مثال :

موجتين صوتيتين لهما نفس التردد وشدتهما 10^{-16} ، 10^{-12} واط / سم^2 ، فما هو الفرق بين منسوبي شدتيهما ؟

الحل :

استجابة الأذن البشرية للصوت

مما سبق ذكره إن الأذن البشرية العادية تسمع الأصوات التي لها ترددات ضمن المدى 20)Hz ⟵ 20000) هيرتز وهذا يعادل موجات تضاغطية ذات ضغط صوتي يتراوح بين $20x10^{-6})N/m^2$ ⟵ 20) نيوتن /م^2 (باسكال) . إن الأذن البشرية جهاز حساس جداً للصوت يفوق أدق الأجهزة المصنوعة لهذا الغرض ، وإن استجابتها للصوت معقدة وتختلف باختلاف تردد الصوت وشدته مما يمكنها في تمييز الأصوات المختلفة ومن أهم الخصائص التي تعتمدها الأذن البشرية لتمييز الأصوات المختلفة هي:

1) علو الصوت 2) درجة الصوت 3) نوعية الصوت

1) علو الصوت Loudness (L)

هو ذلك الإحساس الذي يتوقف على شدة الصوت المسموع . أي إن علو الصوت يزداد مع ازدياد شدته وإن الأذن البشرية لا تستجيب بنفس الحساسية للأصوات ذات الترددات المختلفة وأنها لا تستطيع سماع الصوت ذو التردد العالي بنفس العلو الذي تسمع به صوتاً تردده أقل وشدته مساوية لشدة الصوت الأول .

إن استجابة الأذن البشرية للأصوات التي لها نفس التردد ولكنها تختلف بالشدة تكون أستجابة لوغارتيمية وليس خطية (الإحساس لعلو الصوت يتناسب طردياً مع لوغارتم الشدة I عند ثبوت التردد)

$$L \alpha \log(I) \longrightarrow L = k \log(I)$$

$$dL/dI = K/I$$

K : ثابت التناسب (مقدار ثابت)

dL/dI: حساسية الأذن ، وأنها تتناسب عكسياً مع شدة الصوت I . أي إن الأذن تتحسس التغيرات في شدة الصوت أفضل كلما قلت شدة الصوت المسموع .

إن العلو هو أحساس سمعي يتوقف على حكم السامع أي أنه ظاهرة فسلجية وليست فيزيائية لذلك يتعذر قياسه بدقه بأي جهاز . ويعتمد علو الصوت على شدة الصوت وعلى حساسية الأذن ، في حين تعتمد شدة الصوت على عدة عوامل أهمها :

أ) سعة الاهتزاز للمصدر ($I \alpha A^2$) A: سعة الاهتزاز

ب)المساحة السطحية للسطح المهتز ($I \alpha S$) S: المساحة السطحية

جـ)المسافة بين المصدر والأذن ($I \alpha 1/r^2$) r: بعد الأذن عن المصدر

2) درجة الصوت Pitch (sound level)

هو ذلك الإحساس الذاتي الذي يتوقف على تردد الصوت المسموع ، وتتوقف عليه حدة الصوت أو غلظة ، حيث إن الصوت الحاد يكون ذو تردد عالي (كأصوات النساء والأطفال) بينما الصوت الغليظ يكون ذو تردد منخفض (كصوت الرجل الكبير) .عندما يكون الصوت المسموع ذو تردد منفرد (نغمة نقية) فأن الأذن البشرية يمكن أن تميزه من معرفة علوه ودرجته فقط ، أما إذا كان الصوت المسموع معقداً أو مركباً (أي متعدد الترددات) فلا يمكن تمييزه من معرفه علوه ودرجته فقط بل يجب معرفة نوعيته .

3) نوعية الصوت (Sound quality)

إن نغمة الصوت لا تكون عادةً صوتاً خالصاً (أي لا تكون بتردد منفرد فقط أي أنها ليست نغمة نقية) بل تتركب من الصوت الأساس مصطحبة معها عدداً من التوافقيات المختلفة الأخرى (أي ترددات مصاحبة متعددة أخرى) وإن محصلة هذا الخليط من الترددات هي التي تحدد نوع الصوت . لذا يمكن التمييز بين صوتين يحدثان بنفس الوقت من مصدرين لهما نفس العلو (أي لهما نفس الشدة) ونفس الدرجة (أي نفس التردد)

وذلك لكونهما صادران من مصدرين مختلفين مما يؤدي إلى اختلاف نوع الصوت وذلك لاختلاف الترددات المصاحبة للصوت الأساسي . فمثلاً عندما ينادينا شخص يمكن إن نعرف أنه رجل أو أمرآة أو طفل من علو الصوت ودرجته ، كما يمكن معرفة الشخص المنادي وتمييزه من معرفة وإدراك نوعية الصوت (المخزونة بالذاكرة).

