، الذي أخلصه صاحبه لعلاج كل التفصيلات المتعلقة بهذا الجهاز. وقد أخرجنا له ترجمة كاملة إلى العربية مع شروح وتعليقات تحت عنوان: **مدخل إلى التصوير الطيفي للكلام**، (القاهرة، ١٩٧٨).

ونلاحظ هنا أن النغمة المركبة الممثلة في الشكل ١٤ تتكون من عدة نغمات توافقية، وأن كل نغمة توافقية منها تتكون من تردد واحد بسيط؛ ولذلك يتم تمثيلها على الرسم الطيفي (الذي هو نوع من الرسم البياني) بنقطة يتحدد مكانها على البعد الأفقي تبعاً لتردد النغمة، وعلى البعد الرأسي تبعاً لاتساعها، ثم يتم توصيل النقطة بالخط الأفقي بواسطة عمود. ويسمى هذا النوع من الرسوم الطيفية **الرسم الطيفي العمودي** line spectrum. ولقد سبق أن قررنا ضرورة أن تشتمل المعلومات المراد معرفتها عن الصوت المركب خاصّةً، على بيان الترددات والاتساعات (توزيع القوى).

ونود الآن بالنسبة لأصوات الكلام أن نضيف بعداً ثالثاً لا غنى عنه في دراستها وتحليلها، ونعني به عنصر الزمن، **فالطول (أو المدة)** duration تكون في كثير من الحالات من الصفات التي يعتمد عليها في التحليل الصوتي للغة، كما أن الكلام إنما يتم في الزمن، والأصوات تتتابع لحظة بعد لحظة، كما تتتابع التغيرات في صفاتها ومخارجها؛ لذلك كله لا يمكن إهمال عنصر الزمن في تحليل أصوات الكلام.

لكننا إذا نظرنا إلى الشكل ١٤ وجدنا عامل الزمن مهملاً تماماً؛ إذ ليس للرسم إلا بعدان؛ يمثل أحدهما (الأفقي) الترددات، وثانيهما (الرأسي) الاتساعات. ولا مجال بهذه الطريقة لتمثيل أي بعد ثالث على الرسم. وقد استطاع جهاز الراسم الطيفي تقديم حل مناسب لهذه المشكلة، وسنتناول ذلك بشيء من التفصيل فيما بعد.

٤- الضجة noise

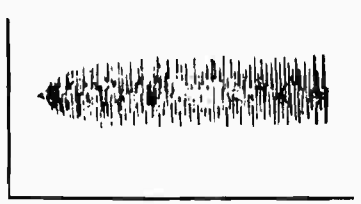
عرفنا كيف تتكون الموجة التوافقية المركبة من نغمتين توافقيتين فأكثر، أي من موجات جيبية بسيطة، تنتظم تردداتها، بحيث تكون مضاعفات لنغمة

أساس واحدة، كما عرفنا ما تتميز به هذه الموجات من صفة الدورية periodicity، بحيث تستغرق ذبذباتها النمطية مدة زمنية ثابتة.

ونريد الآن أن نتعرف إلى نوع آخر من الموجات المركبة يفتقد صفتي الدورية والتكوين التوافقي. وفي تكوين هذا النوع من الموجات المركبة تدخل جميع الترددات على عكس الموجات التوافقية التي تتكون من ترددات معينة هي مضاعفات لنغمة أساس واحدة.

وبافتقاد هذا النوع من الموجات المركبة لصفتي التكوين التوافقي والدورية يصبح نوعاً من الضجات التي لا تستريح الأذن إلى سماعها، ولك أن تقارن مثلاً بين صوت صادر عن ناي وصوت آخر هو نتيجة لارتطام كوب زجاجي بالأرض وتحطمه. إن الفرق بين هذين الصوتين من حيث الانطباع السمعي يمثل الفرق بين الصوت الدوري ذي التكوين التوافقي، والصوت الذي تدخل في تكوينه جميع الترددات على نحو عشوائي وبلا استثناء.

