

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

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

مثال (1-3-4) :

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

الحل :

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

على هذه الصورة يكون :

حيث الدليل H يمثل النوتة المنخفضة، و B النوتة المرتفعة. ومن هنا نجد :

$$L_H = L_B(f_B/f_H)$$

ومن أجل بيانو هذا سيكون طولاً كبيراً جداً ومن أجل الخروج من هذا الوضع، فمن أجل عزف نوتة منخفضة نضع الوتر أثنى (أثقل) بحيث أنه عند استخدام جهاز عزف كبير فلا يتجاوز طول الوتر 3m. إن صوت أوتار الأدوات سيكون منخفضاً جداً، وذلك إذا خرج فقط نتيجة لاهتزاز الأوتار، وبما أن الأوتار رفيعة جداً فلكي تضغط وتخلخل حجم هواء كبير، يستخدم في الأدوات ذات الأوتار مضخم ميكانيكي خاص به، وبالضبط موجه صوتي، إن عملية التضخيم هذه مبنية على أساس أن الاتصال بالهواء يتم مع سطح كبير جداً. وعند اهتزاز الأوتار فإن موجه الصوت يهتز أيضاً. وبما أن مساحة الموجه الصوتي المتصلة مع الهواء أكبر بكثير من مساحة الأوتار، لذلك تستطيع أن تثير موجة صوتية أكثر شدة وعلى هذه الصورة يضخم الصوت. وفي الغيتار الكهربائي فإن موجه الصوت لا يمتلك هذا المعنى، لأن اهتزاز أوتاره تضخم بمساعدة دارات كهربائية. إن الأدوات مثل آلات النفخ الخشبية والنحاسية والأرغن يتشكل فيها الصوت على حساب الأمواج المستقرة في عامود الهواء داخل الأنبوبة. ويمكن أن تنشأ الأمواج المستقرة في الهواء الموجود في أي جوف، غير أنه وبصورة استثنائية الأجواف البسيطة الشكل (على سبيل المثال أنبوبة طويلة ورفيعة) إن حساب تواتر هذه الأمواج صعباً. والأمر كذلك من أجل أدوات النفخ الكبيرة. فعند العزف على الأدوات الموسيقية النفخية يحرك الموسيقار لسانه أو شفاهه من أجل إثارة اهتزاز في العمود الهوائي. وفي أجهزة أخرى يوجه تيار الهواء إلى حواف ثقوب أو راس البوق، وهذا يؤدي إلى نشوء اضطراب ونتيجة لذلك يحصل الاهتزاز. وتحت تأثير الإثارة (بغض النظر عن منبعه) ينشأ داخل أنبوبة الجهاز الموسيقي اهتزازات بمجموعة تواترات غير أنه لا يبقى من هذه التواترات إلا تلك الاهتزازات ذات التواترات الثابتة والموافقة للأمواج المستقرة. عندما درسنا الوتر المثبت من طرفيه بيننا أنه على كلتا نهايتيه تمتلك الأمواج المستقرة عقداً (النقاط التي لا يوجد عندها حركة). وعلى طول الوتر يتشكل بطن أو عدة بطون (النقاط التي تكون عندها سعة الاهتزاز عظمى). كل زوج من البطون يفصلها عقدة.

تمتلك الأمواج المستقرة ذات التواتر الأصغر والموافقة لبطن واحد أو مغزل وحيد وتسمى التواتر الأساسي. إن الأمواج المستقرة ذات التواترات الأعلى تسمى بالتوافقية. وكقاعدة تسمى التوافقية الأولى بالتواتر الأساسي أما التوافقية الثانية فلها تواتر يساوي ضعف التواتر الأساسي وهكذا... (أنظر الشكل (1-2-48)).