العوامل الجوية المؤثرة على سرعة الموجات الصوتية في الهواء

1) تأثير تغير الضغط على سرعة الصوت :

نفرض إن كتلة معينة من الهواء بدرجة حرارة ثابتة فأنه (وحسب قانون بويل للغازات):

($PV=c$) حيث إن : P ضغط الهواء ، V : الحجم ، C : مقدار ثابت

but $\rho = m/V \longrightarrow V=m/\rho$

ρ :كثافة الهواء ، m: كتلة الهواء (وهي مقدار ثابت أيضاً)

$$P(m/\rho) = c \longrightarrow (P/\rho)= (c/m) \longrightarrow (P/\rho)=C$$

$C=(c/m)$: مقدار ثابت أيضاً

وبذلك فأن أي تغيير في ضغط الهواء يصاحبه تغير في كثافة الهواء بحيث إن النسبة تبقى دائماً مقدار ثابت

ولكن لدينا سرعة الصوت U تساوي :

$$U = \sqrt{\gamma RT/\rho} \qquad U = \sqrt{\gamma P/\rho}$$

حيث إن : (γ = $\frac{\text{الحرارة النوعية (السعة الحرارية) للغازات بثبوت الضغط}}{\text{الحرارة النوعية (السعة الحرارية) للغازات بثبوت الحجم}}$ = مقدار ثابت

* أي ان سرعة الصوت في الهواء أو أي غاز آخر لا تتأثر بتغيرات الضغط لأن أي تغير بالضغط يصاحبه تغير بكثافة الهواء (أو الغاز) بنفس النسبة بشرط ثبوت درجة الحرارة.

2) تأثير تغير درجة الحرارة على سرعة الصوت

سرعة الصوت تساوي :

$$U = \sqrt{\gamma P/\rho} \text{ -------- (1)}$$

عندما يكون الغاز مثالي فأن المعادلة العامة للغازات هي :

$PV=(m/M)RT$

M: الوزن الجزئي للغازات (مقدار ثابت)

R: الثابت العام للغازات (مقدار ثابت)

T: درجة الحرارة المطلقة

$$P(V/m)=RT/M \quad ; \quad But \quad \rho = m/V$$

$$P/\rho = RT/M \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

من المعادلتين (1) و (2)

$$U = \sqrt{\gamma RT/M}$$

$$U = K\sqrt{T} \longrightarrow U\alpha\sqrt{T} \qquad K = \sqrt{\gamma R/M}$$

K: مقدار ثابت لأن كل γ و R و M من مقدار ثابت .

* أي إن سرعة الصوت تتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لدرجة حرارة الهواء (الغاز) المطلقة .

نفرض أن سرعة الصوت عند درجة الصفر سيليزية (مئوية) U_o

سرعة الصوت عند درجة حرارة t درجة سيليزية (مئوية) U_t

$$U_o = K\sqrt{273} \quad \text{----------} \quad (3)$$

$$U_t = K\sqrt{273+t} \quad \text{----------} \quad (4)$$

بقسمة المعادلة (4) على المعادلة (3) نحصل على:

$$(U_t/U_o) = \sqrt{(273+t)/273} = \sqrt{1+(t/273)}$$

$$U_t = U_o(1+t/273))^{½}$$

باستخدام نظرية ذي الحدين نحصل على :

$$U_t = U_o[1+((½)(t/273))] = U_o + (U_o t/546)$$

عند درجة صفر درجة ~~مطلقة~~ (مئوية) قيمة U_o تساوي :

$$U_o = 332 \text{ m/s} \quad ; \quad U_o = 1088 \text{ ft/s}$$

أي إن :

$$U_t = 332 + 0.61\,t \quad (\text{بوحدات m/s}) \quad ;$$

$$U_t = 1088 + 2\,t \quad (\text{بوحدات ft/s})$$

* أي إن سرعة الصوت تزداد بمقدار m/s (0.61) م/ثا أو بمقدار ft/sec (2) قدم\ثانية لكل درجة مئوية (سيليزية) واحدة

مثـال :

سفينة تطلق صفارة فيرتد صدى الصوت بعد **6 s** ثانية . كم هو بُعد الحاجز الذي ينعكس عنه صوت الصفارة إذا كانت درجة الحرارة **15 °C** .