ومن الطبيعي أن يظهر الفرق واضحاً بين النوعين في كل من الرسم الذبذبي والرسم الطيفي، كما يشهد بذلك كل من الشكل ١٥ والشكل ١٦، الذي يمثل أولهما رسماً ذبذبياً للصوت [s]، كما يقدم ثانيهما الصورة الطيفية المقابلة لهذا الرسم الذبذبي. ويتضح في الشكل ١٥ خلو الموجة من الذبذبات الدورية، كما أن توالي الاتساعات لا يتبع نظاماً ثابتاً يمكن توقعه، ولكنه حافل بالمفاجآت. لذلك؛ لا يمكننا في الصورة الطيفية لهذا الصوت أن نمثل كل تردد من ترددات بطريقة الأعمدة كما فعلنا مع الموجات التوافقية المركبة لأن جميع الترددات داخلة في تكوينه، ومن ثم نلجأ إلى رسمها بطريقة المنحنى



شكل (١٥)

رسم ذبذبي للصوت [s]

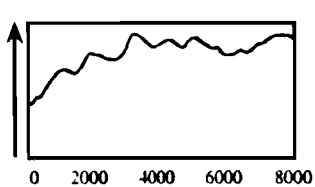
شكل (١٦)

رسم طيفي للصوت [s]

الطيفي spectrum curve، **الذي يمثل ارتفاعه عند كل تردد الطاقة التي تحظى بها الموجة الصوتية القريبة من هذا التردد.**

وبالرغم من أن جميع الترددات تدخل في تكوين هذا النوع من الأصوات على اختلافها، إلا أن من الممكن التمييز بين صوت وصوت منها بتحديد منطقة الترددات التي تتمتع بأكبر قدر ممكن من الطاقة؛ أي من الشدة أو من القوة الاكوستيكية. ويتضح ذلك بمقارنة الشكل ١٦ بالشكل ١٧؛ فأولهما رسم طيفي للصوت [s]، وثانيهما رسم طيفي للصوت [f]. ويتضح من الشكل ١٦ أن منحنى الطيف يصل إلى ذروته مع الأول في منطقة الترددات الواقعة حول التردد ٤٠٠٠ ذ/ث، أي أن هذه المنطقة هي أعلى مكونات الصوت من حيث الاتساع. أما في الشكل ١٧ فنجد أن أقصى ارتفاع لمنحنى الطيف يوجد في المنطقة الواقعة حول التردد ٢٥٠٠ذ/ث. ويلاحظ أننا لا نحدد في هذه الحال تردداً بعينه، وإنما نعين منطقة من الترددات؛ لأن مكونات الصوت هنا ليست نغمات توافقية بسيطة، ولكنّ كل الترددات الممكنة موجودة وممثلة في الصوت.

وبهذه الطريقة يمكننا أن نميز طيفيّاً بين الصوتين [s] **و** [f]، بالرغم من أن كليهما يدخل في تكوينه جميع الترددات الواقعة ما بين ٢٠٠٠ذ/ث و ٨٠٠٠ ذ/ث.



شكل (١٧) رسم طيفي للصوت [f]

الفصل الرابع

تعديل الموجة الصوتية

١- الاضمحلال damping

نذكّر هنا بما سبق أن قلناه من أن الشوكة الرنانة النقية لا تُصدر عند اهتزازها إلا تردداً واحداً بسيطاً، وأن الصوت الصادر عن هذا الاهتزاز لن يكون مصحوباً بأي ترددات جانبية أخرى مؤثرة. وبذلك إذا كان تردد الشوكة الرنانة النقية ١٠٠ذ/ث فإن الصوت الناتج سيتكون من هذا التردد وحده، وسيستأثر التردد ١٠٠ذ/ث بكل الطاقة الناتجة عن الاهتزاز.

ويتميز الصوت ذو التردد الواحد البسيط بأنه يستمر مدة طويلة نسبيّاً؛ أي أنه لا يفقد الطاقة المحركة بسرعة، ولذلك - وبالرغم من أن الصوت يفنى بعد مدة، وهذا معناه توقف الطاقة المحركة واستهلاكها - إلا أننا نفترض أن اتساع الاهتزازة لا يعتريه نقص. ويسمى مثل هذا الصوت **صوتاً غير مضمحل** undapmed sound.

والسؤال الآن: ماذا يحدث للصوت إذا طرأ عيب ما على الشوكة الرنانة النقية التي ترددها ١٠٠ ذ/ث، وذلك بأن تُغرس ذراعها في قطعة من الفلين، أو تُلفّ بقطعة من القماش مثلاً؟ أو ماذا لو كانت هذه الشوكة (أيضاً التي ترددها ١٠٠ذ/ث) غير متجانسة من حيث مادة الصنع؟. إن الشوكة الرنانة في هذه الحال لم تعد شوكة نقية، وسنلاحظ عند طرقها صدور صوت يختلف وقعه على الأذن عن صوت اهتزاز الشوكة الرنانة النقية بالرغم من أن تردد الشوكتين هو ١٠٠ذ/ث.

