الباب الثامن

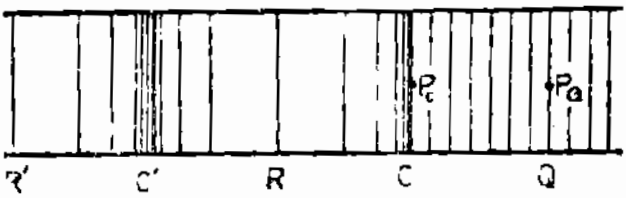
انتقال الصوت

الموجات الصوتية عبارة عن موجات ميكانيكية طولية تنتقل فى الأجسام الصلبة والسوائل والغازات وتتذبذب فيها الجسيمات فى إتجاه حركة الموجة. وحيث أن الموجات الميكانيكية الطولية لها مدى كبير من التردد فان الموجات الصوتية يكون ترددها بحيث يمكن سماعها وتمييزها.

ويتراوح هذا المدى بين ٢٠، ٢٠٠٠٠ سيكل/ثانية ويسمى بالمدى المسموع أما الموجات الميكانيكية الطولية التى لها تردد يقل عن ٢٠ سيكل/ ثانية فتسمى موجات تحت الصوتية (Infrasonic waves) والموجات التى لها تردد أعلى من ٢٠٠٠٠ سيكل/ثانية تسمى موجات فوق الصوتية (ultrasonic waves) . تصدر الموجات تحت الصوتية من مصادر كبيرة ومن أمثلتها الموجات الصادرة عن الزلازل . أما الموجات فوق الصوتية ذات التردد العالى فيمكن أن تصدر عن ذبذبات بللورة الكوارتز التى تعطى رنينا مع المجال الكهربى المتردد الواقع عليها وتسمى هذه الظاهرة (Piezoelectric effect) . تردد مثل هذه الذبذبات حوالى ٦×١١^{٨} سيكل/ثانية وتكون طول الموجة فى الهواء حوالى ٥×١٠^{-٥} أى مساوية لطول موجة ضوء مرئى . أما الموجات الصوتية المسموعة فتصدر من تذبذب الأوتار والأعمدة الهوائية والرقائق وغيرها . ونتيجة لتذبذب هذه العناصر يحدث تضاغط فى الهواء المحيط أثناء الحركة الأمامية للعنصر ثم يحدث تخلخل فى الهواء أثناء حركة الرجوع وهكذا تنتقل الموجة من المصدر وتنتشر فى الهواء المحيط حتى تصل إلى الأذن .

٨ — ١ سرعة الصوت فى الغازات :

يوضح شكل (٤٩) جزءا من أنبوبة بها مائع (fluid) ينتقل خلاله موجات صوتية متجهة نحو اليمين . يحدث التخلخل عند (R ، R') والضاغط



شكل (٤٩)

عند (C ، C') أما عند (Q) فان الإضطراب لم يحدث بعد وتكون سرعة أى جسيم عندها فى هذه اللحظة تساوى صفراً بينما تتحرك (C) بسرعة قدرها (u) نحو اليمين . فاذا تخيلنا المائع فى الأنبوبة يتحرك نحو اليسار بنفس السرعة (v) التى تتحرك بها الموجات نحو اليمين) فى هذه الحالة فان التضاغطات والتخلخلات تكون مستقرة بالنسبة للأنبوبة . الضغط عند (C) أعلى من الضغط عند (Q) لأن (C) منطقة تضاغط . سرعة المائع عند (Q) هى (v) وسرعته عند (C) أقل من ذلك بمقدار ($u = -\Delta v$)

لأن السرعة عند (c) $= v - u$

فاذا كانت (Δt) هى الفترة الزمنية التى تستغرقها كتلة قدرها (m) من المائع فى التحرك من (Q) إلى (C) فان :

معدل هذه الكتلة $= -\frac{\Delta v}{\Delta t}$

والقوة التى تحركها $= F = - m \frac{\Delta v}{\Delta t}$

ولكن إذا كانت (A) هى مساحة مقطع الأنبوبة ، (P_c) هو ضغط المائع عند (C) ، (P_Q) هو ضغط المائع عند (Q) فان :

$$F = P_c A - P_Q A = A \Delta P$$

$$\therefore - m \frac{\Delta v}{\Delta t} = A \Delta P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

ولكن :

$$m = \rho A v \Delta t$$

حيث (ρ ، v) هما كثافة وسرعة المائع عند (Q)

وبالتعويض فى المعادلة (٤٦)

$$\therefore - \rho A v \Delta t \frac{\Delta v}{\Delta t} = A \Delta P$$

$$\therefore - \rho v = \frac{\Delta P}{\Delta v}$$

$$\therefore \rho v^2 = - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta v}{v}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

ولكن ($A v \Delta t$) هو حجم كتلة المائع عندما تعبر (Q) فى زمن قدره (Δt) . أى :

$$V = A v \Delta t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

وحجم هذه الكتلة عندما تكون عند (C) هو :

$$V' = A\,(v-u)\,\Delta t$$

∴ التغير فى حجمها هو $- Au\Delta t$

$$-\Delta V = -A\Delta v\Delta t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (49)$$

ومن المعادلتين (٤٨ ، ٤٩)

$$\therefore \quad -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta v}{v}$$

وبالتعويض فى المعادلة (٤٧)

$$\therefore \rho v^2 = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

ولكن :

$$K = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta v}{V}} = \frac{\text{stress}}{\text{strain}}$$

حيث K معامل المرونة الحجمى للمائع

$$\therefore \rho v^2 = K$$

$$\therefore v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

وإذا كان المائع غازا فان

$$K = \gamma P$$

حيث γ هى النسبة بين الحرارتين النوعين للغاز وذلك لأن إنتقال الصوت فى الغاز يعتبر انتقالا مع ثبوت كمية الحرارة .