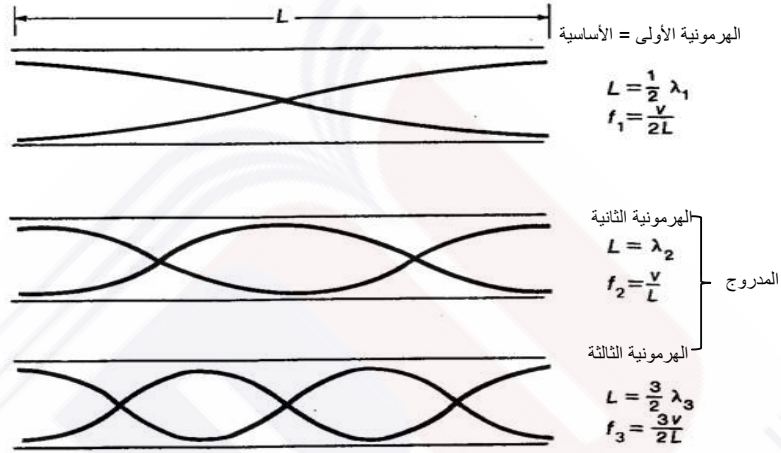
وبصورة مشابهة تتكون الأحوال في عمود الهواء ولكن يجب أن نتذكر أنه في هذه الحالة فإن الهواء نفسه يهتز بحيث أن الهواء في النهاية المغلقة للأنبوبة يجب أن يشكل عقد (إزاحة) حيث لا يستطيع الهواء أن يتحرك بحرية، أما عند النهاية المفتوحة للأنبوبة فسيشكل بطن حيث أن الهواء يمكنه الحركة بحرية. وتمثل على الشكل (1-3-2).

تبين المخططات سعة الاهتزاز للجسيمات المهتزة في الهواء الداخل للأنبوبة. لا تنشأ البطن بدقة عند النهايات المفتوحة للأنبوبة. وتتعلق مواضعها بأبعاد الأنبوبة (أقطارها). فإذا كان قطر الأنبوبة صغيراً بالمقارنة مع طولها (وهذا ما يمثل الواقع)، هذا يعني أن البطن أو المغزل سينشأ بصورة قريبة جداً من نهاية الأنبوبة وهذا مبين على الشكل (1-3-2). (وعلى موضع البطن يؤثر أيضاً طول الموجة ومعاملات أخرى).

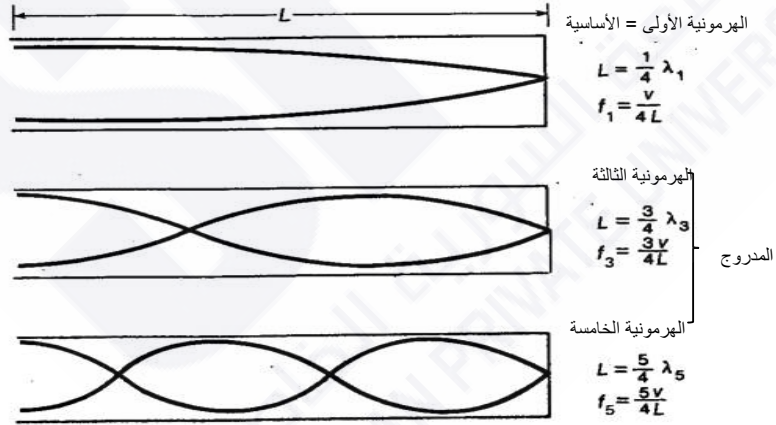
لندرس في البداية أنبوبة مفتوحة الشكل (1-3-2أ) تمتلك الأنبوبة المفتوحة بطون انزياح جزئيات الهواء على كلا الطرفين ومن ثم ومن أجل وجود موجة مستقرة داخل الأنبوبة يجب أن يكون على الأقل عقدة واحدة. وهذا يوافق التواتر الأساسي للأنبوبة، وبما أن المسافة بين عقدتين جارتين أو بطنان جاران يساوي $\lambda/2$ وفي هذه الحالة يتسع داخل الأنبوبة نصف طول الموجة : $L = \lambda/2$ والتواتر الأساسي يساوي :

حيث : v سرعة الصوت في الهواء.

إن الموجة المستقرة ذات العقدتان هي عبارة عن المدروج الأول First overtone أو الاهتزازية التوافقية الثانية. يساوي طول موجة هذه الاهتزازات نصف طول موجة النغمة الأساسية $L = \lambda$ ، أما التواتر فأكبر بمرتين. في الحقيقة إن تواتر كل مدروج يساوي عدد صحيح من التواتر الأساسي، وهذا يتوافق حقيقة ما كنا قد وجدناه بالنسبة للوتر.



(i)



(ب)

الشكل (1-3-2) موديلات الاهتزاز (الأمواج المستقرة)

أ- من أجل أنبوبة مفتوحة. ب- أنبوبة مغلقة.

