الفصل السابع

الموجات الطولية في الغازات

1.7 الموجات الطولية في الغازات

2.7 سرعة الموجة الطولية في الغازات

3.7 تصحيح لابلاس

4.7 العوامل المؤثرة على سرعة الصوت

5.7 القدرة والشدة في الصوت

6.7 مستوى الصوت (مقياس الديسبل)

7.7 علو ، درجة ، نغمة الصوت

8.7 ظاهرة دوبلر

1.7 الموجات الطولية في الغازات

تتميز الموجات الطولية باهتزاز جسيمات الوسط الناقل للموجة بصورة موازية لحركة الموجة، فالصوت ينتقل في الهواء بصورة موجات طولية وتكون على شكل موجات تضاغطية تنتشر في الأبعاد الثلاثة، ولتبسيط التعامل الرياضي ستقتصر دراساتنا على الموجات الطولية في بعد واحد.

ان جميع الموجات الطولية في بعد واحد تسمى موجات تضاغطية وتسلك تماماً نفس سلوك الموجات الصوتية وعليه يمكن وصف جميع هذه الموجات تحت عنوان واحد مشترك وهو موجات الصوت بالرغم من ان ترددها قد لا يقع ضمن المدى المسموع من التردد.

2.7 سرعة الموجة الطولية في الغازات

ان سرعة الموجة الطولية في الغازات تعتمد على طبيعة الوسط الذي تنتشر فيه وتحديداً على معامل المرونة الحجمي(B) وكثافة الوسط في درجة الحرارة والضغط القياسيين (ρ_o) وحسب العلاقة:

سرعة الصوت $v = \sqrt{\dfrac{\mathrm{B}}{\rho_o}}$

في حالة الغاز المثالي تعتمد قيمة معامل المرونة الحجمي (B) على نوع العملية التي ينضغط بها الغاز. اعتبر العالم نيوتن ان عملية انتقال الموجات الطولية (ومن ضمنها موجات الصوت في الهواء) تحدث بثبوت درجة الحرارة (عملية ايزوثرمية)، حيث اعتقد ان كمية الحرارة القليلة المتولدة في مناطق التضاغط تنتقل حال تولدها إلى مناطق التخلخل، حيث يحدث فيها تبريد ضئيل وبذلك تتساوي درجات الحرارة في جميع النقاط في الغاز، ولذلك اعتبر نيوتن ان الغاز الذي يحمل الموجة الصوتية يكون خاضعاً لمعادلة الغاز الايزوثيرمة $(PV = Constant)$، في هذه الحالة يكون:

$$PV = Constant \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

حيث P هو الضغط و V هو حجم الغاز، بتفاضل طرفي المعادلة (1) نحصل على:

$$d(PV) = 0$$

$$PdV + VdP = 0$$

$$P = -\frac{dP}{\frac{dV}{V}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

ان معامل المرونة الحجمي بالصيغة التفاضلية يعرف بالصيغة:

$$\mathrm{B} = -\frac{dP}{\frac{dV}{V}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

بالمقارنة بين المعادلة (2) والمعادلة (3) نستنتج انه في حالة العملية الآيزوثرمية فان معامل المرونة الحجمي للغاز يساوي ضغط الغاز $(\mathrm{B} = P)$، ومنه توصل نيوتن إلى العلاقة النهائية لسرعة الصوت بالصيغة:

$$v = \sqrt{\frac{P}{\rho_o}}$$

حيث (P) هو الضغط، (ρ_o) هو كثافة الهواء في الظروف القياسية.

بالاعتماد على علاقة نيوتن لسرعة الصوت يمكننا حساب سرعة الصوت في الهواء الجوي تحت الشروط القياسية (درجة حرارة صفر مئوي وضغط جوي واحد) فمن المعلوم ان كثافة الهواء في الظروف القياسية هي $(\rho_o = 1.293\, kg/m^3)$ كما ان الضغط الجوي في الظروف القياسية يعطى بدلالة ضغط عمود زئبق حسب العلاقة $(P = \rho g h)$ حيث (ρ) كثافة الزئبق، (g) التعجيل الأرضي، (h) ارتفاع عمود الزئبق عند مستوى سطح البحر، وبالتعويض عن القيم نجد:

$$P = \rho g h = 13.6 \times 10^3 \times 9.81 \times 0.76\ N/m^2$$

بالتعويض في علاقة نيوتن لسرعة الصوت نحصل على:

$$v = \sqrt{\frac{13.6 \times 10^3 \times 9.81 \times 0.76}{1.293}} = 280 \frac{m}{sec}$$

وهذه القيمة لسرعة الصوت هي اقل من القيمة الحقيقية لسرعة الصوت في الهواء في الظروف القياسية حيث ان القيمة التجريبية الصحيحة هي $(v = 331.36 \pm 0.08\, m/s)$ ونسبة الخطأ بين القيمتين هي (16%) وهي قيمة كبيرة.