$$\therefore v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

ويوضح الجدول الآتى سرعة الصوت فى الأوساط المختلفة :

وحيث أن :

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

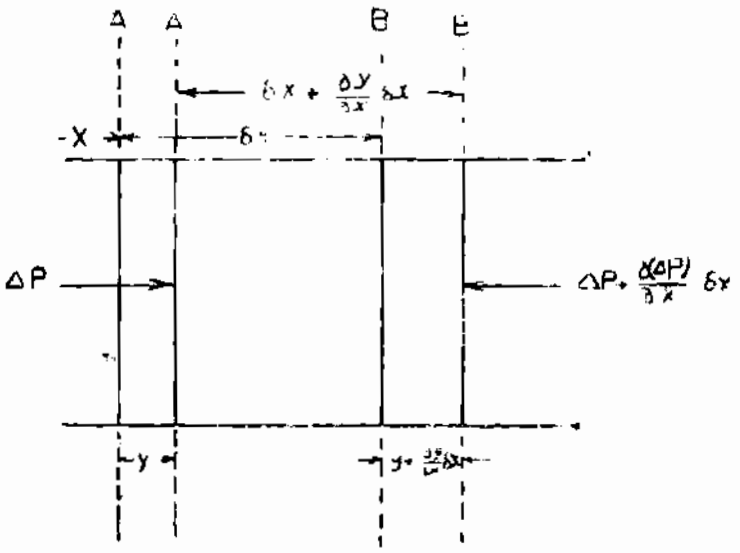
أى أن سرعة الغاز تتناسب تناسباً طرديا مع الجذر التربيعى لدرجة حرارته المطلقة .

جدول رقم (٣)

الوسط	درجة الحرارة °م	سرعة الصوت (متر / ثانية)
الهواء	٠	٣٣١ر٣
الايدروجين	٠	١٢٨٦
الاكسجين	٠	٣١٧ر٢
المـــاء	١٥	١٤٥٠
الرصاص	٢٠	١٢٣٠
الالومنيوم	٢٠	٥١٠٠
النحاس	٢٠	٣٥٦٠
الحـديد	٢٠	٥١٣٠

٨ — ٢ برهان اخر لايجاد معادلة سرعة الصوت فى الغازات :

نفرض مستويين من المائع (A ، B) (شكل ٥٠) عموديين على إتجاه



شكل (٥٠)

إنتشار الموجة الصوتيه وأن (A) يبعد عن نقطة الأصل مسافة (x) ، (B) يبعد عن نقطة الأصل مسافة (x + δx) وأنه نتيجة لإنتشار الموجة الصوتية حدثت ازاحة (y) للمستوى (A) الى (A') وازاحة :

$$+\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\delta x$$

للمستوى (B) إلى (B') حيث $\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)$ هو معدل تغيير الازاحة بالنسبة للبعد عن نقطة الأصل.

∴ فرق إزاحة (B) عن إزاحة (A)

$$= y + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \delta x - y = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \delta x$$

أى أن التغير فى حجم طبقة المائع الذى كان يشغل المسافة بين (B'B)

$$\Delta V = A \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \delta x$$

حيث (A) هى مساحة مقطع الأنبوبة

∴ الانفعال $= -\frac{\Delta V}{V}$

$$= - \frac{A \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \delta x}{A \, \delta x} = - \frac{\partial y}{\partial x}$$

وإذا كان (P) هو الضغط عند (A) فان الضغط عند (B) هو

$$P + \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \delta x$$

∴ فرق الضغط على جانبى الطبقة (AB) هو

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \delta x$$

∴ القوة المؤثرة على الطبقة هى :

$$F = A \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \delta x$$

وإذا كانت عجلة الجسيمات هى $\left(-\frac{d^2y}{dt^2}\right)$ من (B) إلى (A)

$$\therefore \quad F = \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \delta x = - A \, \delta x \, \rho \, \frac{d^2y}{dt^2}$$

$$\therefore \frac{\partial P}{\partial x} = - \rho \, \frac{d^2y}{dt^2} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (52)$$

ولكن معامل المرونة الحجمى :

$$K = \frac{\text{stress}}{\text{strain}} = \frac{P}{-\frac{\partial y}{\partial x}}$$

$$\therefore \quad P = - K \frac{\partial y}{\partial x}$$

$$\therefore \frac{\partial P}{\partial x} = - K \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

ومن المعادلة (٥٢)

$$\therefore K \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\therefore \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{K}{\rho} \frac{d^2y}{dx^2}$$

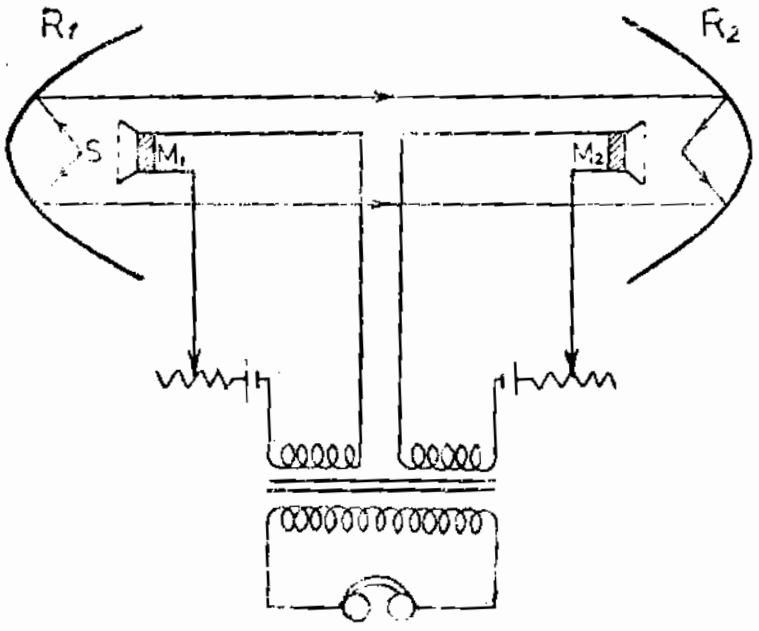
وهذه هى المعادلة التفاضلية لحركة الموجة حيث السرعة :

