

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

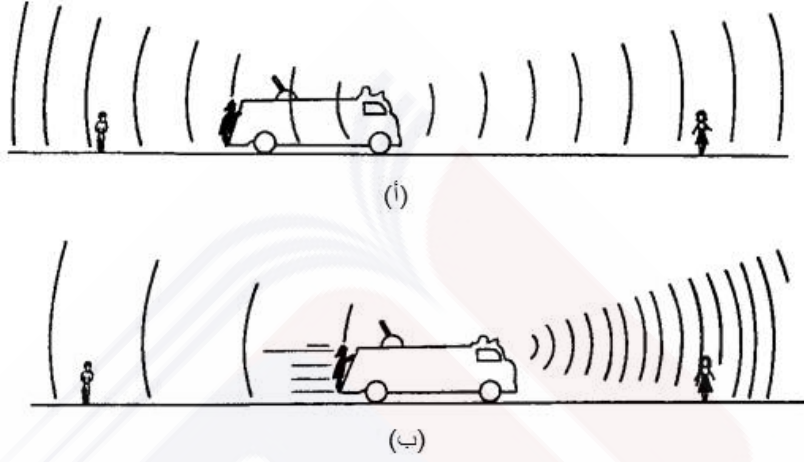
يمكن تفسير العلاقة (1-3-8) على الشكل التالي: إن تراكب موجتان يعطي موجة لها تواتر اهتزاز يساوي التواتر الوسطي للموجتان الأوليتان وبالضبط  $(f_1 + f_2)/2$ . وسعة الاهتزاز المحصل في النقطة المعتبرة تعطى بالعلاقة بعد تربيع ما ضمن القوسين. إن هذه السعة تتعلق بالزمن وتتغير من الصفر حتى قيمة عظمى  $2D_M$  (مجموع 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.



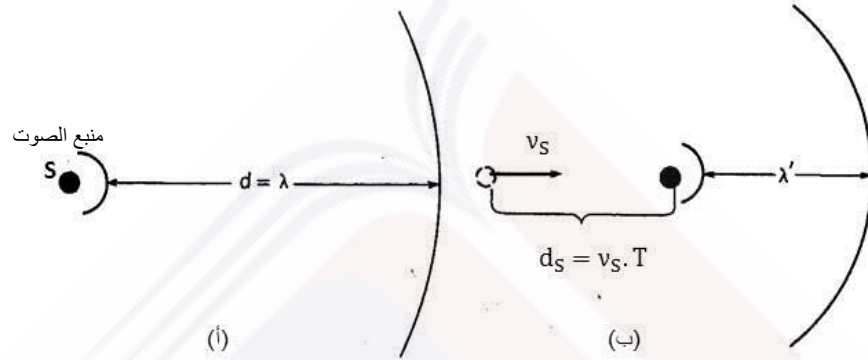
الشكل (1-3-7)

أ- كلا المراقبين على الرصيف يسمعان صوت صفارة سيارة إطفاء الحريق الواقعة بنفس التواتر. ب- مفعول دوبلر: المراقب الذي تقترب منه سيارة الإطفاء يسمع صوت أكبر تواتراً والمراقب الذي تبتعد عنه السيارة يسمع صوتاً أخفض.

لنفرض سيارة إطفاء والتي تملك صفارتها عندما تكون واقفة في مكانها نبضات صوتية ذات تواترات محددة في كل الاتجاهات كما هو مبين على الشكل (1-3-7أ). لنفرض الآن أن سيارة الإطفاء بدأت بالحركة والصفارة تتابع إعطاء الصوت بنفس التواتر السابق. غير أنه واثاء حركة الأمواج الصوتية التي تعطيها الصفارة إلى الأمام ستشعر مقتربة من بعضها بعضاً، خلافاً لحالة السيارة الواقفة وهذا مبين على الشكل (1-3-7ب). وهذا يحدث لأنه أثناء حركة سيارة الإطفاء تلحق بالأمواج المنطلقة منها سابقاً. على هذه الصورة المراقب على الطريق يلاحظ عدد كبير من القمم الموجية التي تعبر أمامه في واحدة الزمن وبالتالي بالنسبة له سيكون تواتر الصوت أعلى. ومن جهة أخرى الأمواج المنتشرة خلف السيارة ستأخر الواحدة عن الأخرى حيث أن السيارة تبتعد عنهما أو تتفصل عنهم. وبالتالي خلال واحدة الزمن، وأمام مراقب يقع خلف السيارة سيعبر كمية أقل من القمم الموجية وارتفاع الصوت سيكون أقل. ومن أجل حساب تغير التواتر