هذا التغير الذي طرأ على الصوت هو نتيجة لاكتسابه صفة **الاضمحلال** damping. وإذا قارنا الصوت غير المضمحل الناتج من اهتزاز الشوكة النقية **بالصوت المضمحل** damped sound، الناتج عن اهتزاز الشوكة المعيبة فسنلاحظ ما يأتي:

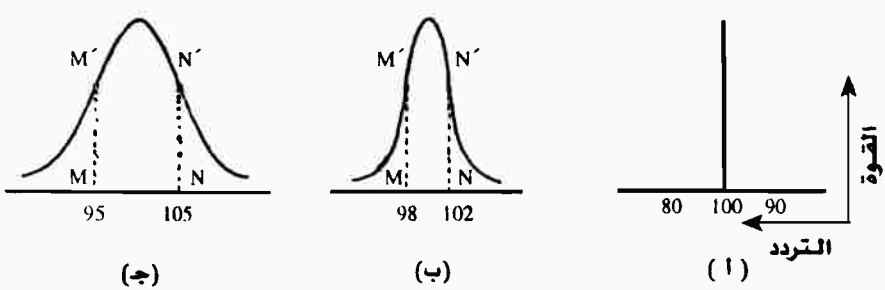
١ - أن الصوت المضمحل أميل إلى الغلظ، وهذا يعني أن الاضمحلال يؤثر على تردد الصوت.

٢ - أن فناء الصوت المضمحل أسرع من فناء الصوت غير المضمحل، أي أن الاضمحلال يعجل بالنقصان السريع للاتساع نتيجة لفقدان الطاقة المحركة للجسم المضمحل بمعدل أسرع.

٣ - أن الصوت المضمحل لن يتكون من تردد واحد بسيط وهو ١٠٠ذ/ث، بل سيشتمل - إلى جانب تردده المركزي (١٠٠ذ/ث) - على عدد من الترددات الثانوية الجانبية التي تنتشر على جانبي التردد المركزي. ويزيد أثر هذه الترددات الجانبية بزدياد درجة الاضمحلال.

٤ - أن التردد المركزي في الصوت المضمحل لن يحظى بكل الطاقة الناتجة عن الاهتزاز، بل تتوزع هذه الطاقة بين التردد المركزي ومجموعة الترددات الثانوية الجانبية. بحيث يحظى التردد المركزي بأكبر كمية من الطاقة (أي بأكبر اتساع)، ثم تتناقص قوة الترددات تدريجياً بمقدار بعدها عن التردد المركزي.

٥ - أن الترددات الثانوية لامتناهية في عددها، ولا تصل قوتها مطلقاً إلى الصفر.



(شكل ١٨) صورة طيفية لنغمات ذات درجات اضمحلال مختلفة

هذا ما يوضحه الشكل ١٨، حيث يمثل الشكل ١٨ أ نغمة ذات تردد واحد (١٠٠ذ/ث)، وصادرة عن شوكة نقية لا أثر فيها للاضمحلال، ويمثل الشكل ١٨ ب نغمة مضمحلة صادرة عن شوكة معيبة، ويلاحظ فيها وجود عدد من

الترددات الثانوية على جانبي التردد المركزي. وكلما زادت درجة الاضمحلال (انظر الشكل ١٨ جـ) أدى ذلك إلى زيادة عدد الترددات الثانوية المؤثرة (التي تحظى بنسبة ملحوظة من القوة) على جانبي التردد المركزي. ونلاحظ أن كلاً من الشكل ١٨ ب و١٨ جـ قد مثلت فيه الترددات الثانوية بنقط يتحدد مكانها أفقياً حسب ترددها، ورأسياً حسب اتساعها، ثم بتوصيل هذه النقط ينتج منحنى يسمى **منحنى الاضمحلال** damping curve المبين بالشكل.

وما دامت الترددات الجانبية حول التردد المركزي لا متناهية في عددها، وما دامت هذه الترددات تتناقص قوتها بمقدار بعدها عن التردد المركزي، أصبح من الضروري تحديد حزام الترددات الجانبية الذي يمكن أن يؤثر على النغمة المضمحلة.