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

٨ - ٣ سرعة الصوت فى الغازات

١ — طريقة هب (Hebb's method)

توضع مرآتين كل منها على شكل قطع مكافئ (Parabolic mirrors) على بعد حوالى ١٠٠ قدم من بعضهما شكل (٥١) فى وسط ثابت. يوضع مصدر



شكل (٥١)

صوتى (S) يعطى نغمة مستمرة فى بؤرة المرآة الأولى ويوضع معه ميكروفون (M_1) كما يوضع ميكروفون آخـــر (M_2) فى بؤرة المرآة الأخـــرى (R_2) ويتصل الميكروفون بالملف الابتدائى لمحول كهربى يتصل ملفه الثانوى بسماعة (سماعة) . يجب أن يكون تردد المصدر مرتفعا جدا حتى يكون طـول الموجة صغيرا ، ويمكن استخدام شوكة رنانة ترددها ١٢٨٠ سيكل / ثانية كما يجب أن تصنع المرآتين من عجينة باريس (plaster of paris) ويكون قطر كل منها حوالى ٦ قدم . يخرج شعاع متوازى من الصوت من المرآة (R_1) ويسقط على المرآة (R_2) وينعكس على (M_2) . فاذا كانت الاشارات الصوتية التى يستقبلها كل من (M_1 , M_2) منعكستى الطور (out of phase) فانه لايسمع صوت فى السماعة المتصلة بالملف الثانوى . أما إذا كانا متحدتى الطور (in phase) فان

الصوت يكون على أشدة فى السماعة . فاذا حركنا (M_2 ، R_2) معا نحو (R_1) فان سلسلة النهايات العظمى والصغرى من الصوت تتعاقب نتيجة لتغير الطور النسبى للاشارات الصوتيـــة التى يستقبلها الميكروفونين . المسافه التى تتحركها المرآة بين سماع نهايتين عظمى أو صغرى تساوى نصف طول الموجة ($\frac{\lambda}{2}$) .

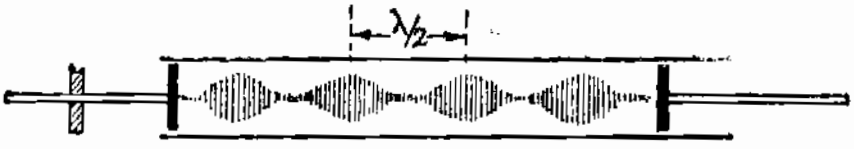
وحيث أن تردد الصوت معلوم (f)

$$\therefore \quad v = f\lambda$$

ومنها يمكن تعيين (v)

ب – طريقة انبوبة كندت (Knudt)

فى هذه الطريقـــة تنشأ موجات طولية فى قضيب مثبت من منتصفة ومنه تنتقل خلال أنبوبة حيث تنعكس من واجهة مكبس يتحرك فى الناحية الأخرى من الأنبوبة ، وينشأ عن ذلك موجات موقوفة عندما تكون واجهة المكبس عند مواضع معينة . ويمكن مشاهدة الموجات الموقوفة عن طريق ذر مسحوق الليكوبوديوم (lycopodium Pouder) داخل الأنبوبة . فنتيجة لاختلاف الضغط داخل الأنبوبة ينشأ عن ذلك تكون أكوام من المسحوق عند العقد (شكل ٥٢) فتكون المسافة بين عقدتين أو بطنين متتاليتين مساوية لنصف



شكل (٥٢)

طول الموجة $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$. تردد الصوت يساوى تردد ذبذبة القضيب وهذا يمكن معرفته .

$$\therefore v = f\lambda$$

ويمكن بهذه الطريقة مقارنة سرعة الصوت فى غازات مختلفة . فاذا كانت (v_1) هى سرعة الصوت فى الغاز الأول ، (v_2) سرعته فى الغاز الثـــانى ، (λ_1 ، λ_2) هما أطوال الموجتين الصوتيتين على الترتيب فان :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

٨ — ٤ تذبذب الاعمدة الهوائية

١ ـ الانابيب المقفلة الطرف

إذا طرقت شوكة رنانة ووضع أحد فرعيها بالقرب من فوهة أنبوبة مقفلة الطرف ، فعندما يتحرك فرع الشوكة إلى أسفل يضغط الهواء الملاصق له وهذا يدفع مايليه وهكذا تنتقل موجة تضاغط فى الأنبوبه ، حتى إذا ماوصلت عند قاعها ارتدت إلى أعلى . فاذا فرضنا أنه عند وصولها إلى فوهة الأنبـــوبة كان فرع الشوكة يتحرك إلى أعلى كذلك ، فانها تساعد الشوكة فى حركتها وفى الوقت ذاته عندما يتحرك فرع الشوكة إلى أعلى يترك أسفله تخلخلا وينتقل هذا التخلخل فى الأنبوبة ، وينعكس من القاع صاعدا إلى أعلى . فاذا ما وصل إلى الفـــوهة وجد فرع الشوكة يتحرك إلى أسفل فيساعده على الحركة إلى أسفل كما ساعد التضاغط حركة الفرع إلى أعلى .

وبتكرار هذه الحركة تعمل الشوكة على تقوية ذبذبة هواء الأنبوبة ويقال

أن هناك رنينا (resonance) بين الشوكة وعمود الهواء بالأنبوبة .