نستخدم الشكل (8-3-1). سنعتبر في جملتنا هذه إن الهواء (أو أي وسط آخر) ثابتاً (غير متحرك). فعلى الشكل (8-3-1) إن منبع الصوت (على سبيل المثال صفارة) ثابتاً.



الشكل (8-3-1) من أجل تعيين تغير التواتر نتيجة لمفعول دوبلر

بين ذروتان موجيتان متتابعتان، مع أن واحدة منهما انطلقت في هذه اللحظة من المنبع الصوتي. إن المسافة بين هاتان الذروتان تساوي طول الموجة  $\lambda$  إذا كان تواتر اهتزاز المنبع الصوتي يساوي  $f$ ، هذا يعني أن الزمن المنقضي بين انطلاق الذرى الموجية يساوي  $T = 1/f$  وعلى الشكل (8-3-1) إن المنبع الصوتي يتحرك بسرعة  $v_s$ . وخلال الزمن  $T$  (التي حددناها منذ قليل) فإن ذروة الموجة الأولى تعبر مسافة  $d = v_s T$ ، حيث:  $v$  سرعة الموجة الصوتية في الهواء (وهي طبعاً ستكون نفسها لا تتعلق بحركة المنبع أو عدمها). وخلال هذا الزمن ينتقل المنبع الصوتي إلى مسافة:  $d_s = v_s \cdot T$ .

عندئذ المسافة بين ذروتين موجيتين متتاليتين تساوي طول الموجة الجديد  $\lambda'$  والتي تكتب على الشكل التالي :

$$\lambda' = d -$$

وبما أن  $T = 1/f$ ، فإن التواتر الموجي  $f'$  يعطى بالعلاقة :

أو :

$$f' = \left( \frac{1}{1 - v_s/v} \right) f \quad (\text{ب})$$

بما أن مقام الكسر أصغر من الواحد سيكون لدينا :  $f' > f$ . على سبيل المثال إذا اعطى المنبع الصوتي صوتاً بتواتر 400Hz عندما يكون ساكناً، هذا يعني أنه عندما يبدأ المنبع بالحركة في اتجاه المراقب الواقع في مكانه وبسرعة 30m/s يسمع المراقب الصوت بتواتر (عند درجة الحرارة 0°C) يساوي:

$$f' = \frac{f}{1 - v_s/v}$$

إن طول الموجة الجديد للمنبع المبتعد عن المراقب وبسرعة  $v_s$  ستساوي :

وعند ذلك يعطى التواتر بالعلاقة :

$$f' = \left( \frac{1}{1 + v_s/v} \right) f \quad (\text{ج})$$

ينشأ مفعول دوبلر أيضاً في تلك الحالة عندما المنبع الصوتي يكون ساكناً (بالنسبة للوسط الذي تنتشر فيه الموجة الصوتية)، أما المراقب فيتحرك. إذا اقترب المراقب من المنبع الصوتي فإنه سيعلم صوتاً بارتفاع أكبر من الذي يرسله المنبع. وإذا المراقب نفسه ابتعد عن المنبع فسيظهر له الصوت أخفض. إن التغير الكمي للتواتر هنا يختلف قليلاً عن الحالة التي عندها يتحرك المنبع، أما المراقب فهو ساكن. في هذه الحالة المسافة بين قمم الأمواج (طول الموجة  $\lambda$ ) لا يتغير وإنما تتغير سرعة حركة القمم بالنسبة للمراقب. إذا اقترب المراقب من المنبع الصوتي فإن سرعة الموجة بالنسبة للمراقب ستساوي :  $v' = v + v_{\text{مراقب}}$ .

حيث :  $v$  سرعة انتشار الصوت في الهواء (نعتبر أن الهواء ساكناً). أما  $v_L$  سرعة المراقب.