وفي الأنبوبة المغلقة الشكل (1-3-2) ينشأ دائماً على نهايتها المغلقة عقدة إزاحة، أما على النهاية المفتوحة فينشأ بطن. وبما أن المسافة بين العقدة والبطن الأقرب إليها تساوي $\lambda/4$ فعند التواتر الأساسي للاهتزاز سيتسع داخل الأنبوبة فقط ربع موجة : $L = \lambda/4$. على هذه الصورة يساوي التواتر الأساسي $f_1 = v/4L$, أي نصف التواتر الأساسي في أنبوبة مفتوحة لها نفس الطول. يوجد اختلافات أخرى كما هو مبين على الشكل (1-3-2). فيوجد في الأنبوبة المغلقة فقط توافقيات فردية أي أن تواترات المدروج تساوي التواتر الأساسي مضروباً بـ 3, 5, 7, الخ إن الموجة الصوتية التي تواترها يساوي تواتر الموجة الأساسية مضروباً بـ 2, 4, لا يمكن أن يمتلك عقد على إحدى نهايتيه وبطن على النهاية الأخرى وهذا يعني أن الأمواج المستقرة التي لها مثل هذا التواتر في أنبوبة مغلقة لا يمكن أن تتواجد.

ويستخدم في الأرغن أنابيب مفتوحة ومغلقة. ويحصل على أصوات مختلفة الارتفاعات من الأرغن باستخدام أنابيب مختلفة الطول والتي طولها من عدة سنتيمترات حتى 5m أو أكثر.

إن الأدوات الموسيقية النفخية الأخرى تعمل إما بأنابيب مفتوحة أو بأنابيب مغلقة. على سبيل المثال المزمار هو عبارة عن أنبوبة مفتوحة، وبما أنها مفتوحة ليس فقط من الجهة التي ينفخ فيها المزمار وإنما من الجهة المقابلة، فنحصل على الصوت المختلف الارتفاع عند العزف على المزمار وكثير من الأدوات الموسيقية عن طريق تقصير طول الأنبوبة أي فتح ثقب على طول الأنبوبة وفي الأنبوبة على العكس عند الضغط على الصمام يزداد طول عمود الهواء. ففي كل هذه الأدوات إن زيادة طول عمود الهواء المهترز يوافق انخفاض تواتر الصوت.

يبين المنحني على الشكل (1-3-2) إزاحة جزيئات الهواء في الأمواج المستقرة غير أن الضغط سيتأخر بالطور بـ 90° عن الإزاحة كما هو في حالة الأمواج المتقدمة. على هذه الصورة عند النهايات المفتوحة للأنبوبة ستنشأ عقد ضغط (وهذا مفهوم حيث أنه عند النهايات المفتوحة للأنبوبة تتجاور مع الهواء الجوي)، أما بطون الضغط ستنشأ عند نهايات مغلقة للأنبوبة.

مثال (1-3-5) :

ما هو التواتر الأساسي والتواترات الثلاث الأولى لأنبوبة الأرغن التي طولها 26m عند درجة الحرارة 20°C وذلك إذا كانت الأنبوبة : أ- مفتوحة. ب- مغلقة؟

الحل :

عند درجة الحرارة 20°C تساوي سرعة الصوت في الهواء 343m/s.

أ- من أجل أنبوبة مفتوحة يساوي التواتر الأساسي :

$$f_1 =$$

أما التواترات الثلاثة الأولى فتساوي 1320 و 1980 و 2640 هرتز الخ

ب- يتضح من الشكل (16-2) أن :

$$f_1 =$$

غير أنه في هذه الحالة سيتواجد فقط توافقيات فردية وتساوي التواترات الثلاثة الأولى المدارج الثلاثة الأولى: 990 و 1650 و 2310 هرتز.

مثال (1-3-6) :

مزمارة مصمم على النموذج المعروف بحيث أن أغلاق كل الثقوب فإن صوته يتوافق مع نقطة الـ D_0 الدو الأوكتاف الأول (الطبقة الثمانية الأولى). كتواتر أولي. عين بصورة تقريبية المسافة بين بز البوق ونهاية المزمارة. (نلاحظ أن هذه المسافة يمكن تعيينها فقط بصورة تقريبية، حيث أنه لا ينشأ البطن بدقة في بز البوق). أعتبر درجة حرارة الهواء 20°C .

