## ١- الاهتزازات الطبيعية للأغشية الدائرية الشكل

إذا كان الغشـــاء دائري الشـــكل ومثبت من حدوده بإحكام كما هو الحال في معظم الحالات العملية كأغشـــية الميكرفون ومكبرات الصـــوت وبعض الآلات الموســـيقية كالطبل وغيرها فإننا نســـتخدم الإحداثيات القطبية ، وباستخدام معادلات التحويل من الشكل (3-11) نحصل على :

$$x = rcos\theta \qquad , \quad y = rsin\theta$$

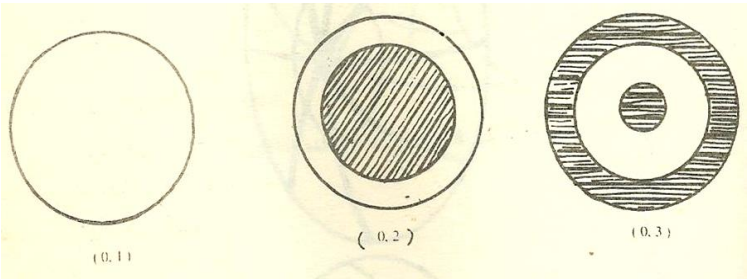
وتصبح معدلة الموجة كالآتي :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

فإذا سلطنا قوة دورية توافقية على مركز الغشاء فان موجات دائرية تتولد وتتقدم من المركز على سطح الغشاء حتى تصل الحدود الدائرية وتنعكس ومن تداخل الموجات الساقطة والمنعكسة يتولد نمط من الاهتزاز في الغشاء ونتيجة للتناظر الدائري حول المركز الهندسي للغشاء فان $\frac{\partial z}{\partial \theta} = 0$ وبذلك تصبح المعادلة كالاتي :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

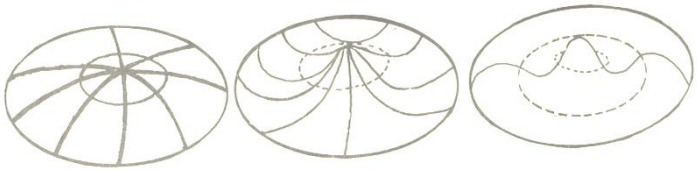
إن أشكال بعض أنماط الاهتزاز المتناظرة حول مركز الغشاء مبينة في الشكل أدناه




الشكل (3-11) يبين أنماط الاهتزاز المتناظرة حول مركز الغشاء المرن والمتوتر

وطبيعي هناك أنماط كثيرة من الاهتزاز بعضها متناظر إذا كانت الضربات مسلطة على مركز الغشاء وبعضها غير متناظر إذا كانت الضربات المسلطة بعيدة عن المركز، وتختلف أنماط الاهتزاز في درجة تعقيدات أشكالها تبع اختلاف الشكل الهندسي للغشاء وشروطه الحدودية وطريقة إثارة الاهتزاز .وقد استطاع العالم كلادني (Chladni) أن يبتكر طريقة بسيطة للحصول على أشكال الاهتزازات في الألواح المعدنية يسهل مشاهدتها بالعين المجردة ، وذلك باستخدام لوح معدني بأي شكل كان مثبت على نقطة واحدة أو مسند على ثلاث نقاط أو أكثر ونثر مسحوق خفيف وجاف كالرمل بانتظام على سطح اللوح ويثار الاهتزاز بطريقة ما كإمرار وتر مشدود على حافة اللوح أو النقر الخفيف على نقطة معينة على سطح اللوح ، فيلاحظ إن المسحوق الخفيف يهتز في بعض المواقع بحيث يستقر المسحوق في الخطوط

والنقاط العقدية الساكن بينما المناطق المتحركة تخلو من المسحوق . وبذلك تظهر معالم الاهتزاز على سطح اللوح من خلال ملاحظة تفاصيل توزيع المسحوق على اللوح وبهذه الطريقة تمكن كلادني من الحصول على أشكال كثيرة جدت من أنماط الاهتزاز .