وبالتالي التواتر الجديد سيساوي :

وبما أن  $\lambda = v/f$  سيكون :

$$f' = (1 + v_L/v)f$$

وفي حالة ابتعاد المراقب عن المنبع الصوتي فإن السرعة النسبية ستساوي  $v' = v - v_L$  وسيكون لدينا :

$$f' = (1 - v_L/v)f \quad (1)$$

إذا انعكست الموجة الصوتية عن حاجز متحرك، فإن تواتر الموجة المنعكسة نتيجة لمفعول دوبلر ستختلف عن تواتر الموجة الواردة. يمكن تفسير ذلك بالمثال التالي:

### مثال (1-3-9):

تُرسل موجة صوتية ذات تواتر 5000Hz في اتجاه جسم يقترب من المنبع الصوتي وبسرعة 3,30m/s. أحسب تواتر الموجة المنعكسة؟

**الحل:**

في هذه الحالة يظهر أثر دوبلر مرتين :

أولاً- الجسم الذي تتجه نحوه الموجة الصوتية سيسلك سلوك مراقب متحرك وسيسجل الموجة الصوتية بتواتر:

$$f' = \left(1 + \frac{v_L}{v}\right) f =$$

ثانياً- يلعب الجسم كمنبع ثانوي للصوت (المنعكس) والذي يتحرك بحيث تواتر الموجة الصوتية المنعكسة سيباوي:

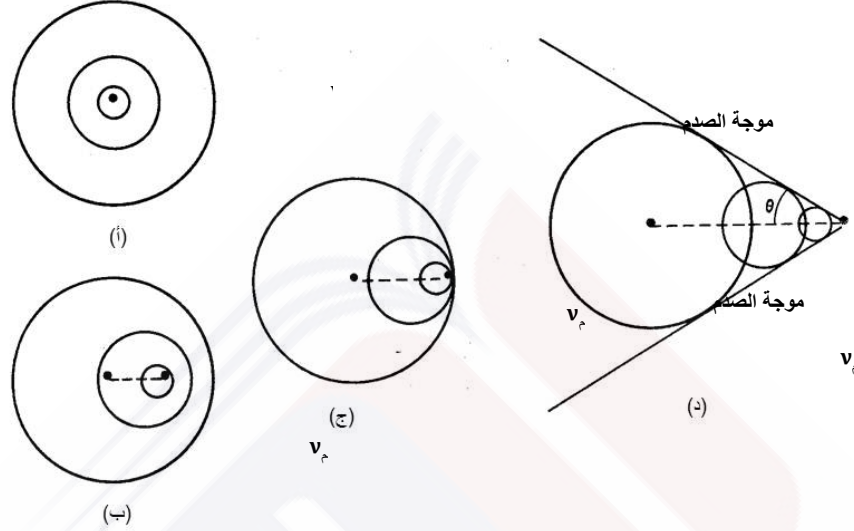
$$f'' = \left(\frac{1}{1 - v_S/v}\right) f'$$

على هذه الصورة فإن انزياح التواتر حسب دوبلر يساوي 100Hz. إذا توضع الموجة الصوتية الواردة والمنعكسة الواحدة على الأخرى، هذا يعني أن تراكب الأمواج سينشأ وهذا يؤدي إلى الخفقان.

يساوي تواتر الخفقان الفرق بين تواترات هاتان الموجتان وفي المثال (1-3-9) ساوت 100Hz. مثل هذا الظهور لمفعول دوبلر يستخدم بصورة واسعة في أجهزة طبية مختلفة والتي تستخدم الأمواج فوق الصوتية بمجال تواتر من مرتبة الميغا هرتز. على سبيل المثال إن الأمواج فوق الصوتية المنعكسة عن كريات الدم الأحمر يمكن أن تستخدم من أجل تعيين سرعة تيار الدم. وبصورة مماثلة يمكن استخدام هذه الطريقة من أجل الكشف عن حركة الخلايا الصدرية الجنينية، وكذلك من أجل المراقبة عن بعد ضربات القلب. مفعول دوبلر يستخدم أيضاً في الرادار من أجل تحديد السيارة التي تتحرك بسرعة أكبر من السرعة المسموحة ولكن هنا تستخدم الأمواج الكهرومغناطيسية الرادارية وليست الأمواج الصوتية. إن دقة العلاقتين (1-3-9) و (1-3-10) تقل عندما تقترب السرعتان  $v_s$  و  $v_L$  من سرعة الصوت. وهذا مرتبط كون إزاحة جزيئات الوسط لا تبقى متناسبة مع قوة الإرجاع أي ينشأ حيود عن قانون هوك حيث أن أكثرية مناقشاتنا النظرية لا تبقى صحيحة.