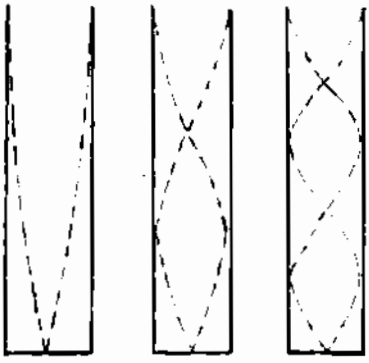
ويلاحظ أنه أثناء الذبذبة الكاملة لفرع الشوكة تكون الموجة الصوتية قد انتقلت خلال عمود الهواء أربع مرات . فاذا فرضنا أن طول الأنبوبة هو (l) فان طول الموجه الصوتيه يكون أربع أضعاف طول الأنبوبة :

$$\therefore \lambda = 4l$$

$$\therefore v = f\lambda$$

$$= 4fl$$

حيث (v) هى سرعة الصوت فى الهواء ، (f) تردد الشوكة أو تردد عمود الهواء حيث الإثنان متفقان عند حدوث الرنين بينهما . ويمكن أن ننظر إلى حدوث الرنين بين الشوكة وعمود الهواء نظرة أخرى فنقول أنه عند انتقال الموجات الصوتية فى الأنبوبة تتداخل الموجات الساقطة مع الموجات المنعكسة وتحدث الموجات الموقوفة داخل الأنبوبة . ويتكون عند قاع الأنبوبة عقدة حيث تكاد تكون حركة الجزيئات معدومة . وعند فوهة الأنبوبة تتكون



شكل (٥٣)

البطن . ومن شكل (٥٣ - ١) نرى أن طول الموجة الصوتية التى تحدث رنينا فى الأنبوبة هو أربعة أضعاف طول الأنبوبة أى .

$$\lambda = 4l$$

ويصبح التردد :

$$f_1 = \frac{v}{4l}$$

وتسمى النغمة فى هذه الحالة بالنغمة الأساسية للأنبوبة . ويمكن أن يتذبذب الهواء بالأنبوبة بطرق أخرى على شرط احتفاظه بعقدة عند قاع الأنبوبة وبطن عند فوهتها . ففى شكل (٥٢ - ب) :

$$\lambda_2 = \frac{4}{3} l$$

$$\therefore \quad f_2 = \frac{v}{\frac{4}{3} l}$$

وفى شكل (٥٢ - حـ) :

$$\lambda_3 = \frac{4}{5} l$$

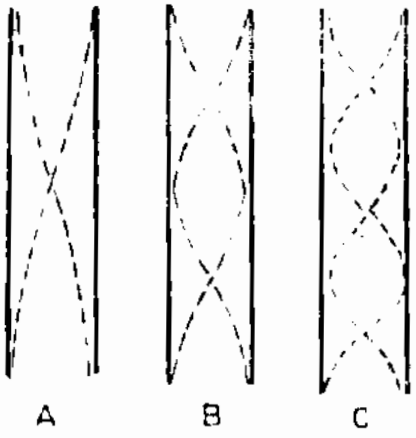
$$\therefore \quad f_3 = \frac{v}{\frac{4}{5} l}$$

$$\therefore \quad f_1 : f_2 : f_3 \ldots = 1 : 3 : 5 : \ldots$$

أى أن الأنبوبة المقفلة الطرف يمكن أن يتذبذب الهواء بداخلها محدثا النغمة الأساسية أو إحدى هارمونياتها الفردية فقط .

ب — الأنابيب المفتوحة الطرفين :

يمكن أن يتذبذب هـــواء الأنبوبة المفتوحة الطرفين بشرط حدوث بطن عند كل طرف . فى شكل (٥٤ - أ) تتكون عقدة واحدة فى وسط الأنبوبة وبطنين عند الطرفين



شكل (٥٤)

$$\therefore \quad \lambda_1 = 2l$$

$$\therefore \quad f_1 = \frac{v}{2l}$$

وفى شكل (٥٤ - ب)

$$\lambda_2 = l$$

$$\therefore \quad f_2 = \frac{v}{l}$$

فى شكل (٥٤ - جـ)

$$\lambda_3 = \tfrac{1}{2} l$$

$$\therefore f_3 = \frac{v}{\frac{1}{2}l}$$

$$\therefore f_1 : f_2 : f_3 \ldots = 1 : 2 : 3 \ldots$$

أى أنه فى الأنبوبة المفتوحة يمكن أن يتذبذب فيها الهواء محدثا إما النغمة الأساسية لها أو إحدى هارمونياتها ،

فيما سبق اعتبرنا أن البطن تتكون تماما عند الطرف المفتوح وهذا به بعض التقريب ، إذ أوجد رالى Rayleigh أن البطن تتكون خارج الفوهة بمسافة صغيرة تتوقف على قطر الأنبوبة وسميت هذه المسافة بخطأ الفوهة (end correction) وجد أنه يساوى (0.3 D) حيث (D) هو القطر الداخلى للأنبوبة . وعلى ذلك يكون طول الموجة فى النغمة الأساسية الأولى للأنبوبة المفتوحة الطرف هى :

$$\lambda_1 = 4 (l + 0.3 D)$$

والنغمة التى تليها

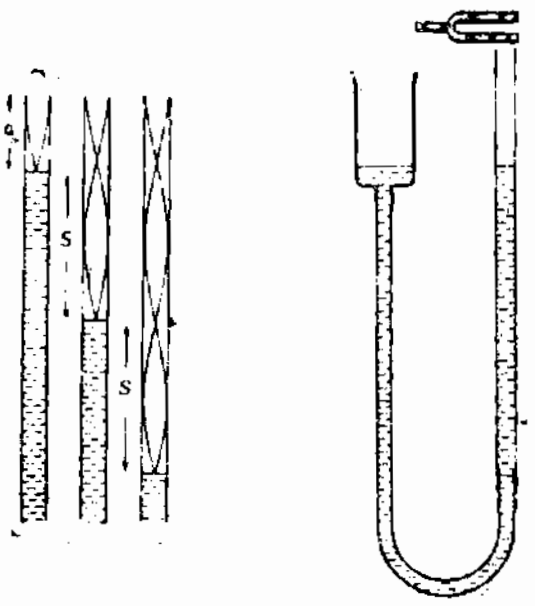
$$\lambda_3 = \frac{4}{3} (l + 0.3 D)$$

وهكذا

٨ ـ ٥ ايجاد سرعة الصوت فى الهواء بواسطة أنبوبة الرنين :