الشكل (12-3) يبين الأنماط الآنية الواطئة للاهتزاز المتناظر حول الغشاء الدائري .إن الخطوط المتقطعة تشير إلى الخطوط العقدية

## الفصل الرابع
## الموجات الطولية (الموجات الصوتية)

إن مصادر الصوت حولنا كثيرة ومتنوعة إلا إن جميع هذه المصادر هي بحقيقتها أجسام مهتزة ونتيجة لاهتزاز أي جسم يحدث تضاغط في الهواء المحيط بها أثناء حركته إلى الأمام ثم يحدث تخلخل في الهواء أثناء رجوعه إلى الخلف وهكذا تنتقل الحركة الاهتزازية من الجسم المهتز إلى الهواء المحيط به مباشرة وهذه الحركة الاهتزازية في الهواء تتقدم على شكل موجات من التضاغط والتخلخل حتى تصل الأذن .

**علم الصـــوت** هو فرع من فروع الفيزياء يختص بالبحث في الظواهر الطبيعية التي إن أثرت على حاسة السمع فإنها تحدث الإحساس الذي ينشأ عن تهيج الأعصاب السمعية. الصوت له معنيان:

**المعنى الفيزياوي:** الطاقة التي تصل إلى الأذن من الخارج وهذه الطاقة يستمر انتشارها حتى في حالة عدم وجود أذن لتميزها.

**أو هي** اهتزاز مادي يشـــكل ســـلســـلة من التتابعات السريعة لتضاغطات وتخلخلات متتالية تنتقل في

الأوساط المادية كالهواء وعند وصولها الأذن تتحسس بها .

**المعنى السايكولوجي** : هو الأساس السمعي الواقع في المنطقة السمعية والتي تشمل الترددات من -20 (20000) Hz التي يقابلها التغير في الضـــغط مقداره $N/m^2$($20-20*10^{-5}$) حيث إن الحد الأدنى لضـــغط الصوت يدعى بحافة السمع وأي ضغط دونه لا يمكن تحسسه ،والحد الأعلى لضغط الصوت يدعى بحافة الألم وأي ضغط أعلى منه يسبب تلفا داخليا للأذن ، لهذا فانه يهتم بتركيب الأذن والجهاز السمعي من الناحية التشريحية ووظيفة كل عضو من أعضاء هذا الجهاز.

**شروط انبعاث الصوت**

١- مصدر (الجسم المهتز)

٢- الوسط المادي الناقل ( يعتبر عامل مهم بين مصدر الصوت ومستقبل الصوت)

**3**- يجب أن يمتلك الوسط مرونة وقصور ذاتي

يمكن حساب طول الموجة الصوتية λ من تردد الموجة f وسرعة الصوت c بواسطة المعادلة:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

وفي العادة تكون اختلافات في الضـــغط أو في الكثافة ســـببا في تغير ســـرعتها. ويتضح هذا عندما نتصـــور مستوي لضغط الصوت يقدر ب ١٣٠ dB ديسيبل .وهذ يبلغ درجة تألم أذن الإنسان، ويمثل به الضغط الجوي العادي: يبلغ الضغط الجوي للهواء الساكن ١٠١٣٢٥ باسكال، في حين أن مستوي ضغط صوت قدره ١٣٠ dB له قيمة فعلية لضغط الصوت p تبلغ ٦٣ باسكال فقط.

**الموجات الطولية** : نوع من أنواع الموجات الميكانيكية تكون فيها إزاحة جســـيمات الهواء التي تتحرك ذهابا وإيابا موازية إلى انتقال الموجة (أي بنفس اتجاه انتشار الموجة).

**تتميز الموجة الطولية بما يلي**

١- تهتز جسيمات الوسط الناقل للموجة بصورة موازية لحركة الموجة.

٢- الموجات الطولية هي موجات تضاغطية ، وينتقل الصوت في الهواء على شكل موجات طولية. وتتقدم هذه الموجات في الهواء الممتد بثلاثة أبعاد.