### 1-3-8- أمواج الصدم والصدمة الصوتية:

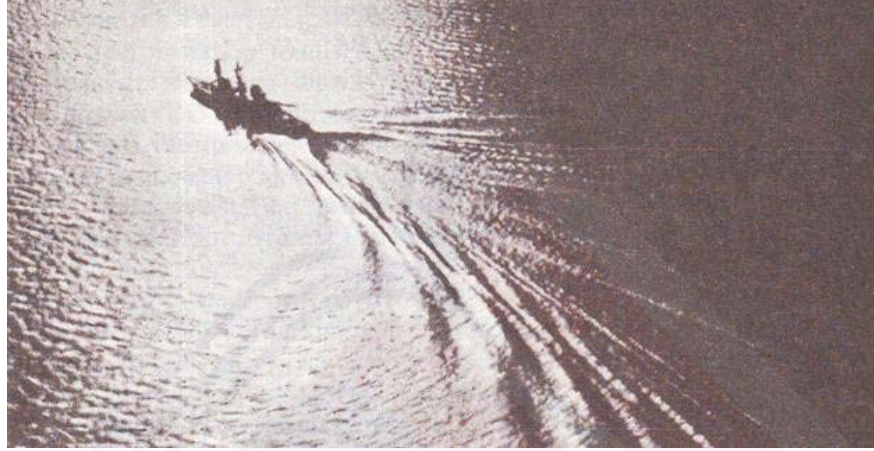
إذا تحرك جسم (على سبيل المثال طائرة) بسرعة أكبر من سرعة الصوت عندئذ يقال أنها تمتلك سرعة فوق صوتية. غالباً تعطى هذه السرعة بعدد ماخ (M) والذي يعين بنسبة سرعة الجسم إلى سرعة الصوت في الوسط المعطى: على سبيل المثال الطائرة المتحركة بسرعة 900m/s في الفضاء عند ارتفاع تكون سرعة الصوت تساوي فقط 300m/s لها سرعة 3M (ثلاثة أعداد ماخ). إذا تحرك المنبع الصوتي بسرعة تحت صوتية، هذا يعني أن ارتفاع الصوت كما شاهدنا يتغير (مفعول دوبلر)، أنظر الشكل (1-3-9أ، ب).



الشكل (9-3-1) الموجة الصوتية المرسله من جسم ساكن (ا) ومتحرك (ب,ج,د). إذا كانت سرعة الجسم أقل من سرعة الصوت هذا يعني أن مفعول دوبلر يأخذ مكاناً (ب). إذا كانت سرعة الجسم أكبر من سرعة الصوت هذا يعني أنه تنشأ أمواج الصدم (د).

إذا تحرك المنبع الصوتي بسرعة أكبر من سرعة الصوت هذا يعني أنه سينشأ مفعول أكثر أهمية ألا وهو أمواج الصدم. في هذه الحالة يسبق المنبع الصوتي الأمواج الصوتية التي يشكلها. كما هو مبين على الشكل (9-3-1ب). وعندما يتحرك المنبع الصوتي بسرعة تساوي سرعة الصوت فالأمواج المرسله منه للأمام وبالمعنى الحرفي تتكسب أمامه. وعندما يتحرك الجسم بسرعة أكبر من سرعة الصوت، تتكوم الأمواج فوق بعضها بعضاً منحصرة في زاوية كما هو موضح على الشكل (9-3-1د). تتوضع الذرى الموجية المختلفة على بعضها بعضاً مشكلة ذروة ضخمة والتي تسمى موجة الصدم. وفي مؤخرة هذه الذروة العالية يتشكل قعر عميقاً.