3.7 تصحيح لابلاس

توصل العالم لابلاس إلى ان الموجات الصوتية تنتقل خلال الهواء بعملية اديباتيكية (كظيمة) وليس عملية ايزوثرمية على اعتبار ان التضاغطات الناتجة عن مرور الموجة الصوتية خلال حجم صغير من الغاز تحدث بصورة فجائية سريعة جداً بحيث لا تكون هناك فرصة لحدوث أي تبادل حراري $(\Delta Q = 0)$، لذلك اعتبر لابلاس ان الهواء الذي ينقل الموجات الصوتية يخضع لمعادلة الغاز الاديباتيكية التي يعبر عنها بالصيغة:

$$PV^{\gamma} = Constant$$

حيث γ كمية ثابته معرفة بالعلاقة $\left(\gamma = \frac{C_p}{C_V}\right)$ ، C_p هي السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط، C_V هي السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم.

بنفس الطريقة السابقة يمكننا إيجاد سرعة الصوت على افتراض ان عملية انتقال الصوت في الغاز تتم ضمن الظروف الاديباتيكية، وكما يلي:

باشتقاق طرفي المعادلة الأخيرة نحصل على:

$$d(PV^{\gamma}) = 0$$

$$\gamma PV^{\gamma-1}dV + V^{\gamma}dP = 0$$

$$\gamma P = -\frac{V^{\gamma}dP}{V^{\gamma-1}dV} = -\frac{dP}{\frac{V^{\gamma-1}dV}{V^{\gamma}}}$$

$$\gamma P = -\frac{dP}{\frac{dV}{V}}$$

بالمقارنة بين العلاقة الأخيرة وتعريف معامل المرونة الحجمي نجد ان $(B = \gamma P)$ و عليه توصل لابلاس على علاقة جديدة لسرعة الصوت معرفة بالصيغة:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho_o}}$$

في حالة الهواء من المعلوم ان $(\gamma = 1.41)$ وبالتعويض عن قيم الضغط الجوي والكثافة في الظروف القياسية نحصل على:

$$v = \sqrt{\frac{1.41 \times 13.6 \times 10^3 \times 9.81 \times 0.76}{1.293}} = 331.34 \frac{m}{sec}$$

يلاحظ ان النتيجة التي حصلنا عليها لسرعة الصوت من علاقة لابلاس متفقة مع القيمة التجريبية الدقيقة، وهذا يدل على ان عملية انتقال الصوت في الغازات تتم من خلال عملية اديباتيكية وليست عملية آيزوثرمية. الجدول التالي يوضح مقارنة لسرعة الصوت في أوساط مختلفة (غازية، سائلة، صلبة).

Speed of Sound in Various Media **سرعة الصوت في اوساط مختلفة**

Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)
Gases غازات		**Liquids at 25°C سوائل**		**Solids[a] صلبة**	
Hydrogen (0°C)	1286	Glycerol	1904	Pyrex glass	5640
Helium (0°C)	972	Seawater	1533	Iron	5950
Air (20°C)	343	Water	1493	Aluminum	6420
Air (0°C)	331	Mercury	1450	Brass	4700
Oxygen (0°C)	317	Kerosene	1324	Copper	5010
		Methyl alcohol	1143	Gold	3240
		Carbon tetrachloride	926	Lucite	2680
				Lead	1960
				Rubber	1600

4.7 العوامل المؤثرة على سرعة الصوت

هناك عدة عوامل تأثر على سرعة انتقال الموجة الصوتية في الهواء ومن أهمها:

1.4.7 تأثير درجة الحرارة على سرعة الصوت:

ان سرعة الصوت في أي غاز تتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لدرجة حرارة ذلك الغاز، في حالة الهواء، فان العلاقة الدقيقة لسرعة الصوت عند أي درجة حرارة مئوية (T) تعطى بالصيغة:

$$v_T = 331\sqrt{1+\frac{T}{273}} \quad (m/sec)$$

فمثلاً سرعة الصوت في الهواء عند درجة حرارة (20^oC) يمكن حسابها كالتالي:

$$v_{20} = 331\sqrt{1+\frac{20}{273}}$$

$$v_{20} \approx 343\ m/sec$$

وبنفس الطريقة يمكننا إيجاد سرعة الصوت في أية درجة حرارية (T)، علماً بان هناك علاقة تقريبية لسرعة الصوت في الهواء معرفة بالصيغة $(v_T = 331 + 0.61T)$ وهي علاقة تقريبية مشتقة من العلاقة السابقة وتصح لقيم درجة الحرارة القريبة من درجة حرارة الغرفة.

2.4.7 تأثير الضغط على سرعة الصوت:

لا تتغير سرعة الموجة الصوتية اذا تغير ضغط الهواء لان ضغط أي كتلة معينة من الهواء يولد تغيراً طفيفاً في حجم الهواء، أي ان سرعة الصوت في الهواء أو أي غاز لا تعتمد على تغيرات الضغط بشرط بقاء درجة الحرارة ثابتة.

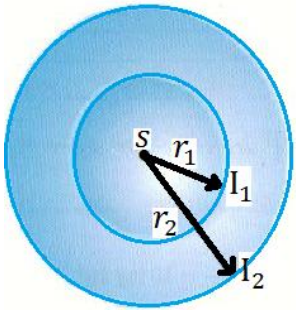
3.4.7 تأثير الرطوبة على سرعة الصوت:

ان كثافة بخار الماء تحت الظروف القياسية هي $(0.0008\ g/cm^3)$ بينما كثافة الهواء الجاف تحت نفس الظروف هي$(0.001293\ g/cm^3)$ وهذا يعني ان كثافة البخار اقل من كثافة الهواء الجاف، ، ولما كانت سرعة الصوت تزداد كلما قلت كثافة الوسط فان سرعة الصوت في الهواء تزداد مع زيادة الرطوبة.

5.7 القدرة والشدة في الصوت

شدة الموجة الصوتية هي القدرة المارة عبر وحدة مساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة الصوتية، وحدة شدة الصوت في النظام العالمي للوحدات هي $(Watt/m^2)$ ، وتعطى بالعلاقة:

$$I = \frac{Power}{Area}$$



نفرض ان لدينا مصدر صوت نقطي يبعث قدرة صوتية (P)، شدة الصوت في أية نقطة تبعد مسافة r_1 هي I_1 وعند مسافة r_2 هي I_2 كما موضح بالشكل المجاور، بالاعتماد على علاقة الشدة يمكن التعبير عن I_1 و I_2 بالصيغة:

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2} \quad , \quad I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$$

ومنه يمكننا التعبير عن النسبة بين الشدتين بالصيغة:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\left(\frac{P}{4\pi r_2^2}\right)}{\left(\frac{P}{4\pi r_1^2}\right)} \quad \rightarrow \quad \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

من العلاقة الأخيرة نجد ان شدة الصوت تتناسب عكسياً مع مربع المسافة (قانون التربيع العكسي).

6.7 مستوى الصوت (مقياس الديسبل) Sound Level (Decibel)

ان مدى شدة الصوت الذي تستطيع الأذن البشرية ان تسمعه واسع جداً حيث يبدأ من اقل شدة يمكن الإحساس بها وهي $(I_0 = 10^{-12}\, W/m^2)$ الى اكبر شدة يمكن سماعها دون ان تتأذى الاذن وهي بحدود $(I \approx 1\, W/m^2)$، وقد وجد ان استجابة الأذن البشرية تتناسب بشكل لوغارتمي وليس خطي مع شدة الصوت، لذا يستعمل مقياس لوغارتمي يسمى مستوى الصوت (*Sound Level*) ويرمز له بالرمز (β) ويعرف بالصيغة:

$$\beta = 10\, log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

حيث (I) هي شدة الصوت المقاس بوحدات (W/m^2) و (I_0) الحد الادنى لشدة الصوت المسموع $(10^{-12}\, W/m^2)$، وحدة قياس مستوى الصوت هي الديسبل (***Decibel***) ويرمز لها بالرمز (**dB**).

مثال1: أوجد مستوى الصوت المكافئ لصوت شدته $(I = 10^{-5}\, W/m^2)$.