الحل :

إن سرعة الصوت في الهواء عند درجة الحرارة 20°C تساوي 343m/s (حسب الفقرة (1-16)). عند ذلك وطبقاً للشكل (1-3-2) فإن التواتر الأساسي f_1 يرتبط بطول عمود الهواء المهتز L بالعلاقة $f_1 = v/2L$. ومن هنا نجد أن المسافة بين بز البوق ونهاية المزمارة تساوي:

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

مثال (1-3-7) :

في المزمارة المدروس في المثال السابق والمغلق ثقوبه. ما هو تواتر الصوت الخارج منه عند درجة الحرارة 10°C ؟

الحل :

إن طول المزمارة يساوي $65,0\text{cm}$ غير أن سرعة الصوت أقل لأنه عند إنقاص درجة الحرارة 10°C فإن سرعة الصوت تنقص بمقدار $0,60\text{m/s}$. عند هبوط درجة الحرارة حتى 10°C . تنقص سرعة الصوت بمقدار 6m/s وتصبح مساوية 337m/s وتواتر الصوت سيباوي:

$$f = \cdot$$

يبين هذا المثال لماذا الموسيقار عند عزفه على آله النفخية بعد وقت قصير من العزف يقوم بتسخين آله حتى تعطي صوتاً صحيحاً. إن تأثير الحرارة على الآلات الوترية أقل منها في الآلات النفخية.

1-3-5- نوعية الصوت :

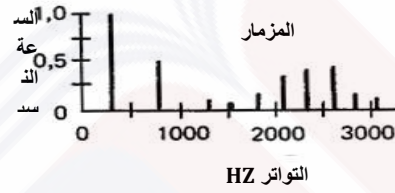
عندما نسمع صوت وخاصة صوت موسيقياً نستقبل سوية شدته وارتفاعه وأيضاً خاصة أخرى له وهي ما يعرف بنوعيته. على سبيل المثال لو عزف على بيانو وعلى المزمار الخشبي نوطاً لها نفس سوية الشدة ونفس الارتفاع فالصوت الذي نحصل عليه سيكون مختلفاً بوضوح. ولن نخطئ التمييز بين صوت البيانو وصوت المزمار الخشبي، ويساعدنا في التمييز بين صوت إحدى الأدوات عن الأداة الأخرى نوعية الصوت. ويستخدم في الموسيقى أيضاً مصطلحات الجرس ولون المقام الموسيقي للصوت. كما في حالة سوية الشدة، وارتفاع الصوت، إن نوعية الصوت يمكن ربطها مع قيم فيزيائية مقاسة.

تعيين نوعية الصوت بوجود المدروجات وعددها وسعاتها النسبية.

وبصورة عامة عندما تعزف نوطاً على آلة موسيقية يوجد في الصوت وبصورة متواقة التواتر الأساسي ومدروجاته. فعلى الشكل (15-13) شاهدنا توضع ثلاثة أمواج - في تلك الحالة الموجة الأساسية والمدروجان الأوليان (بسعات محددة) وهو يقود إلى موجة محصلة معقدة. عند آلات موسيقية مختلفة، السعات النسبية لمدروجات مختلفة تكون مختلفة أيضاً. وهذا بالضبط يعطيه صوت كل آلة والذي يخص نوعيته أو جرسه.

إن المنحني الذي يبين القيم النسبية لهرمونية الصوت الذي تعطيه آلة معينة يسمى بطيف الصوت. إن بعض الأمثلة النموذجية لأطياف الصوت الناتج عن أدوات موسيقية مختلفة مبينة على الشكل (1-3-3).

وعادة الصوت الأكثر سعة يمتلك التواتر الأساسي وبالضبط هذه السعة نستخدمها كارتفاع الصوت.