٣- جميع الموجات الطولية في بعد واحد تسلك تماما سلوك الموجات الصوتية.

**شدة الصوت**

تختلف خواص الصوت من حيث الشدة والتردد والنوع ، حيث إن هناك حدود لحساسية الأذن للصوت من حيث الشدة والتردد ، وتعرف **شدة الصوت** على إنها ( المعدل الزمني لتدفق الطاقة الصوتية خلال وحدة المساحة وهي كمية فيزياوية تدل على وضوح وخفوت الصوت وتقاس بوحدة الديسيبل db). الديسيبل هي وحدة قياس شدة الصوت وتساوي عشر (1/10) من وحدة قياس شدة الصوت الأصلية البيل .

**تعتمد شدة الصوت على عدة عوامل:**

***سعة اهتزاز المصدر** : تتناسب شدة الصوت طرديا مع مربع سعة الاهتزاز.

* **المساحة السطحية للسطح المهتز** : شدة الصوت تتناسب طرديا مع مساحة السطح المهتز.

***المسافة بين المصدر والمستلم:** شدة الصوت تتناسب مع مربع المسافة الفاصلة بين المصدر والمستلم(قانون التربيع العكسي ، حيث كلما قصر طول الجسم زادت شدة الصوت أي كان الصوت أعلى).

**التردد:**عدد الذبذبات في الثانية الواحدة ويحدد حدة الصوت أو غلظه ، فالأذن البشرية تسمع الأصوات التي تقع تردداتها ضمن المدى المحصور Hz (20-20000) .

**أهم الخصائص التي يعتمدها السامع لتميز الأصوات المختلفة هي :**

١- العلو ٢- درجة الصوت ٣- نوعية النغمة

**العلو** : يرتبط العلو بشدة الصوت إلا إن العلو يتوقف على تأثير شدة الصوت على الأذن البشرية . ويعرف العلو بأنه ( الإحســـاس الذي يتوقف على شدة الصوت المسموع) أي مدى تقبل الأذن للصوت ، ومع أن العلو يزداد مع زيادة شـــدة الصـــوت إلا إن الأذن لا تسمع الأصوات بنفس الحساسية وهذا يختلف باختلاف الترددات لتلك الأصوات.ويعتمد العلو على شدة الصوت وعلى حساسية الأذن.

**درجة الصوت** : هي ذلك الإحساس الذاتي الذي يتوقف على تردد الصوت المسموع أي أنها حدة نغمة الصـــوت كما تشـــعره الأذن. فمثلا أصوات النساء والأطفال تكون درجاتها عالية وحادة لان تردداتها مرتفعة بينما صوت الرجل درجته واطئة وخشنة لان تردده منخفض.

**نوعية الصـــوت (النغمة)** : إن نوعية النغمة هي التي تمكننا من التمييز بين صوتين لهما نفس الشدة

والدرجة ولكنهما صـــادران من مصـــدرين مختلفين وهذا يعزى إلى الاختلاف في عدد وترتيب وشدة التوافقيات التي يتألف منها كل صـــوت ، وعلى هذا الأساس يمكن التمييز بين الأصوات المنبعثة من الآلات المختلفة حتى وان كانت جميعها تعزف نغما واحدا وبنفس الشدة .

ولو فرضنا إن شخصا يناديك فانك ستدرك حالة سماعه من خلال علو ودرجة الصوت إن كان رجل أم امرأة أو طفل أما نوعية صوته فتساعدك على التعرف على الشخص المنادي وتميزه .