الحل : $I_0 = 10^{-12}\, W/m^2$, $\beta = 10\, log\left(\frac{I}{I_0}\right)$

$$\beta = 10\, log\left(\frac{10^{-5}}{10^{-12}}\right)$$

$$\beta = 10\, log(10^{-5} \times 10^{12})$$

$$\beta = 10\, log(10^{7})$$

$$\beta = 70\ \text{dB}$$

مثال2: أوجد مستوى الصوت بالديسبل لموجة صوتية شدتها $(I = 2 \times 10^{-7}\, W/m^2)$.

الحل : $I_0 = 10^{-12}\, W/m^2$, $\beta = 10\, log\left(\frac{I}{I_0}\right)$

$$\beta = 10\, log\left(\frac{2 \times 10^{-7}}{10^{-12}}\right) = 10\, log(2 \times 10^{-7} \times 10^{12})$$

$$\beta = 53\ \text{dB}$$

الجدول التالي يوضح أمثلة لقيم شدة ومستوى شدة الصوت.

نوع الصوت	الشدة (W/m^2)	مستوى الشدة (dB)
الصوت المسبب للألم	1	120
ثقابة الصخور التى تعمل بالهواء المضغوط	10^{-2}	100
طريق كثيف المرور*	10^{-5}	70
التخاطب العادى*	10^{-6}	60
الهمس متوسط الارتفاع*	10^{-10}	20
حفيف الشجر*	10^{-11}	10
الصوت المسموع بالكاد	10^{-12}	0

7.7 علو ، درجة ، نغمة الصوت

ان استجابة الأذن البشرية السليمة للصوت تختلف باختلاف تردد الصوت وشدته، ومن العوامل التي تستعمل للتمييز بين الأصوات المختلفة هي العلو ، الدرجة، النغمة ، فيما يلي عرض مختصر لهذه العوامل:

علو الصوت:

يرتبط علو الصوت بشدة الصوت، ان شدة الصوت هي كمية فيزيائية يمكن قياسها بدقة، إلا ان علو الصوت يتوقف على تأثير شدة الصوت على الأذن البشرية (أي حكم السامع) **وعليه يعرف علو الصوت بانه الإحساس الذي يتوقف على شدة الصوت المسموع.**

درجة الصوت:

تعرف درجة الصوت بانها ذلك الإحساس الذاتي الذي يتوقف على تردد الصوت المسموع. أي انها حدة نغمة الصوت كما تشعره الأذن البشرية. ان درجة الصوت لا تعتمد على علو الصوت فأصوات النساء والأطفال درجتها عالية لان ترددتها مرتفعة بينما صوت الرجل درجته واطئة لان تردده منخفض.

نغمة الصوت:

اذا كان الصوت المسموع ذا تردد منفرد (نغمة نقية) فعندئذ يمكن تمييزه تماماً بمعرفة علوه ودرجته، اما اذا كان الصوت معقداً (أي مركب من خليط من الترددات) فعندئذ لتمييزه نحتاج إلى معرفة: علوه ، درجته ونغمته. **تعرف نغمة الصوت بانها التي تمكننا من التمييز بين صوتين لهما نفس العلو والدرجة ولكنهما صادرين من مصدرين مختلفين.** وهذا يعزى إلى الاختلاف في عدد وترتيب وشدة التوافقيات التي يتألف منها كل صوت.

ولو فرضنا ان شخصا يناديك، فأنك ستدرك حال سماعه من خلال علو ودرجة صوته ان كان صوت رجل أو طفل أو امرأة، اما نغمة الصوت فستساعدك على التعرف على الشخص المنادي وتمييزه.

8.7 ظاهرة دوبلر (The Doppler phenomena)