الحـل :

الزمن 6 sec هو الزمن الذي يستغرقه الصوت لكي يصل من السفينة إلى الحاجز ثم يعود إلى السفينة . أي إن الزمن الذي يستغرقه الصوت لكي يصل من السفينة إلى الحاجز هو نصف الزمن الكلي (أي إن t=6/2 =3 sec.)

نجد سرعة الصوت في الهواء عند درجة حرارة 15 °C وهي :

$$U= 332+ 0.61\ t = 332 + 0.61 \times 15 = 341.15\ m/s$$

بما ان : المسافة = السرعة x الزمن

$$S = U \times t = 341.15 \times 3 = 1023.45\ m$$

3) تأثير تغير الرطوبة على سرعة الصوت

$$\rho_{H_2O} = 8 \times 10^{-4}\ g/cm^3$$

$$\rho_{air} = 12.9 \times 10^{-4}\ g/cm^3$$

نلاحظ إن كثافة بخار الماء أقل من كثافة الهواء الجاف وإن سرعة الصوت تتناسب عكسياً مع الجذر التربيعي للكثافة كما هو واضح بالمعادلة (1)

$$U = \gamma P/\rho \quad \text{--------} \ (1)$$

واضح إن الهواء تقل كثافته عند ازدياد رطوبته (أي إن التناسب عكسي بين كثافة الهواء والرطوبة) ، وبذلك فأن سرعة الصوت في الهواء تزداد بزيادة الرطوبة (أي إن التناسب طردي بين سرعة الصوت ورطوبة الهواء) على اعتبار γ ثابت .

4) تأثير الرياح على سرعة الصوت

عندما تهب رياح بسرعة W باتجاه يصنع زاوية Θ مع اتجاه تقدم الصوت من مصدره ، فأن محصلة سرعة الصوت تكون مساوية إلى $(U+W\cos\Theta)$ وعليه فأنه عندما يكون اتجاه الرياح باتجاه تقدم الصوت $(\Theta=0)$ فأن محصلة سرعة الصوت تساوي $(U+W)$ وعندما يكون اتجاه الرياح بعكس اتجاه تقدم الصوت $(\Theta=\pi)$ فأن محصلة سرعة الصوت تساوي $(U-W)$. وبذلك يمكن إن نجمل الحالات التالية :

اتجاه الرياح نسبة لاتجاه تقدم الصوت	محصلة سرعة الصوت	الزاوية بين اتجاه الرياح واتجاه تقدم الصوت Θ
بنفس الاتجاه	U+W	Θ=0
بعكس الاتجاه	U-W	Θ= π
زاوية عمودية	U	Θ= ½ π ; $^{3}/_{2}$ π

واضح من الحالة الأخيرة أنه لا يوجد تأثير على محصلة سرعة الصوت من قبل الرياح عندما يكون اتجاه الرياح عمودي على اتجاه تقدم الصوت Θ= ½ π ; $^{3}/_{2}$ π

الخواص الموجية للصوت :

يمتاز الصوت بالخواص الموجية التالية :

1) انكسار الصوت : Refraction

عند انتقال الموجات الصوتية من وسط معين إلى آخر يختلف عنه بالكثافة فأنها سوف تنكسر بنفس أسلوب وطريقة انكسار الضوء ، وذلك بسبب اختلاف سرعة الصوت في الوسطين المختلفين . هذا وإن الموجه الصوتية عندما تتقدم في وسط معين وتقابل وسط آخر فأن جزءاً من الطاقة ينكسر إلى الوسط الثاني وجزءاً آخر ينعكس إلى الوسط الأول وما تبقى يمتصه الوسط ويحوله من طاقة صوتية إلى طاقة حرارية . إن مقدار الجزء المنكسر يعتمد على عاملين هما الكثافة النسبية للوسطين وزاوية السقوط .

2) انعكاس الصوت : Reflection

عند تقدم الموجات الصوتية في وسط معين وسقوطها على وسط آخر أكثر كثافة فأنها سوف تغير اتجاهها وتنعكس إلى الوسط الأول وتعاني تغير بالطور . إن الموجات الصوتية عند انعكاسها تتبع نفس قوانين الانعكاس للضوء حيث إن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس وإن الموجة الصوتية الساقطة والمنعكسة والعمود المقام تقع في نفس المستوى ، كما إن شدة الموجة المنعكسة تعتمد على شدة الموجة الساقطة وعلى زاوية السقوط وطبيعة السطح العاكس ، إن احسن مثال على انعكاس الصوت هو ظاهرة الصدى.