١ ـ الانابيب المقفلة

تملأ أنبوبة زجاجية طويلة بالماء شكل (٥٥) وتتصل من أسفل بأنبوبة من المطاط إلى مستودع يمكن رفعه أو خفضه . تطرق شوكة رنانة معلومة التردد



شكل (٥٥)

ثم توضع بالقرب من فوهة الأنبوبة . يضبط سطح الماء فى الأنبوبة حتى يحدث رنينا عاليا بين الشوكة وأقصر طول عمود هواء فوق الماء .

$$\therefore \lambda = 4\,(a + 0.3\,D)$$

$$\therefore f = \frac{v}{4(a+0.3\,D)}$$

وبمعرفة تردد الشوكة (f) وهو نفس تردد عمود الهواء تنتج سرعة الصوت (v) .

ويمكن أن يتكرر الرنين العالى كلما نقص سطح الماء عن موضعه السابق بمقدار (S) . وعلى ذلك تكون المسافة (S) بين رنينين متتالين هى المسافة

بين عقدتين متتاليتين .

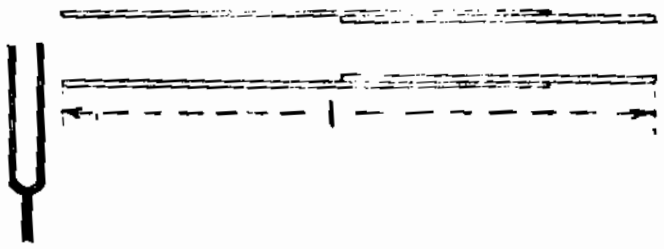
$$\therefore \quad S = \frac{\lambda}{2}$$

$$\therefore \quad v = 2Sf$$

ومنها يمكن تعيين (v)

ب ـ الأنابيب المفتوحة :

توضع الشوكة الرنانة أمام فتحة إحـــدى أنبوبتين تنزلقان داخل بعضهما (شكل ٥٦) حتى نحصل على أقصر طول يمكن أن يحدث رنينا مع الشوكة



شكل (٥٦)

$$\therefore \quad \lambda = 2\,(l + 0.3\,D_1 + 0.3\,D_2)$$

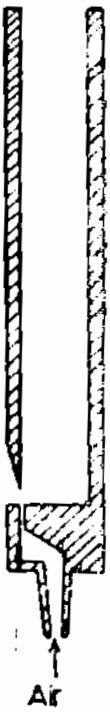
حيث (D_2 ، D_1) هما الأقطار الداخلية لكل من الأنبوبتين

$$\therefore \quad v = 2f\,(l + 0.3.D_1 + 0.3\,D_2)$$

ومنها يمكن تعيين (v)

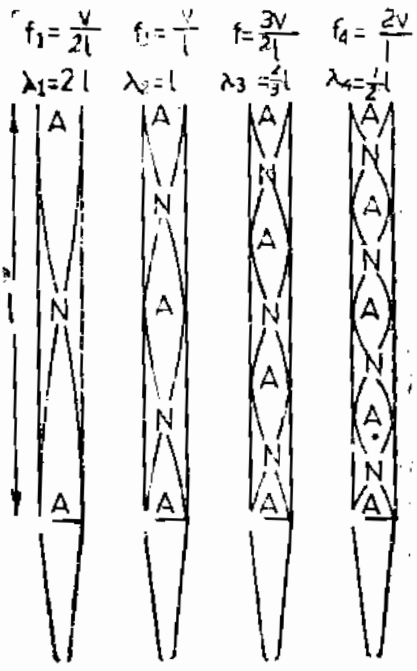
٧ — ٦ الأنابيب الارغوانية (organ pipes)

الأنبوبة الأرغوانية هي عبارة عن أنبوبة رنين ومصدر صوتي متحدين



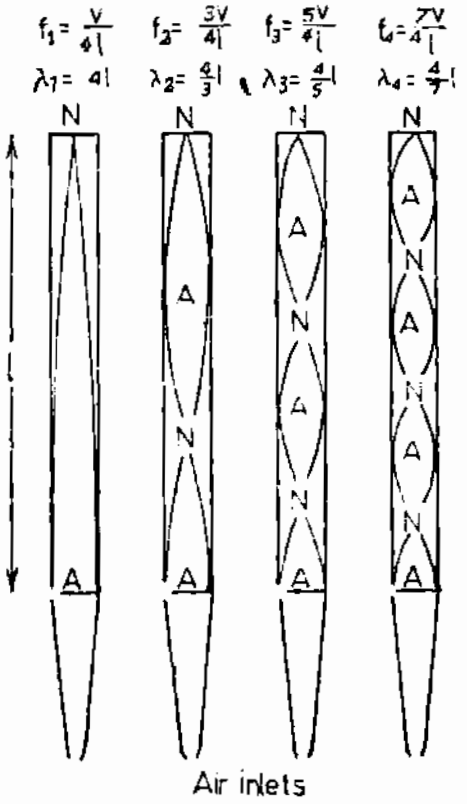
شكل (٥٧)