تنشأ موجة الصدم عند التداخل الشديد لعدد كبير من الأمواج. وفي الهواء تشبه الموجة الأنفية لسفينة بحرية التي تسير بسرعة تزيد عن سرعة انتشار الأمواج التي تشكلها في الماء. الشكل (10-3-1).



الشكل (10-3-1) تشكل السفينة أمواج أنفية

عندما تطير الطائرة بسرعة فوق صوتية فالضوضاء الذي تولده واضطراب الهواء يشكلان موجة الصدم تحوي كمية كبيرة من الطاقة الصوتية. وإذا اقتربت موجة الصدم من الإنسان فإنه سيستقبلها كصدمة صوتية. إن الصدمة الصوتية تستمر لأجزاء من الثانية ولكن الطاقة الموجودة فيها كبيرة لدرجة أنها قادرة على كسر زجاج النافذة أو إثارة آثراً سلبية أخرى. كعدم الراحة النفسية. حقيقة أن الصدمة الصوتية المثارة من طائرة فوق صوتية هي عبارة عن صدمتين. حيث أن موجة الصدم تتشكل في مقدمة ومؤخرة الطائرة. الشكل (11-3-1).

الجبهة الخلفية لموجة الصدم الجبهة الأمامية لموجة الصدم

الشكل (11-3-1) الرجل الواقف على يمين الطائرة سيعلم صدمة صوتية مضاعفة. الرجل الواقف في الوسط منذ قليل سمعه. أما الرجل الواقف على اليسار من الطائرة سيعلمه قريباً





في اللحظة الزمنية عندما تصل الطائرة إلى سرعة الصوت ستقوم باختراق الحاجز الذي تشكله الأمواج الصوتية أمام الطائرة الشكل (1-3-9ب). ومن أجل التفوق على سرعة الصوت يتطلب قوة إضافية من أجل العبور من هذا الحاجز الصوتي.

إذا وصلنا إلى السرعة الفوق صوتية فهذا يعني أن الحاجز الصوتي لا يعتبر عائقاً للحركة. أحياناً يعتقد خطأ أن الصدمة الصوتية تنشأ فقط في لحظة عبور الطائرة للحاجز الصوتي. في الحقيقة إن موجة الصدم تصاحب الطائرة في كل وقت طيرانها بسرعة فوق صوتية. إن كل شخص من المراقبين الواقفين على الأرض سيشعرون صدمة عالية كلما اقتربت موجة الصدم منه. أنظر الشكل (1-3-11).

تشكل موجة الصدم مخروطاً رأسه في الطائرة. وزاوية رأسه  $\theta$ . الشكل (1-3-9د) تعطى بالعلاقة:

$$\sin\theta = v_{\text{صوت}}$$

حيث:  $v_{\text{جسم}}$  سرعة الجسم (الطائرة), أما  $v_{\text{صوت}}$  سرعة الصوت في الوسط.

## مسائل

- (1) ما هو الشاهد على أن الصوت شكلاً من أشكال الطاقة؟
- (2) هل يتغير تواتر أو طول موجة الصوت عند عبوره من الهواء إلى الماء؟
- (3) أعطي برهاناً على أن سرعة انتشار الصوت في الهواء بصورة أساسية لا تتعلق بالتواتر؟
- (4) ما هو سبب كون سرعة انتشار الصوت في الهيدروجين أقل من الهواء؟
- (5) تطلق الدلافين أمواجاً فوق صوتية بتواتر  $250000\text{Hz}$ . عين طول موجة هذا الصوت: أ- في الماء, ب- في الهواء. معتبراً أن درجة الحرارة تساوي  $20^\circ\text{C}$ .
- (6) قذف حجر من أعلى صخرة وسمع صوت سقوطه بالماء خلال  $4,0\text{s}$ . ما هو ارتفاع الصخرة التي سقط منها؟ اعتبر أن درجة حرارة الهواء تساوي  $20^\circ\text{C}$ .
- (7) يعطى تغير الضغط في موجة صوتية بالعلاقة:

p = 2

- حيث  $p$  -تقدر بالباسكال, و  $x$  -بالمتر, أما  $t$  -فتقدر بالثواني. عين:
- أ- سرعة الانتشار, ب- سعة إزاحة الموجة. اعتبر أن كثافة الوسط يساوي  $\rho = 2,7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ .
- (8) موجتان صوتيتان لهما نفس سعة الإزاحة, غير أن تواتر إحدى الموجتين أكبر بمرتين من تواتر الأخرى:  
أ- عند أي من هاتين الموجتين تكون السعة الضغطية أكبر؟ وبكم مرة؟  
ب- ما هي نسبة شدتي هاتين الموجتين؟
  - (9) أ- أحسب سوية الشدة الصوتية للصوت الذي شدته  $7,5 \times 10^8 \text{w/m}^2$   
ب- ما هي شدة صوت, سوية الشدة تساوي  $35\text{dB}$ ؟
  - (10) إذا ازدادت سعة الموجة الصوتية بثلاث مرات:  
أ- بكم مرة ستزداد شدتها؟  
ب- بكم ديسبل ستزداد سوية الشدة؟
  - (11) يمتلك وتر كمان تواتراً أساسياً يساوي  $196\text{Hz}$ . إذا كان طول الجزء المهتز من الوتر يساوي  $32\text{cm}$  وكتلته  $0,50\text{g}$ . أحسب قيمة شد هذا الوتر من أجل معايرته؟

12) ما هي القيمة التقريبية لشدة صوت المدروجان الأوليان للكمان بالنسبة لشدة الصوت الذي يعطيه عند التواتر الأساسي؟ بكم ديسبل أضعف يعطي الكمان صوتاً للمدروجان الأول والثاني من المدروج الأساسي؟

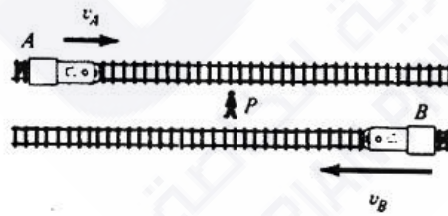
13) يسمع الإنسان صوت نغمة نقية آتية من منبعين. ويعتقد أن تواتر الصوت يقع في المجال 500-1000Hz. وتكون سوية شدة الصوت عظمى في النقاط المتساوية البعد عن كلا المنبعين. ومن أجل التعيين الدقيق لتواتر الصوت ينتقل الرجل ويكتشف أن سوية الشدة صغرى في النقطة الواقعة عن المنبع الأول بـ 0,22m أبعد عن المنبع الثاني. ما هو تواتر الصوت إذا كانت درجة حرارة الهواء  $37^{\circ}\text{C}$ ؟

14) تطلق قاطرة صفارتها لدى اقترابها أو ابتعادها عن تقاطع سكك حديدية. مراقب عند التقاطع يقيس تردداً قدره 219Hz عند اقتراب القاطرة و 184Hz عند ابتعادها. أوجد سرعة القاطرة وتردد صفيرها، علماً بأن سرعة الصوت تساوي 340m/s.

15) كما يوضح الشكل (3-1) يقف مراقب بين خطي متوازيين حيث يقترب قطاران من اتجاهين متعاكسين. سرعة القاطرة الأولى (A):  $v_A = 15\text{m/s}$  وتطلق صفارتها بتردد قدره:  $v_0 = 200\text{Hz}$ . سرعة القاطرة الثانية (B):  $v_B = 15\text{m/s}$  وسرعة الصوت في الهواء 340m/s. أخيراً الجو ساكن ولا توجد أية حركة في الهواء.

أ- أوجد طول الموجة  $\lambda_1$  والتردد  $v_1$  للموجات الصوتية التي يتلقاها المراقب P من القاطرة (A).

ب- ما هو التردد  $v_2$  الذي يطرق مسامع المهندس في القاطرة (B).



الشكل (3-1)

## الباب الثالث

الفصل الأول: الحرارة (الجزء الأول).

الفصل الثاني: الحرارة (الجزء الثاني).

الفصل الثالث: القانون الأول في الترموديناميكس.

الفصل الرابع: القانون الثاني في الترموديناميكس.

# الفصل الأول

## المحرارة

## Temperature

### (الجزء الأول)

3-1-1- درجة الحرارة - التمدد الحراري وقانون الغاز المثالي:

**Temperature, thermal expansion and the law ideal gas:**