وقد حُدد **عرض الحزام** band width في الشكل ١٨ ب و١٨ جـ بالمسافة M - N. ويمكن حساب عرض الحزام في أي نغمة مضمحلة إذا عَرَفنا الاتساع عند ذروة التردد المركزي، ويتم ذلك بتحديد نقطتين على جانبي التردد/ الذروة يصل فيهما الاتساع إلى ٠,٧٠٧ من اتساع التردد المركزي. وإذا حسبنا القوة في هاتين النقطتين (والقوة كما ذكرنا تساوي مربع الاتساع) وجدناها تصل إلى ٠,٤٩٩٨٤٩ أي إلى نصف قوة التردد المركزي (وهذا الرقم هو مربع ٠,٧٠٧)، ومن ثم تسمى هاتان النقطتان **نقطتي منتصف القوة** - half power points. والمسافة الواقعة ما بين هاتين النقطتين على محوري التردد تمثل عرض الترددات المؤثرة على النغمة المضمحلة. وواضح من مقارنة الشكل ١٨ ب بالشكل ١٨ جـ أنه كلما زادت درجة الاضمحلال في النغمة زاد عرض الحزام المؤثر من الترددات؛ ففي الشكل ١٨ ب يمتد عرض الحزام من ٩٨ إلى ١٠٢ذ/ث، على حين يمتد بزيادة الاضمحلال في الشكل ١٨ جـ من ٩٥ إلى ١٠٥ذ/ث.

هذا هو أهم ما يهمنا معرفته من معلومات عن ظاهرة الاضمحلال، وسيميننا تذكره كثيراً على متابعة مناقشاتنا للظواهر الصوتية المهمة الأخرى في دارسة السمع الكلام؛ كالرنين والتقوية والترشيح. فلنتذكره جيداً لأننا سنحيل إليه كلما اقتضى الأمر.

٢- الرنين والتقوية

عندما نطرق شوكة رنانة أو نطرق وتراً من أوتار العود يقوم كل منهما بالاهتزاز عدداً من الاهتزازات الكاملة في الثانية، وإصدار صوت ذي تردد معين. هذا التردد يسمى التردد الطبيعي للشوكة أو الوتر natural frequency. ولكل جسم قابل للاهتزاز تردده الطبيعي الذي ينتجه إذا حملته قوة ما على الاهتزاز. ويظل الجسم يهتز حتى تكف القوة المحركة له عن عملها، ويسمى هذا النوع من الاهتزاز الاهتزاز الحر free vibration.

غير أن الجسم القابل للاهتزاز لا يكتفي بإصدار هذا التردد الطبيعي عند حمله مباشرة على الاهتزاز بواسطة قوة خارجية ما، كما يحدث في حالة الاهتزاز الحر، بل إن مجرد تعريض هذا الجسم لموجة صوتية تشتمل على تردد مساو لتردده الطبيعي ذي قوة مناسبة هو كاف لحمله على الاهتزاز؛ أي أننا إذا عرضنا شوكة رنانة ترددها الطبيعي ١٠٠ذ/ث لموجة بسيطة صادرة عن شوكة رنانة أخرى مساوية لها في التردد، أو لنغمة مركبة تشتمل على نغمة توافقية ذات قوة كافية ترددها ١٠٠ذ/ث، فإن ذلك سيحمل الشوكة الساكنة على الاهتزاز. وحينئذ يقال إن هذه الشوكة الساكنة تهتز اهتزازاً قسرياً forced vibration، ويسمى الأثر السمعي الناتج عن الاهتزاز القسري الاستجابة بالرنين resonance response، (أو تسمى اختصاراً الرنين resonance)، كما يسمى التردد الذي تعمل به الشوكة عند استجابتها تردد الرنين resonance frequeucy.

ومما تقدم يتبين لنا أن التردد الطبيعي لأي جسم هو نفسه تردد الرنين لنفس الجسم. أو - بعبارة أخرى - أن التردد الذي ينتجه الجسم عند اهتزازه اهتزازاً حرّاً هو التردد نفسه الذي ينتجه عند اهتزازه اهتزازاً قسرياً.

