

الشكل (1-2-49) أ- إثارة الوتر. ب- إن الأمواج المستقرة فقط والموافقة للتواترات المرناية , تستطيع أن تتواجد لفترة طويلة.

إن بعض امكانيات النماذج الموجية (الأمواج المستقرة) موضحة على الشكل (1-2-49) ب). وبصورة عامة يقال أن الحركة الاهتزازية هي عبارة عن مجموعة من هذه النماذج التجاوبية المختلفة ولكن فقط بتلك التواترات الموافقة للتواترات التجاوبية. إن ايجاد التواتر التجاوبي معتمد غير أن طول الأمواج المستقرة مرتبط بطول الوتر L . إن التواتر الأخفض الموافق للنموذج الأساسي يوافق بطناً واحداً على الوتر وكما هو واضح من الشكل (1-2-48) ب), في هذه الحالة فإن طول الوتر L يساوي نصف طول الموجة أي أن $L = \lambda_1/2$ حيث : λ_1 طول موجة النموذج الأساسي. أما النموذج التالي للاهتزاز فيوافق بطنان ويسمى المدرج الثاني وفي هذه الحالة $L = \lambda_2$. ومن أجل المدرج الثالث والرابع سيكون لدينا على التتابع $L = (3/2)\lambda_3$ و $L = 2\lambda_4$ وهكذا....

وبصورة عامة يمكن أن نكتب:

$$L = n \lambda_n /$$

حيث : $n = 1, 2, 3, \dots$. يرمز العدد الصحيح n إلى رقم الهرموني فإن $n = 1$ توافق المدرج الأول و $n = 2$ الهرموني الثاني وهكذا....

يسمى أيضاً الهرموني الثاني بالمدرج الأول والهرموني الثالث بالمدرج الثاني وهكذا. على هذه الصورة يكون:

حيث : $n = 1, 2, 3, \dots$.

ومن أجل تعيين تواتر الاهتزاز f , نستخدم العلاقة (1-2-27) والتي تعطي $f = v/\lambda$.

بما أن الموجة المستقرة تكافئ موجتان متقدمتان متحركتان بصورة متعاكسة، فإن مفهوم السرعة له نفس المعنى فسرعة الموجة في الوتر يمكن التعبير عنه بالعلاقة (1-2-28) من خلال شد الوتر F_T والكثافة الخطية μ بحيث: $v = \sqrt{F_T/\mu}$.

مثال (1-2-18) :

يبلغ طول وتر بيانو $1,10\text{m}$ وكتلته $9,0\text{g}$. والمطلوب :

(أ) - أحسب قوة شد الوتر بحيث يكون التواتر الأساسي (تواتر النغمة الأساسية) مساوياً 131 Hz ؟

(ب) - أحسب التواترات التجاوبية الأربعة الأولى؟

الحل :

(أ) - إن طول الموجة للزي الأساسي تساوي :

وعند ذلك فإن سرعة الأمواج المتقدمة :

$$v = \lambda f = ($$

على هذه الصورة ومن العلاقة (15-2) يكون :

$$F_T = \mu v^2 = ($$

ب)- إن التواترات التجاوبية الثانية والثالثة والرابعة تزيد عن التواتر الأساسي بـ 2 و 3 و 4 مرات وتساوي على الترتيب 262 و 393 و 524 هرتز.

لقد تعرفنا سابقاً ماذا تمثل الإزاحة D لموجة متقدمة أحادية البعد على شكل تابع بين الاحداثي x والزمن t. على نفس الصورة يمكن اجراءه بالنسبة للأمواج المستقرة في الوتر. وكما ذكرنا فإن الأمواج المستقرة يمكن تمثيلها على شكل مجموع موجتان متقدمتان واللذان تتحركان بصورة متلاقية.

ومن أجل كل منهما يمكن أن نكتب: (أنظر العلاقاتين (15-10B) و (15-13B)).

D

D

وهنا نفترض أن التخماد معدوم أما التواترات وطول الموجة لهاتان الموجتان فهي متساوية. إن مجموع هاتان الموجتان المتقدمتان والمشكلتان للموجة المستقرة تعطى بالعلاقة:

$$D = D_1 + D_2 =$$

وباستخدام العلاقات المثلثية من أجل مجموع جيب زاويتان نجد:

$$\sin\theta_1 + \sin\theta_2 = 2s$$

يمكن إعادة كتابة العلاقة الأخيرة على الشكل:

$$D = 2D_M \sin kx$$

بفرض $x = 0$ من أجل النهاية اليسرى للوتر ومن أجل النهاية اليمنى يكون لدينا $x = L$ حيث L هو طول الوتر. وبما أن نهايتي الوتر مثبتتين و $D = 0$ عند $x = 0$ وعندما $x = L$.
 إن العلاقة (1-2-46) تحقق الشروط البدائية ($D = 0$ عندما $x = 0$) , تتحقق الشروط الثانية عندما يتحقق:

حيث n أعداد صحيحة أو لما كان $k = 2\pi/\lambda$.