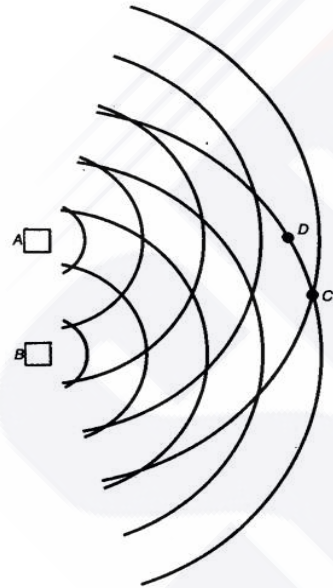


الشكل (3-3-1) الطيف الصوتي لبعض الأدوات الموسيقية

إن طريقة العزف على الأداة الموسيقية تؤثر بصورة ملحوظة على نوعية الصوت. على سبيل المثال بتحريك أوتار الكمان بالأصابع سنحصل على صوت يختلف عنه فيما لو عزفنا على الكمان بواسطة القوس. غالباً ما نصادف الصوت مثل الصوت الذي يحصل عند ضرب قطعتين حجريتين ببعضهما بعضاً والذي هو عبارة عن ضجيج يصف نوعية معينة غير أن الارتفاع المعين لهذا الصوت لا يمكن فصله. مثل هذا الضجيج يتصف بعدد كبير من التواترات والمرتبطة بصورة ضعيفة بعضها بعضاً. لو مثلنا الطيف الصوتي لهذا الضجيج لن يكون هناك خطوط منفصلة يماثل ما هو مبين على الأطياف المبينة على الشكل (3-3-1) وإنما سيمثل طيفاً مستمراً أو تقريبياً مستمراً للتواترات.

1-3-6- تداخل الأمواج الصوتية - الخفقان :

في الفصل السابق بيّنا أنه عند عبور موجتان مترابطتان وبنفس الوقت من خلال مكان معين من الفضاء فإن هاتان الموجتان تتداخلان بعضهما بعضاً. بما ان مثل هذا التداخل ينشأ في الأمواج من أي نوع ما لهذا سنتوقع أن الأمواج الصوتية ستتداخل أيضاً وهذا ما يحصل حقيقةً. وكمثال بسيط ندرس مضخمان صوتيان (A و B) يقعان على مسافة d الواحد عن الآخر على جدار القاعة الشكل (1-3-4). سنعتبر أن كلا المضخمان الصوتيان يعطيان أمواجاً



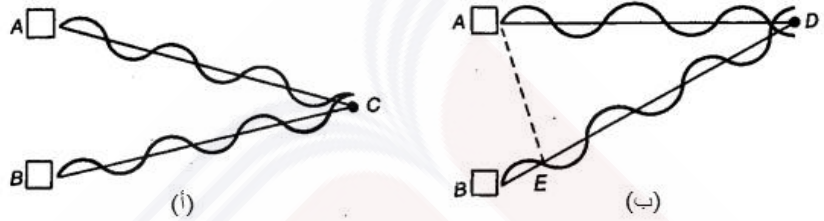
الشكل (1-3-4) تداخل الأمواج الصوتية المنتشرة مع مضخمين صوتيين

صوتية لها نفس التواتر (متساوية للثان) ولها نفس الطور وهذا يعين أن أحد المضخمان الصوتيان يشكل انضغاطاً للهواء بنفس الوقت مع الآخر. تبين الخطوط المتحدة المركز على الشكل (1-3-4) بطون الأمواج الصوتية المنتشرة من كل مضخم صوتي. وبالأخذ بعين الاعتبار أنه من الضروري فهم أن في الموجة الصوتية يمثل البطن انضغاط الهواء أما القعر بين بطنين فهو تخلخل الهواء.

إن الإنسان أو (مستقبل الصوت) الموجود في النقطة C والواقعة على نفس المسافة من كل من المضخمان الصوتيين، سيسمع صوتاً عالياً، حيث أنه في هذه النقطة سيجري التداخل مع تضخيم للأمواج. وفي النقاط مثل النقطة D على الشكل (1-3-4) سنسمع صوتاً خافتاً أو غير مسموع على الإطلاق. في مثل هذه النقاط عند تداخل الأمواج ستخمد بعضها بعضاً:

تتطابق موجة انضغاط مع موجة تخلخل وبالعكس أنظر الشكل (15-21). وبمناقشة مشابهة من أجل الأمواج على سطح الماء في الفصل السابق. يمكن دراسة ذلك أكثر سهولة إذا مثلنا المقطع الجانبي للأمواج على شكل منحنى كما في الشكل (1-3-5). سنرى أن التداخل مع التضخيم سيظهر في النقطة C، حيث أنه في تلك النقطة كلا الموجتين لها بطون أو قعر بنفس الوقت. وما يحصل في النقطة D موضحاً على الشكل (1-3-5ب). الموجة المنتشرة في

المضخم B يجب أن تقطع مسافة أكبر من الموجة المنتشرة من المضخم A. لذلك الموجة المنتشرة من B تتأخر بالنسبة للموجة المنتشرة من A.