والآن فلنسترجع ما سبق أن ذكرناه من معلومات عن خاصية الاضمحلال وسنجد من اليسير علينا أن نصل إلى النتائج الآتية:

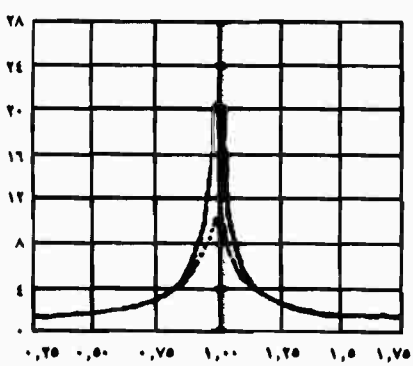
١ - إذا كان التردد الطبيعي لجسم ما تردداً توافقيًا واحداً بسيطاً، أو - بعبارة أخرى - إذا كان هذا الجسم لا ينتج عند اهتزازه اهتزازاً حرّاً إلا

نغمة غير مضمحلة، فإنه لن يستجيب بالرنين إلا لتردد مماثل تماماً لتردده الطبيعي.

٢ - إذا كان التردد الطبيعي لجسم ما يتكون من تردد مركزي بالإضافة إلى مجموعة من الترددات الثانوية الجانبية الواقعة حول هذا التردد المركزي، أو - بعبارة أخرى - إذا كان الجسم يُصدر عند اهتزازه اهتزازاً حرّاً نغمة مضمحلة فإنه لن يستجيب بالرنين (أي عند اهتزازه اهتزازاً قسرياً) للتردد المماثل لتردده المركزي فحسب، بل ستتسع استجابته لتشمل عدداً من الترددات الثانوية الجانبية الواقعة حول ذروة هذا التردد المركزي، وستكون استجابته أكبر للترددات الواقعة ما بين نقطتي منتصف القوة (وقد سبق بيان الحساب الرياضي لتحديد هاتين النقطتين. انظر ص ص ٦٣ - ٦٤).

٣ - إن الاستجابة بالرنين عندما يكون الجسم من النوع الذي يصدر نغمة مضمحلة إنما تصل إلى ذروة حساسيتها حين يتعرض الجسم لتردد يماثل تردده المركزي.

هذه النتائج الثلاث يوضحها الشكل ١٩. الذي يمثل استجابة جسمين تردد كل منهما الرنيني ١ذ/ث لاهتزاز جسم تردده الطبيعي ١ذ/ث. ونلاحظ أن أحد هذين الجسمين (وهو الذي دونت استجابته بخط متصل) أقل اضمحلالاً من الجسم الآخر (الذي دونت استجابته بالنقط)؛ ولذلك نجد أن اتساع تردد الرنين الخاص بالجسم الأول (غير المضمحل) أكبر نسبيّاً من اتساع تردد الرنين الخاص بالجسم الثاني (المضمحل).



(شكل ١٩) الاستجابة بالرنين

فرغنا الآن من تحديد قوانين استجابة الأجسام بالرنين للترددات المماثلة أو المقاربة لترددها الطبيعي. وسنتناول الآن الخصائص الكمية لهذه

الاستجابة من حيث الاتساع، أو ما يرتبط به من المقارنة بين كمية الطاقة او القوة المُحركة driving energy or power، وبين كمية الطاقة أو القوة في الاستجابة نقصاً وزيادة.

من البدهي أن الجسم الذي يستجيب بالرنين لا ينشىء من ذاته القوة التي تحركه، وإنما يهتز بانتقال الطاقة الناشئة عن انتشار الموجة الصوتية إليه. والجسم المستجيب يمتص الطاقة التي يتعرض لها ويختزنها، ثم يبثها، فيترتب على ذلك اهتزازه اهتزازاً قسرياً، وهو ما سميناه بالرنين.

ولكنا نلاحظ أننا إذا وضعنا شوكة مطروقة فوق صندوق رنين ملائم فإننا نسمع صوتها أعلى مما لو كانت بعيدة عن الصندوق، كذلك فإن وتر العود إذا ما طرق بعيداً عن صندوق الآلة فإن الصوت المسموع سيكون ضعيفاً، بعكس ما إذا طرق وهو مشدود على الصندوق، أي أن تردد الرنين يبدو وكأنه يمتاز باتساع أعلى من اتساع التردد الطبيعي للشوكة.