**سرعة الموجة الصوتية في الغاز**

إن سرعة الموجة الطولية v في المائع لها هي $v = \sqrt{\frac{B}{\rho_\circ}}$ وقد اعتبر العالم نيوتن إن عملية انتقال الموجة في الهواء هي ظاهرة ايزوثرمية أي تحدث في درجة حرارة ثابتة واعتقد أن كمية الحرارة القليلة المتولدة في مناطق التضاغط تنتقل حال تولدها إلى مناطق التخلخل حيث يحدث فيها تبريد ضئيل وتتساوى درجات الحرارة في الغاز . إذن اعتبر نيوتن إن الغاز الذي يحمل الموجة الصوتية خاضعا لمعادلة الغاز الايزوثرمية أي تحت درجة حرارة ثابتة أي إن :

pv = مقدار ثابت

حيث p,v يمثل ضغط وحجم الغاز قبل مرور الموجة وبتفاضل الطرفين

$$d(pv) = 0$$

$$pdv + vdp = 0$$

dp يشير إلى مقدار الزيادة في الضغط الذي يحدث نقصان في الحجم مقداره dv

$$p = -\frac{vdp}{dv} = -\left(\frac{dp}{dv/v}\right) \quad \div v$$

لكن معامل المرونة الحجمي B يعرف بأنه

$$B = -\frac{dp}{dv/v}$$

ومن مقارنة المعادلتين نجد إن : $P = B$

في هذه الحالة تعرف B بأنها معامل المرونة الايزوثرمي . وعليه تكون سرعة الصوت تحت الشروط الايزوثرمية هي :

$$V = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_\circ}}$$

سرعة الموجة الصوتية في الوسط تحت الشروط الايزوثرمية تعتمد على الانضغاطية وكثافة الوسط سواء كان الوسط غاز أو سائل

.

لذلك التعريف الدقيق لمعامل المرونة الحجمي الاديباتيكي

$$B_{ad} = -\left(\frac{dp}{dv/v}\right)_{ad}$$

$$B_{ad} = -v\left(\frac{dp}{dv}\right)_{ad}$$

لحساب $B_{ad}$ يجب حساب المشتقة $\left(\frac{dp}{dv}\right)_{ad}$ باستخدام المعادلة الاديباتيكية للغاز المثالي :

$pv^{\gamma}$=constant

$$\ln p + \gamma \ln v = \ln c$$

$$\frac{dp}{p} + \gamma\frac{dv}{v} = 0$$

$$\frac{dp}{p} = -\gamma\frac{dv}{v}$$

$$\left(\frac{dp}{dv}\right)_{ad} = -\gamma\frac{p}{v}$$

$$-v\left(\frac{dp}{dv}\right)_{ad} = -\gamma p$$

بالمقارنة مع

$$B_{ad} = -v\left(\frac{dp}{dv}\right)_{ad}$$

$$B_{ad} = -\gamma p$$

معامل المرونة الحجمي الاديباتيكي للهواء حسب مفهوم لابلاس

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_{\circ}}}$$

حيث B معامل المرونة الحجمي ، $\rho_{\circ}$ كثافة المائع الحجمية.

$$\therefore\ v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho_{\circ}}}$$

وهذه هي معادلة لابلاس أو تصحيح لابلاس

**حيث توصـــل العالم لابلاس إلى الاســـتنتاج الآتي (إن انتقال الموجات الصـــوتية خلال الهواء ليس**

**عملية ايزوثرمية بل إنها عملية اديباتيكية "كظيمة" أي أن :**

$pv^{\gamma}=constant$

**حيث γ النســـبة بين الحرارة النوعية للهواء تحت ضـــغط ثابت cp إلى الســـعة الحرارية النوعية للهواء تحت حجم ثابت cv .**

وباستخدام هذه العلاقة يمكن إيجاد سرعة الصوت في الهواء تحت الشروط القياسية حيث إن قيمة γ في الهواء تساوي ١,٤ ، $\rho_{\circ}=1.293\ kg/m^3$ وبتطبيق معادلة لابلاس نجد قيمة سرعة الصوت هي :

$$v=\sqrt{\frac{1.14*0.76*13.6*10^3*9.81}{1.293}}$$

$$\therefore\ v=331.34\ m/sec$$

**هذه النتيجة تتفق مع القيمة التجريبية الصـــحيحة لسرعة الصوت لذا فان عملية انتقال الموجة في الهواء عملية اديباتيكية وليســـت ايزوثرمية أي إن إن العملية التي لا يحصـــل فيها انتقال حرارة من والى النظام تسمى اديباتيكية ، وللحصول على عملية اديباتيكية يجب أن يعزل النظام عزلا تاما .**