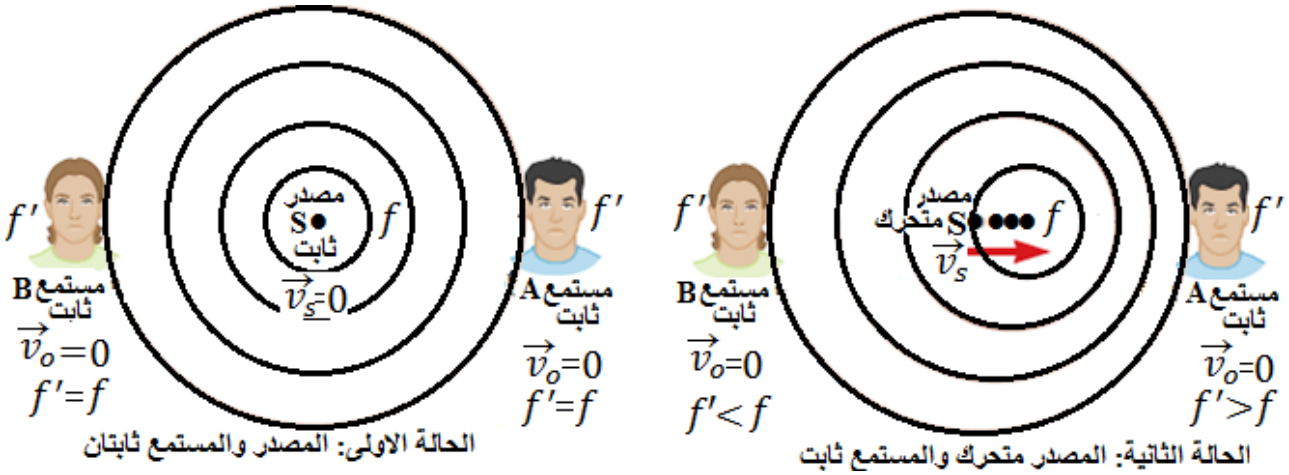
هي ظاهرة عامة لجميع انواع الموجات وسميت بهذا الاسم نسبة الى مكتشفها الفيزيائي النمساوي جوهان دوبلر (Johann Doppler)، في حالة الموجات الصوتية **تعرف ظاهرة دوبلر بانها اختلاف قيمة التردد الذي يسجله مستمع عن القيمة الحقيقية لتردد المصدر الصوتي عندما تكون هناك حركة نسبية بين المصدر الصوتي والمستمع.** من الامثلة العملية على ظاهرة دوبلر هو اختلاف تردد (درجة) الصوت لصافرة سيارة الاسعاف الذي تسمعه عند اقتراب سيارة الاسعاف منك بسرعة ومن ثم تتخطاك، فعند اقتراب سيارة

الاسعاف يحس السامع ان الصوت يصبح اكثر نعومة (اعلى تردد) بينما يحس ان صوت الصافرة تصبح اقل نعومة (اقل تردد) عند ابتعاد سيارة الاسعاف، من ذلك نستنتج ان درجة الصوت تتغير عندما تكون هناك حركة نسبية بين مصدر الصوت والمستمع.

تحدث ظاهرة دوبلر عند حدوث حركة نسبية واحدة او اكثر بين كل من:

1- حركة المصدر الصوتي بالنسبة للمستمع.
2- حركة المستمع بالنسبة للمصدر الصوتي.
3- حركة الوسط الناقل بين المصدر الصوتي والمستمع.

الشكل التالي يوضح تأثير حركة المصدر الصوتي على التردد الذي يسجله مستمع ما، في الحالة الأولى المصدر الصوتي (S) ثابت وكذلك المستمعان (A) و (B) ، في هذه الحالة لا يحدث أي تغيير في تردد الصوت الذي يسجله المستمعين (A) و (B) أي ان ($f'=f$)، في الحالة الثانية فان المصدر الصوتي يتحرك بسرعة (v_s) باتجاه المستمع (A) ومبتعداً عن المستمع (B). في هذه الحالة فان جبهات الموجة الصوتية تتقارب من جهة المستمع (A) وتتباعد من جهة المستمع (B)، وكما هو موضح بالشكل، وبالنتيجة في تردد الصوت الذي يسمعه المستمع (A) سيكون اكبر من التردد الحقيقي للمصدر الصوتي، وبالمقابل فان التردد الذي يسمعه المستمع (B) سيكون اقل من التردد الحقيقي للمصدر الصوتي.



ان التردد الذي يسجله المستمع الثابت ($v_o = 0$) في حالة المصدر الصوتي المتحرك بسرعة اقل من سرعة الصوت في الوسط يعطى بالعلاقة:

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

حيث تمثل f' التردد الظاهري الذي يسجله المستمع، f التردد الحقيقي للمصدر، v سرعة الصوت في الوسط ، v_s سرعة المصدر الصوتي بالنسبة للمستمع.