والمصدر الصوتى (شكل ٥٧) عبارة عن ثقب ضيق مستطيل ويمكن أن يدفع خلاله تيارا من الهواء . فاذا ما اصطدم هذا التيار بعد خروجه من الثقب بحافة حادة . انقسم إلى دوامات هوائية صغيرة متتالية . وهـــذه هى منشأ الصوت . ووظيفة الأنبوبةهى مجرد تقوية هذا الصوت وتثبيته . وهى التى تتحكم كذلك فى تردده . وهذا هو السبب فى أن الأنبوبة الأرغوانية وما يماثلها من الآلات الموسيقية يمكنها إصدار أنغاما كثيرة مختلفة التردد بواسطة تغير طول عمود الهواء بها فقط . والطريقة المستخدمة عادة لإحداث هذا التغير هى ثقب الأنبوبة فى عدة مواضع من جانبها وتغطية أو فتح هذه الثقوب حسب الارادة ويوضح شكل (٥٨) تذبذب الأنابيب الأرغوانية المفتوحة



شكل (٥٨)

فى الهرمونيات الأربع الأولى ، كما يوضح شكل (٥٩) تذبذب الأنابيب



شكل (٥٩)

الأرغوانية المقفلة . ويلاحظ أن البطن تتكون عند الفتحة وأن الأعداد الفردية من الهرمونيات هى التى تظهر فقط فى حالة الأنبوبة المغلقة .

٨ ـ ٧ سرعة الصوت فى السوائل :

فى سنه ١٨٢٧ قام كل من كولادون ، سترم (Colladon and sturm) بقياس سرعة الصوت فى الماء فى بحيرة جنيف بسويسرا ، حيث وقف قاربين

على بعد ١٤ كيلو مترا من بعضها ، وفى القارب الأول طرق جرس تحت الماء فى اللحظة التى عندها أشعلت شحنة من البارود فوق سطح القارب . وفى القارب الثانى قام مشاهد برصد الزمن بين لحظة رؤيته للضوء وسماعه لصوت الجرس عن طريق بوق منغمر فى الماء . وقد وجد أن هذا الزمن هو ٩٫٤ ثانية . وهو الزمن الذى استغرقه الصوت للانتقال مسافة قدرها ١٤ كيلو متر أى أن سرعة الصوت بهذه التجربة هو ١٤٤٠ متر/ثانية .

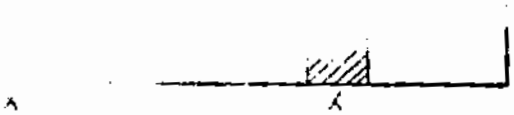
ومنذ هذا التاريخ قام كثيرون من الباحثين بإيجاد سرعة الصوت فى الماء خاصة فى مياه البحار لما لها من أهمية فى تحديد مواقع الغواصات عن طريق صدى الصـــوت .

وأساس تجارب قياس سرعة الصوت فى الماء هو تفجير شحنة من البارود على عمق معين من سطح الماء واستقبال الصوت بواسطة عدة ميكروفونات تقع تحت الماء فى طريق الصوت وعلى أبعاد معينة . وقد أوجدت هذه التجارب أن سرعة الصوت تزداد قليلا بارتفاع درجة الحرارة بمقدار ٢٫٠ ٪ لكل ارتفاع فى درجة الحرارة قدره واحد درجة مئوية . كما أوجدت التجارب أن سرعة الصوت تتغير بتغير ملوحة الماء بمقـــدار ٢٫٠ ٪ لكن زيادة فى الملوحة (Salinity) قدرها ٢٫٠ ٪

٨ — ٨ سرعة الصوت فى قضيب

نفرض قضيبا مساحة مقطعه (A) (شكل ٦٠) وأننا أثرنا على أحد طرفيه بضربة فجائية لمدة قصـــيرة (t sec) . فاذا كانت (v) هى سرعة انتشار الاضطراب فى القضيب فان المسافة التى تحركها خلال الزمن (t) هى :

$$l = vt$$



شكل (٦٠)

وإذا كان (x) هو طول التضاغط الحادث فان كل جسيم من سطوح (A) من القضيب يمكن أن تكون إزاحته (x) خلال الزمن (t) . وعلى ذلك تكون سرعة إزاحة الجسيمات هى ($\frac{x}{t}$) . وإذا كانت كثافة مادة القضيب هى (ρ) :

∴ كتلة الطول (l) من القضيب = ($lA\rho$)

∴ كمية تحرك هذا الجزء :

$$= lA\rho \times \frac{x}{t}$$

$$= vt\,A\rho\,\frac{x}{t} = vA\rho x$$

وهذا هو التغير فى كمية التحرك لأن الجسيمات كانت ساكنة قبل الضربة .

∴ change in momentum (impulse)

$$= vA\rho x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (٣)$$

ولكن القوة التى أحدثت الاضطراب (F) يمكن إيجادها من المعادلة :

$$Y = \frac{F/A}{x/l}$$

حيث (Y) هو معامل يونج لمادة القضيب ، (x) هو التضاغط أى النقص فى الطول (l).

$$\therefore F = \frac{Y \times A}{l} = \frac{Y \times A}{vt}$$

$$\therefore Ft = \frac{Y \times A}{v} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (54)$$

وهذا هو الدفع .