على هذه الصورة فقد توصلنا من جديد إلى العلاقة (1-2-45).

إن العلاقة (1-2-46) إضافة إلى الشرط $\lambda = 2L/n$ تمثل الوصف الرياضي للأمواج المستقرة. سنرى أن الجسم في أي نقطة x سينجز اهتزازاً هرمونياً (حيث أنه يوجد في العلاقة $\cos \omega t$). كل جسيمات الوتر تهتز بنفس التواتر $f = \omega/2\pi$, اصف إلى ذلك فإن السعة تتعلق بـ x وتساوي $2D_M \sin kx$. وعندما $kx = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$ فالسعة تكون عظمى وتساوي $2D_M$. وبكلمات أخرى توافق السعة العظمى النقاط التالية:

والتي تمثل مواضع البطون ولا شيء آخر.

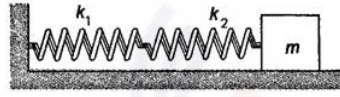
تظهر الأمواج المستقرة في الحقيقة غير متحركة في حين الأمواج المتقدمة تنجز حركة واضحة نحو الأمام. إن تسمية الأمواج المستقرة توافق أيضاً ما يحصل في هذه الحالة للطاقة. في العقد تكون جزيئات الوتر ساكنة لا تحمل طاقة. وكأن الطاقة تتوقف مكانها ولا تنقل على طول الوتر. لا تثار الأمواج المستقرة فقط في الأوتار وإنما في كل الأجسام القادرة على انجاز الاهتزاز. حتى أنه لو ضربنا بالمطرقة على حجر أو لوح سنثير فيهما أمواجاً مستقرة والموافقة للرنين الخاص بهذا الجسم.

إن التواتر التجاوبي يتعلق بأبعاد الجسم كما أن التواتر التجاوبي في الوتر يتعلق بطوله. على سبيل المثال التواتر الخاص لجسم صغير لا يمكن أن يكون مساوٍ للتواتر الخاص لجسم كبير. ففي كل الأجهزة الموسيقية يتشكل الصوت بفضل الأمواج المستقرة في الأوتار وجانب الأوتار وفي أعمدة الهواء وفي الطبلات الخ.

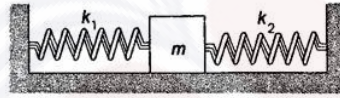
مسائل

- (1) يمتلك النابض الحقيقي كتلة، كيف سيختلف الدور الحقيقي للاهتزاز وتواتره عن القيمة المحصول عليها لحمل يهتز في نهاية نابض مهمل الكتلة؟
- (2) كيف يمكن مضاعفة السرعة العظمى للاهتزازة التوافقية؟
- (3) علق جسم كتلته m في نهاية نابض ثابت صلادته k . قُطع النابض من منتصفه وعلق فيه نفس الثقل. بكم سيتغير تواتر الاهتزاز؟
- (4) جسمان لهما نفس الكتلة معلقان بنابضين متماثلين. يسحب الجسم الأول المعلق بمسافة 10cm والآخر يسحب لمسافة 20cm ويتركان بنفس الوقت أي من الجسمان يصل أولاً إلى وضع التوازن؟
- (5) أ- أكتب المعادلة التي تصف حركة النابض، إذا كان معروفاً أنه عندما نمطه بمقدار 20cm عن وضع التوازن ونتركه سيهتز بدور قدره 1,5s؟
ب- عين إزاحة النابض عندما $t = 1,8s$.
- (6) حشرة كتلتها 0,30g وقع في شبكة عنكبوت. اهتزت شبكة العنكبوت بتواتر 15Hz.
أ- عين قيمة k لشبكة العنكبوت.
ب- بأي تواتر ستهتز شبكة العنكبوت إذا وقعت فيها حشرة كتلتها 0,10g؟
- (7) يُزاح النابض تحت تأثير ثقل m إلى مسافة 0,8cm عن وضع توازنه ويترك، عند أية مسافة عن وضع التوازن يكون:
أ- سرعة الثقل m تساوي نصف السرعة العظمى؟
ب- يكون التسارع نصف التسارع الأعظمي؟
- (8) لنفرض أن $\Delta r = r - r_0$ هي عبارة عن إزاحة صغيرة عن وضع التوازن والتي يكون فيها $\Delta r \ll r_0$.
أ- بين أن مثل هذه الإزاحة تؤدي إلى حركة اهتزازية توافقية تقريباً.
ب- عين قيمة k .
- ج- ما هو دور مثل هذا الاهتزاز (اعتبر إحدى الذرات ساكنة)؟