مضخماً (بناءً) في النقطة C وهداماً في النقطة D

أُختيرت النقطة E على الشكل بحيث أن المسافة ED تساوي المسافة AD. على هذه الصورة إذا كانت المسافة BE مساوية بدقة نصف طول موجة الصوت، هذا يعني أنه في النقطة D كلا الموجتين ستعان في طورين متعاكسين وبالتالي ستخدان بعضهما بعضاً. إن هذا القانون يمكن أن يكون معياراً لتعيين النقاط التي يجري فيها التداخل مع الهدم: يحصل مثل هذا التداخل في النقاط التي تقع على مسافة من المضخم الأول أكبر من المسافة عن المضخم الثاني وبدقة بمقدار نصف طول موجة. نلاحظ أنه إذا كانت المسافة الإضافية (BE على الشكل) مساوية أعداداً صحيحة من طول الموجة (2,3,.... أطوالاً موجية) هذا يعني أن كلا الموجتين تقع في طور ويحصل التداخل مع تضخيم.

وإذا كانت المسافة BE مساوية (1/2,3/2,5/2,.... من طول الموجة) هذا يعني أننا نحصل على تداخل هدام (تضعيف). إذا كان المضخم الصوتي يعطي أمواجاً لكل التواترات هذا يعني أنه في نقطة لا على التعيين (اختيارية) مثل النقطة D يحصل التداخل مع التضعيف (الهدام) ليس لكل الأمواج. وطبقاً للمعيار الوارد من قبل، فإن التداخل الهدام يحصل فقط من أجل الأمواج ذات الطول الموجي المعين.



مثال (1-3-8) :

مضخمان صوتيان على الشكل (1-3-4) يقعان على مسافة 1,00m يقف رجل على بعد 4,00m عن المضخم الأول. يصدر المضخم صوتاً بتواتر 1150Hz. والمطلوب: على أي مسافة من المضخم الثاني يجب أن يتواجد إنسان كي يستمع إلى تداخل مع تضعيف (هدام)؟ اعتبر أن درجة حرارة الهواء 20°C.

الحل :

طول موجة هذا الصوت تساوي :

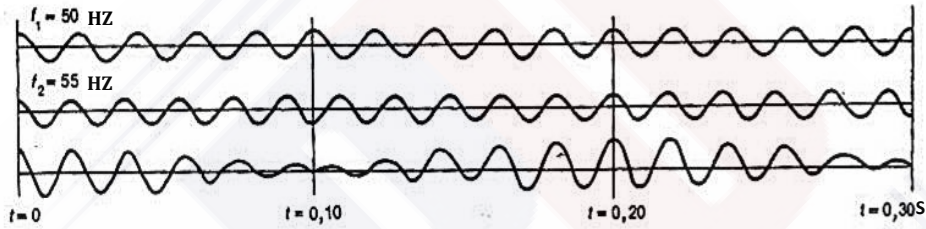
$\lambda :$

ولكي يحصل التداخل مع تضخيم، يجب أن يقف المستمع على مسافة من أحد المضخمات بنصف طول موجة الصوت (أي على مسافة 0,15m) وأقرب أو أبعد من المضخم الثاني (أي على مسافة 4,15m أو 3,85m عن المضخم الثاني). يمكن ملاحظة أنه إذا كان المضخمان موضوعان على مسافة 0,15m من بعضهما بعضاً هذا يعني أننا لن نجد نقاط والتي المسافة عنها حتى أحد المضخمات ستزيد بـ 0,15m عن المسافة للمضخم الثاني، على هذه الصورة لن يكون في كل النقاط التي يجري فيها التداخل تضخيماً.

إن المثال الهام لجمع الأمواج هو **ظاهرة الخفقان**. تنشأ هذه الظاهرة إذا امتلك منبعان صوتيان (على سبيل المثال رنانتان) تواترات متقاربة وغير متساوية بدقة. إن الأمواج الصوتية المنتشرة من المنبعين تتداخل فيما بينها وبالتالي سوية شدة الصوت تزداد وتتناقص. إن مثل هذا التغير المنتظم والمتكرر مع الزمن في شدة سوية الصوت يسمى بـ الخفقان. ومن أجل فهم كيف ينشأ الخفقان ندرس موجتان صوتيتان لهما نفس السعة وتواتر إحداهما $f_1 = 50\text{Hz}$ والثانية $f_2 = 55\text{Hz}$. خلال 1,00s يهتز المنبع الأول 50 هزة والثاني 55 هزة.