وبمساواة المعادلتين (٥٣ ، ٥٤) .

$$\therefore \frac{Y \times A}{v} = vA\rho x$$

$$\therefore v^2 = \frac{Y}{\rho}$$

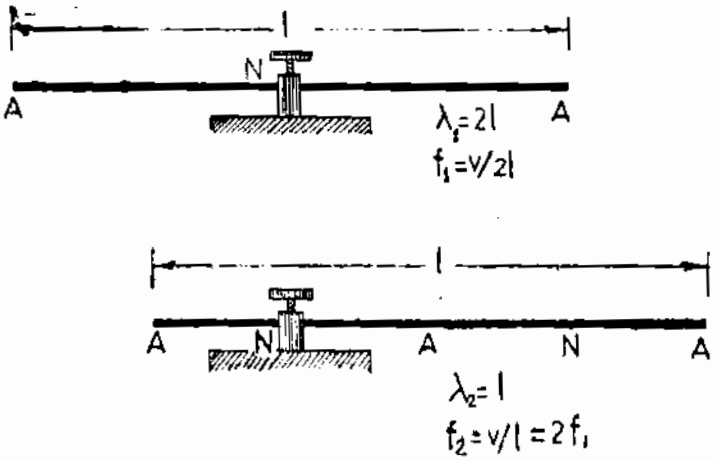
$$\therefore v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

ويمكن أن يتذبذب القضيب ذبذبة طولية إذا ثبت من أى نقطة فيه ومسحنا أحد طرفيه بقطعة من جلد الشمواه المصمغة فينشأ عن ذلك موجة موقوفة ذات عقدة عند النقطة المثبتة وبطنين عند الطرفين . وفى شكل (٦١-ا) حيث يثبت القضيب من منتصفه ، تتكون العقدة عند المنتصف والبطنين عند الطرفين . ويكون طول الموجة

$$\lambda = 2l$$

وتردد النغمة الأساسية الأولى هو :

$$f_1 = \frac{v}{2l}$$



شكل (٦١)

أما فى شكل (٦١ ـ ب) حيث ثبت القضيب عند نقطة تبعد عن أحد الطرفين بمقدار $\frac{1}{4}$ الطول .

$$\therefore \lambda_3 = l$$

وتردد النغمة الهرمونية الثانية :

$$f_2 = \frac{v}{l}$$

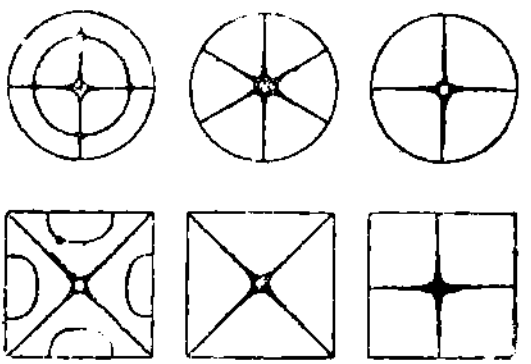
$$= 2f_1$$

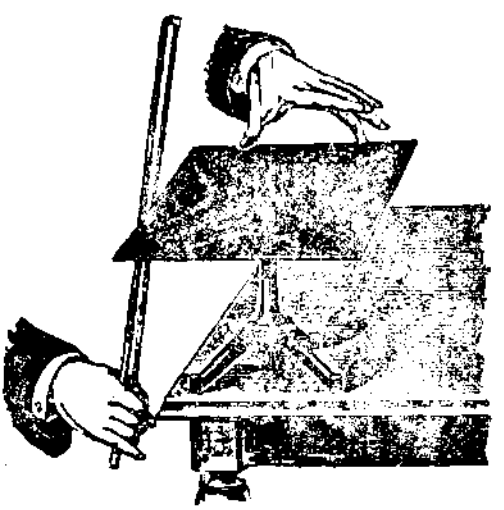
وحيث أن سرعة انتقال الصوت فى الأجسام الصلبة أكثر بكثير من سرعته فى الهواء ، لذا فان تردد النغمة يكون أعلى بكثير من تردد النغمة فى الأنابيب الأرغوانية .

٨ ـ ٩ تذبذب الصفائح (الرقائق) (plates)

إذا ثبتت صفيحة مربعة الشكل عند وسطها وأمر على حافتها عند ركن من

أركانها قوس كان . فان الصفيحة تتذبذب بطريقة منتظمـــة بحيث يتكون على الصفيحة خطان عقديان تكاد تنعدم الحركة عندهما ومواضع أخرى بينهما تكون الحركة فيها كبيرة وهى البطون . ويصل الخطان العقديان مابين منتصفى حافتين متقابلتين . أما البطون فتكون عند الأركان . ويمكن الكشف عن مواضع العقد والبطون على الصفيحة بذر بعض الرمال الناعمة على الصفيحة حتى إذا ما اهتزت بامرار قوس الكمان ابتعد الرمل تدريجيا عن مواضع البطون وتجمع عند العقد (شكل ٦٢) .



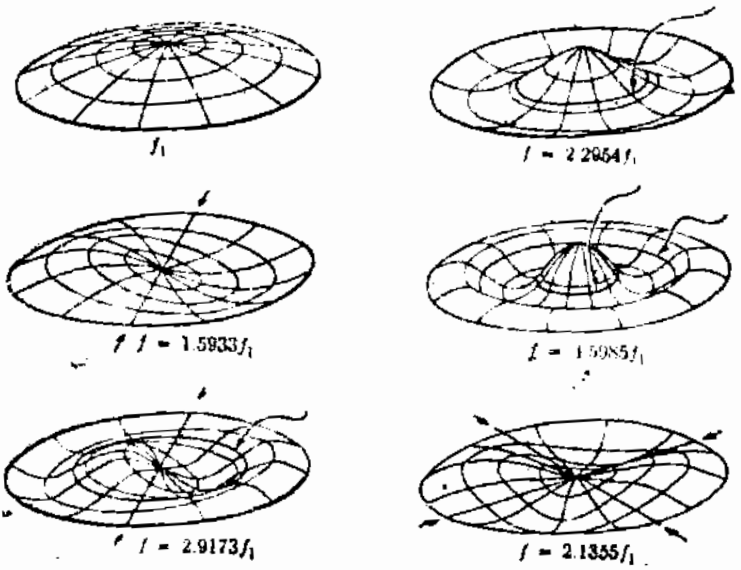


شكل (٦٢)

ويمكن أن تتذبذب الصفيحه بطرق أخرى عديدة تتوقف على مواضع تثبيتها ومواضع امرار القوس عليها . وفى الشكل المبين تظهر بعض هذه الطرق فى حالتى الصفائح المربعة والمستديرة . ويلاحظ أن موضع إمرار القوس على الصفيحة هو موضع بطن .