هل يعني ذلك أن الطاقة التي بثها صندوق الرنين أكبر من الطاقة التي امتصها واختزنها، أو هل يعني ذلك - بعبارة أخرى - أن الطاقة الصادرة عن صندوق الرنين أكبر من الطاقة الداخلة إليه؟

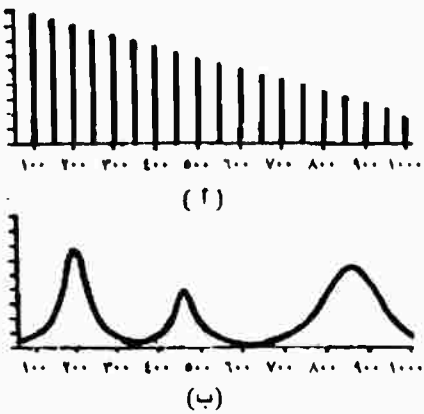
إن الجواب على ذلك قطعاً بالنفي، بل إن العكس هو الصحيح؛ وذلك أن جانباً من هذه الطاقة يتبدد أثناء عملية الامتصاص والاختزان والبث؛ فالمنطقي إذن أن تكون الطاقة الصادرة عن الصندوق أقل من الطاقة التي امتصها، وهذا هو ما يحدث بالفعل. فحتى عندما يكون تردد الجسم المستجيب مماثلاً تماماً لتردد الجسم مصدر الاهتزاز فإن اتساع تردد الرنين لن يكون مماثلاً تماماً وبنسبة ١٠٠٪ لاتساع التردد الطبيعي للجسم الذي هو مصدر الاهتزاز. إذن، فما تفسير الانطباع السمعي الذي تدركه الأذن عندما تسمع استجابة الرنين أعلى من الصوت الناتج عن التردد الطبيعي للجسم بمفرده؟

إن سبب ذلك هو أننا عند حدوث ظاهرة الرنين إنما نسمع التردد الطبيعي للجسم/ المصدر، مضافاً إليه تردد الرنين للجسم المستجيب؛ أي أن اتساع التردد الطبيعي للجسم يَقْوَى بإضافة اتساع تردد الرنين إليه. وهذا هو علة التقوية reinforcement التي يكتسبها التردد بالرنين.

كما أن ثمة ملاحظة أخرى تتعلق بالتناسب بين الطاقة التي يمتصها الجسم المستجيب والطاقة التي ينتجها. إن أي زيادة في الطاقة الناتجة لابد أن يكون على حساب الزمن الذي يستغرقه إنتاج الصوت، فإذا حظى الصوت الناتج عند حدوث ظاهرة الرنين باتساع أعلى فإن زمن استمرار هذا الصوت سيكون أقل من الزمن الذي يستمر فيه سماع الصوت الناتج عن التردد الطبيعي. وتختلف هذه المدة زيادة ونقصاً بحسب وجود الاضمحلال ودرجته.

٣- الترشيح filtering

عرفنا كيف تحدث ظاهرة الرنين بتعرض الجسم المستجيب لموجة صوتية صادرة من جسم في حالة اهتزاز، عندما يتفق التردد الطبيعي للجسم/ المصدر مع تردد الرنين للجسم المستجيب، وعرفنا ما يصحب الرنين من حدوث تقوية لهذا التردد.



(شكل ٢٠)
ترشيح النغمة المركبة
(أ) التكوين الطيفي للنغمة المركبة قبل الترشيح.
(ب) نطاق تمرير المرشح.
(جـ) التكوين الطيفي للنغمة المركبة بعد الترشيح.

فلنفترض الآن أن الجسم مصدر الصوت قد أصدر موجة مركبة من عدد من الترددات، وأننا قد مررنا هذه الموجة من خلال طاقم من الأجسام المستجيبة للرنين، تتفق ترددتها الرنينية مع بعض الترددات الطبيعية التي تشتمل عليها الموجة المركبة دون بعضها الآخر. لا شك أن المتوقع في هذه الحالة أن الترددات الطبيعية المماثلة لترددات الأجسام المستجيبة هي فقط التي سيكون لها القدرة على المرور من خلال طاقم الأجسام المستجيبة للرنين. حينئذ نقول إن هذا الطاقم

من الأجسام المستجيبة في هذه التجربة إنما يقوم بدور المرشِّح filter، وتسمى هذه العملية الترشيح filtering.

وتشتمل عملية الترشيح على مراحل ثلاث:

الأولى : وجود موجة مركبة يراد ترشيحها (المُدْخَلَة) a wave input filter.

الثانية: وجود مُرشِّح يسمح بتمرير حزام معين من الترددات pass - band of the filter.