لندرس سلوك الأمواج في نقطة من الفضاء تبعد نفس المسافة عن كلا المنبعين. على الشكل (1-3-6) وعلى المنحني العلويان وضعت تابعة مقطع جانبي لكلا الموجتين مع الزمن. وبين المنحني الثالث مجموع الموجتين. وفي اللحظة الزمنية $t = 0$ كلا الموجتين يقعان بنفس

الطور وعند التداخل يحصل تضخيم. وبما أن كلا الموجتين لهما تواترات مختلفة ففي اللحظة الزمنية $t = 0,10s$ سيقعان في طور متعاكس وسيحصل التداخل الهدام. وعندما $t = 0,20s$ سيقعان من جديد بنفس الطور وستكون السعة المحصلة كبيرة. على هذه الصورة كل $0,20s$ ستزداد السعة أما في الفاصل الزمني لهذا الزمن فالمحصلة ستضعف أو تقل. وبالضبط هذه الزيادة والنقصان في الشدة سنشعر فيها كخفقان. وفي حالتنا هذه فإن الخفقان يحصل خلال $0,20s$. على هذه الصورة فإن الخفقان يحصل 5 مرات في الثانية أي تواتر الخفقان يساوي $5Hz$.



الشكل (1-3-6) ينشأ الخفقان نتيجة تراكب موجتان صوتيتان ذات اختلاف قليل بالتواتر

هذه النتيجة - تكافئ تواتر الخفقان لموجتان مختلفتا التواتر. يمكن تفسيرها على الشكل التالي:

لنفرض موجتان تواترهما f_1 و f_2 توصف في نقطة من الفراغ على الشكل التالي:

$$D_1 = D_M \sin(2\pi f_1 t)$$

وحسب مبدأ التطابق يمكن كتابة الإزاحة المحصلة على الشكل:

$$D = D_1 + D_2$$

وباستخدام قانون التحويل المثلثي:

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \left(\frac{A+B}{2} \right) \cos \left(\frac{A-B}{2} \right)$$

نحصل على:

$$D = 2D_M \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right)$$

يمكن تفسير العلاقة (1-3-8) على الشكل التالي: إن تراكب موجتان يعطي موجة لها تواتر اهتزاز يساوي التواتر الوسطي للموجتان الأوليتان وبالضبط $(f_1 + f_2)/2$. وسعة الاهتزاز المحصل في النقطة المعتبرة تعطى بالعلاقة بعد تربيع ما ضمن القوسين. إن هذه السعة تتعلق بالزمن وتتغير من الصفر حتى قيمة عظمى $2D_M$ (مجموع سعات الأمواج المترابكة) ذات التواتر $(f_1 - f_2)/2$. ينشأ الخفقان كل مرة عندما التابع $\cos[2\pi((f_1 - f_2)/2)t]$ يصبح مساوياً +1 أو -1 كما في الشكل (1-3-6): هذا يعني أنه خلال دور يحصل خفقانان، حيث أن تواتر الخفقان يساوي ضعف قيمة $(f_1 - f_2)/2$ ، أي أنها تساوي الفرق بين تواترات الأمواج المتداخلة $(f_1 - f_2)$.

تنشأ ظاهرة الخفقان لكل الأمواج وهي عبارة عن طريقة حساسة لمقارنة التواترات.

1-3-7- مفعول (أثر) دوبلر :

يمكن أن نلاحظ أن ارتفاع صوت صفارة سيارة الإطفاء، والمتحركة بسرعة عالية نقل بشدة بعد أن تمر السيارة بسرعة قربنا. من الممكن أنكم لاحظتم أيضاً تغير ارتفاع إشارات الحافلة الصوتية المسافرة بسرعة عالية قريبكم. إن ارتفاع صوت محرك سيارة السباق يتغير أيضاً عندما تمر قرب المراقب. إذا اقترب منبع الصوت من المراقب، يزداد ارتفاع الصوت مقارنة مع منبع صوتي ثابت.

إذا ابتعد المنبع الصوتي عن المراقب، فإن ارتفاع الصوت يقل. تسمى هذه الظاهرة بمفعول دوبلر وتحدث عند كافة أنواع الأمواج. وسندرس سبب نشوئها وتغير تواترات الأمواج الصوتية والمرتبطة بهذا المفعول.