ان إشارة سرعة المصدر قد تكون موجبة أو سالبة، ففي حالة كون اتجاه حركة المصدر باتجاه السامع فان التردد الظاهري يكون اقل من التردد الحقيقي وبالنتيجة تكون إشارة v_s سالبة، اما اذا كان اتجاه حركة المصدر مبتعدة عن السامع فان التردد الظاهري يكون اقل من التردد الحقيقي وبالنتيجة تكون إشارة v_s موجبة.

اما في حالة كون المصدر الصوتي ثابت $(v_s = 0)$، و السامع يتحرك بسرعة (v_o) بالنسبة للمصدر الصوتي، فان التردد الظاهري الذي يسمعه المستمع يعطى بالعلاقة:

$$f' = f\frac{v \pm v_o}{v} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.\ (2)$$

تكون إشارة سرعة المستمع موجبة في حالة كون حركة المستمع باتجاه المصدر (زيادة في التردد المسجل)، وتكون إشارة سرعة المستمع سالبة في حالة كون حركة المستمع باتجاه مبتعد عن المصدر الصوتي (نقصان في التردد المسجل).

في حالة كون كل من المصدر والسامع في حالة حركة فان التردد الظاهري الذي يسجله المستمع يعطى بالعلاقة:

$$f' = f\left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_s}\right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..\ (3)$$

تستعمل نفس قاعدة الإشارات التي ذكرت في العلاقتين (1) و (2).

مثال (1): تتحرك سيارة إسعاف شرقاً على طريق سريع بسرعة $(33.5\,m/s)$، تطلق صافرتها بتردد (400Hz). ما تردد الصافرة الذي يسمعه شخص في سيارة تتحرك غرباً بسرعة $(24.6\,m/s)$ في الحالتين، علماً بان سرعة الصوت في الوسط هي $(343\,m/s)$:

1- عندما تقترب السيارة من سيارة الإسعاف.
2- عندما تبتعد السيارة عن سيارة الإسعاف.

الحل:

بما ان كل مصدر الصوت (سيارة الإسعاف) والسامع (السيارة) في حالة حركة، فان التردد الظاهري الذي يسجله الشخص تعطى بالعلاقة:

$$f' = f\left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_s}\right)$$

اما قيم وإشارة السرع فتعتمد على اتجاه حركة كل منها.

1- في حالة اقتراب السيارة من سيارة الإسعاف فان التردد الظاهري يكون اكبر من التردد الحقيقي، لذا فان إشارة سرعة المستمع تكون موجبة وسرعة المصدر سالبة، وبالتعويض عن القيم نحصل على:

$$f' = 400\left(\frac{343 + 24.6}{343 - 33.5}\right)$$

$$f' = 475\ Hz$$

2- في حالة ابتعاد السيارة من سيارة الإسعاف فان التردد الظاهري يكون اقل من التردد الحقيقي، لذا فان إشارة سرعة المستمع تكون سالبة وسرعة المصدر موجبة، وبالتعويض عن القيم نحصل على:

$$f' = 400\left(\frac{343 - 24.6}{343 + 33.5}\right)$$

$$f' = 338.3\ Hz$$

يلاحظ ان التغير في التردد الذي يسجله السامع هو $(475 - 338.3 = 136.7Hz)$

مثال(2): تتحرك سيارة إسعاف شرقاً على طريق سريع بسرعة $(33.5\,m/s)$، تطلق صافرتها بتردد (400Hz). ما تردد الصافرة الذي يسمعه شخص واقف على حافة الطريق الحالتين:

1- عندما تقترب سيارة الإسعاف من الشخص. 2- عندما تبتعد سيارة الإسعاف من الشخص.

علماً بان سرعة الصوت في الوسط هي $(343\,m/s)$.

الحل: في حالة السامع الثابت يعطى التردد الظاهري الذي يسمعه بالعلاقة:

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s}$$

1-عندما تقترب سيارة الإسعاف من الشخص: في هذه الحالة يزداد التردد الظاهري، وبالنتيجة تكون إشارة سرعة سيارة الإسعاف سالبة، وبالتعويض عن القيم نحصل على:

$$f' = 400\left(\frac{343}{343 - 33.5}\right)$$

$$f' = 443.3Hz$$

2- عندما تبتعد سيارة الإسعاف من الشخص: في هذه الحالة يقل التردد الظاهري، وبالنتيجة تكون إشارة سرعة سيارة الإسعاف موجبة، وبالتعويض عن القيم نحصل على:

$$f' = 400\left(\frac{343}{343 + 33.5}\right)$$

$$f' = 364.4Hz$$