٨ ـ ١٠ تذبذب الاغشية (membranes)

إذا شد غشاء مرن من جوانبه مثل رق الطبلة ، ثم ضرب فان إضطرابا ذا بعدين يخرج من مكان الضرب وينعكس من حواف الغشاء المثبته. وإذا تذبذبت نقطة من الغشاء ذبذبة دورية فان قطارا مستمرا من الموجات ينتقل خلال الغشاء مثلما ينتقل قطار الموجات فى الأوتار المشدودة. وينشأ عن ذلك قطارين من الموجات الموقوفة لأن الاضطراب فى الغشاء ذا بعدين بينما الأضطراب فى الوتر ذو بعد واحد ، ولكل موجة موقوفة من هؤلاء تردد يتفق مع ذبذبة



شكل (٦٣)

الغشاء ويسمى أقل تردد بالتردد الأساسى ويسمى ما يلى ذلك بتردد النغمات العليا وعادة يحدث أن يتواجد عدد من النغمات العليا مع النغمة الأساسية أثناء تذبذب الغشاء .

العقد التى تتكون من الغشاء المتذبذب هى خطوط وليست نقط . وحيث أن الغشاء مثبت من أطرافه ، لذا فان طرف الغشاء خط عقدى . ويوضح شكل (٦٣) الطرق المختلفة التى يمكن أن يتذبذب بها غشاء دائرى مثبت من أطرافه ، كما يوضح الخطوط العقدية . ويلاحظ أن الترددات العليا ليست هرمونية بمعنى أنها ليست مضروبات صحيحة للتردد الأساسى .

وترجع أهمية الصفائح والأغشية المتذبذبة إلى كونها مستخدمة فى الأجهزة الصوتية مثل الميكروفون والسماعة .

تمارين

(١) علق ثقل قدره ٢٠ كيلو جرام من طرف سلك صلب فاذا كان تردده عندما يمسح أحد طرفيه بقطعة من جلد الشمواه المصمغة هو ٢٠ مرة قدر تردده عندما تجذب أى نقطة فيه ثم تترك ، احسب مساحة مقطع السلك إذا علم أن معامل يونج لمادته هو ١٩٫٦ × ١٠^١١ داين/سم^٢ .

حيث أن مسح السلك بقطعة الشمواه تحدث ذبذبة طولية فيـــه ، فتكون سرعة الموجات الطولية المنتشرة فى السلك هى :

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

وإذا كان (l) هو طول السلك ، فيكون طول موجة التردد الأساسى :

$$\lambda = 2l$$

لأن طرفى السلك مثبتين وتحدث عندهما عقدتين .

$$\therefore \quad f_1 = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad \ldots \ldots \quad (i)$$

وفى حالة جذب نقطة من السلك وتركها ثانية فان موجة مستعرضة تنتقل بتردد قدره

$$f_2 = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{m}} \quad \ldots \ldots \quad (ii)$$

حيث (F) هى قوة الشد فى السلك ، (n) كتلة وحدة الأطوال من السلك ،

وبقسمة المعادلتين (i ، ii) :

$$\therefore \frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{Y}{\rho} \cdot \frac{m}{F}}$$

ولكن .

$$m = A\rho$$

حيث (A) هى مساحة مقطع القضيب ، (ρ) كثافته

$$\therefore \frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{Y A}{F}}$$

$$\therefore 20 = \sqrt{\frac{19.6 \times 10^{11} \times A}{20000 \times 980}}$$

$$\therefore A = 0.004 \text{ cm}^2$$

(٢) أحسب سرعة الصوت فى الهواء فى معدل الضغط ودرجة الحرارة إذا علم أن كثافة الهواء فى معدل الضغط ودرجة الحرارة هى ٠٠١٢٩٣ر٠ جم/سم٣ ، γ = ١ر٤١ .

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

$$= \sqrt{\frac{1.41 \times 76 \times 13.6 \times 980}{0.001293}}$$

$$= 332.5 \text{ metre/sec}$$

(٣) إذا كان تردد النغمة الأساسية فى أنبوبة أرغوانية مفتوحة هو ٣٠٠ فى الثانية . وإذا أعطت أنبوبة مغلقة ترددا مساويا لهذا فى النغمة الهرمونية الثانية . فما هو طول كل أنبوبة ؟

(الجواب : ١٤ سم)

(٤) قضيب من الخشب طولة ١٠٠ سم مثبت من منتصفه ويعطى ذبذبات طولية لها نفس النغمة التى تصدرها أنبوبة أرغوانية مفتوحة طولها ٨٠ سم. أحسب سرعة الصوت فى القضيب إذا علم أن سرعة الصوت فى الهواء هى ٣٤٠ متر/ثانية.

تردد النغمة الأساسية فى أنبوبة أرغوانية مفتوحة هو :

$$f = \frac{v}{2l} = \frac{34000}{2 \times 80} = \frac{3400}{16} \quad \ldots \ldots \quad (i)$$

طول الموجة فى القضيب

$$\lambda_r = 2l = 200$$

$$\therefore \quad f = \frac{v_r}{\lambda_r} = \frac{v_r}{200} \quad \ldots \ldots \quad (ii)$$

ومن المعادلتين (i ، ii) :

$$\therefore \quad \frac{v_r}{200} = \frac{3400}{16}$$

$$\therefore \quad v_r = 45 \text{ metre/sec.}$$