$$\boldsymbol{\rho_{\circ}=\rho g h}$$

$\rho=13.6\ gm/cm^3$ , $13.6\ kg/m^3$ , $g=981cm/sec^2$ , $9.81\ 3/sec^2$

$h=76\ cm\ Hg$ , $0.76\ m\ Hg$ , $\boldsymbol{\rho_{\circ}=1.293\ kg/m^3}$ , $v=280m/sec$

وعلى هذا الأســـاس هناك اختلافا في النتيجة بمقدار 16% وهو يمثل مقدارا كبيرا في الخطأ ، وقد تم معالجة هذا الاختلاف من خلال التفســير الصـــحيح الذي قدمه العالم الفرنسي لابلاس وكما مبين أعلاه.

ســـرعة الموجة الصوتية تتناسب عكسيا مع الجذر التربيعي لكثافة الغاز عند ثبوت درجة الحرارة $V\alpha\frac{1}{\sqrt{\rho}}$ لذلك تختلف سرعة الصوت في الغازات المختلفة رغم أن لها نفس درجة الحرارة.

وإذا كان الوسط صلبا تصبح السرعة : $v=\sqrt{\frac{Y}{\rho}}$

حيث Y معامل يونك ، ρ الكثافة الحجمية.

**انتقال الموجات الصوتية**

يوضـــح الشكل (١-٣) موجة منتقلة نحو اليمين عبر انبوب ممتلئ بالغاز ، نفترض شريحة رقيقة من الهواء ســـمكها $\Delta x$ متموضـــعة على طول الانبوب وعندما تمر الموجة خلال x فان جســـيمة الهواء تتذبذب الى اليسار واليمين بحركة توافقية بسيطة حول موضع التوازن لذلك فان تذبذبات هذه الجسيمة تحدث موجة صوتية .

يمكن كتابة دالة الموضع بالصورة التالية : $s(x,t)= s_{max} \cos (kx-wt)$

حيث ان $s_{max}$ تمثل سعة الازاحة القصوى لجسيمة الهواء

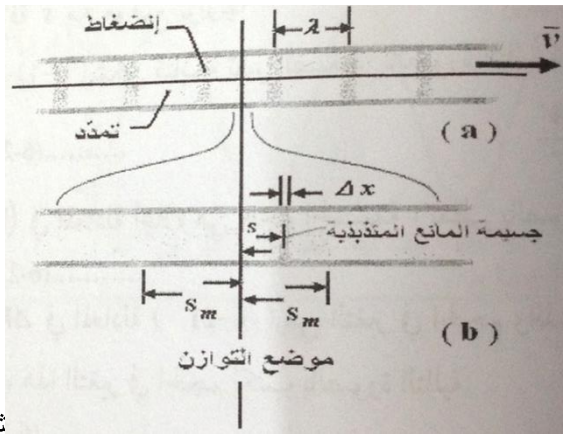
k : العدد الموجي ، w: التردد الزاوي للمكبس

ونلاحظ ان حركة الجســـيمة على طول محور x في اتجاه انتشـــار الموجة الصوتية (موجة طولية) ، وان تغير ضـــغط الغاز $\Delta P$ (ســـعة الضغط وهو اكبر تغير لضغط الموجة ) يمكن كتابته بالصورة التالية :

$$\Delta P = \Delta P_{max} \sin (kx-wt)$$

$$\Delta P_{max} = (v\rho\omega)_{max}$$

حيث ان موجة الضغط متفاوتة مع موجة الازاحة بزاوية 90 ونلاحظ ان التغير في الغط يكون اقصى ما يمكن عندما تكون الازاحة مســـوية للصـــفر ، والازاحة تكون اقصى ما يمكن عندما يكون الضغط مساويا للصفر .




شكل (1-4)