الثالثة: موجة صوتية صادرة من المرشِّح (المُخْرَجَة) output.

ويوضح الشكل ٢٠ هذه المراحل الثلاث: إذ يمثل الشكل ٢٠ أ التكوين الطيفي لنغمة مركبة من التوافقيات ١٠٠، ١٥٠، ٢٠٠، ٢٥٠، ٣٠٠، ٣٥٠، ٤٠٠، ٤٥٠، ٥٠٠، ٥٥٠، ٦٠٠، ٦٥٠، ٧٠٠، ٧٥٠، ٨٠٠، ٨٥٠، ٩٠٠، ٩٥٠، ١٠٠٠ذ/ث.

أما الشكل ٢٠ ب فيمثل حزام الترددات التي يسمح طاقم الترشيح بتمريره. ويترتب على تمرير النغمة ذات التكوين الطيفي الموضح في الشكل ٢٠ أ من خلال طاقم المرشحات المبين في الشكل ٢٠ب، تغيُّر التكوين الطيفي للنغمة الناتجة تغيراً كبيراً على النحو الذي يوضحه الشكل ٢٠ جـ.

وبمقارنة التكوين الطيفي للموجة الصوتية قبل الترشيح بتكوينها الطيفي بعد الترشيح، يتضح كيف أن حزام تمرير الترددات في المرشح هو الذي يتحكم في تحديد التكوين الطيفي للموجة المارة به، فنحن نجد الترددين ١٠٠ذ/ث و ١٥٠ذ/ث يتمتعان بأكبر اتساع بين الترددات قبل الدخول إلى المرشِّح، على حين نجد اتساع التردد ٢٠٠ بعد الترشيح أكبر من اتساع التردد ١٠٠ذ/ث. ويمكن أن نقارن اتساعات الترددات ٥٥٠، ٦٠٠، ٦٥٠، ٧٠٠ قبل الترشيح وبعده لنتبين مدى التغير الكبير الذي يمكن أن يحدث للموجة المركبة بعد ترشيحها، حتى إن من يسمع الصوت الناتج عن الموجتين قبل الترشيح وبعده سيحكم بانعدام الصلة بينهما. ومعنى ذلك بداهةً أن الترشيح يمكنه أن يغير من نوع الصوت بإعادة توزيع القوى (الاتساعات) على المكونات، بحيث يتم إبراز بعض الترددات وإهمال بعضها الآخر، بل إن في إمكان المرشِّح أن يبرز ترددات كانت ضعيفة نسبيّاً، وأن يهمل ترددات كانت تتمتع بقوة أكبر قبل

ترشيحها. ولا شك أن هذه العملية تؤثر تأثيراً كبيراً على إدراكنا للصوت الناتج بعد الترشيح.

ومن الأهمية بمكان أن نقرر وجود نوعين من المرشّحات، قياساً على وجود نوعين من الأجسام المستجيبة للرنين؛ **الأول**: المرشح غير المضمحل undamped filter، **والثاني**: المرشح المضمحل damped filter. فكما أن الجسم الذي لا ينتج عند اهتزازه اهتزازاً حرّاً إلا تردداً واحداً بسيطاً لا يمكنه أن يستجيب بالرنين إلا لمثل هذا التردد، فكذلك إذا قام هذا الجسم بمهمة المرشّح فإنه لن يسمح إلا بتمرير هذا التردد متجاهلاً كل الترددات الأخرى. ومثل هذا المرشّح يسمى المرشح غير المضمحل.

أما الجسم الذي ينتج نغمة مضمحلة تتكون من تردد مركزي ومجموعة أخرى م/ن الترددات الجانبية الواقعة حول التردد المركزي، فسنجده يستجيب بالرنين للتردد المركزي وللترددات الواقعة ما بين نقطتي منتصف القوة. وكذلك الأمر إذا قام مثل هذا الجسم بدور المرشّح فإنه لن يسمح بتمرير التردد المركزي فقط، بل يسمح أيضاً بمجموعة الترددات الواقعة خلال عرض الحزام المحصور ما بين نقطتي منتصف القوة (راجع فيما سبق حديثا عن الاضمحلال). مثل هذا المرشّح نعده مرشّحاً مضمحلاً. وكلما زادت درجة الاضمحلال في المرشّح اتسع عرض الحزام الذي يقوم بتمرير الترددات، واستجاب لمزيد من الترددات الثانوية الجانبية المتجمعة حول تردده المركزي.