- (9) جسم كتلته m مربوط بنابضين لهما ثابتا الصلادة k_1 و k_2 . كما في الشكل (2-1أ، ب).



(أ)



(ب)

الشكل (2-1أ، ب)

بين أن دور الاهتزاز على الشكل (1أ) يعطى بالعلاقة:

وعلى الشكل (1ب) يعطى بالعلاقة:

(10) جسم كتلته $1,0\text{kg}$ ينجز الاهتزاز حسب القانون:

حيث t تقاس بالثواني، أما x فتقاس بالمترات. أوجد:

أ- سعة الاهتزاز.

ب- التواتر.

ج- الطاقة الكلية.

د- الطاقة الحركية والكامنة عندما $x = 0,16\text{m}$.

(11) رصاصة كتلتها $0,012\text{kg}$ تصيب حجر كتلته $0,300\text{kg}$ والمربوط في نابض

شاقولي والذي يمتلك ثابت صلادة قدره $5,2 \times 10^3\text{N/m}$. النهاية الأخرى للنابض

ثابتة. إذا كانت سعة اهتزاز الحجر بعد إصابته بالرصاصة تساوي $12,4\text{cm}$ ما هي

سرعة الرصاصة إذا اعتبرت أنه بعد إصابة الرصاصة للحجر تحركا معاً؟



12) إذا كانت طاقة اهتزاز جملة أكبر بعشرة مرات من جملة أخرى ولكن ثابت صلادة الجملة الأولى k أكبر بمرتين من الجملة الثابتة. ما هي العلاقة بين سعنا الاهتزاز لهاتين الجملتين؟

13) ما هو طول البندول الرياضي حتى يكون دوره يساوي بدقة 1s؟

14) إن دور اهتزاز البندول الرياضي على الأرض يساوي 0,60s ما هو دور هذا البندول على المريخ، حيث تسارع الجاذبية هناك تساوي 0,37 من التسارع الأرضي؟
15) إذا كان طول البندول الرياضي يساوي 0,36m وأزيج بمقدار 10° عن الشاقول وترك:

أ- أحسب تواتر الاهتزاز .

ب- بأي سرعة تمر الكرة النقطية المعلقة بنهايته من النقطة الأخفض؟

16) نواس فتل عبارة عن قرص أسطواني مسطح والذي عزم عطالته I معلق كما في الشكل (2-2). إذا دورنا القوس بزاوية θ عن وضع التوازن فإنه يبدأ الاهتزاز. إن السلك المفتول يشكل عزم قوة إرجاع: $\tau = -K\theta$ حيث K ثابت، أما الزاوية θ متغيرة كبيرة.

أ- أوجد معادلة الحركة (تابعة θ للزمن) وبين أن الاهتزاز هو اهتزاز توافقياً.

ب- أوجد العلاقة من أجل دور الاهتزاز .



الشكل (2-2)



17) يهتز حجر كتلته 750g على نهاية نابض ثابت صلادته $k = 56,0\text{N/m}$. يتحرك

الحجر في سائل حيث يؤثر عليه قوة مقاومة $f = -bv$ و $b = 0,162\text{N.s/m}$.

أ- ما هو دور الاهتزاز؟

ب- ما هو مقدار نقصان السعة بعد كل اهتزاز؟

ج- عبر عن تابعية الاحداثيات للزمن عندما $x = 0$, $t = 0$.

وعندما $x = 0,120\text{m}$, $t = 100\text{s}$.

18) أ- بين أن الطاقة الميكانيكية الكلية $E = mv^2/2 + kx^2/2$ لهزاز توافقي تخامده

ضعيف يقل مع الزمن حسب القانون:

$$E = \frac{1}{2}kA$$

حيث E_0 -الطاقة الميكانيكية الكلية عندما $t = 0$ (اعتبر أن $\omega \gg b/2m$).

ب- بين أنه خلال دور واحد يفقد جزء من الطاقة يساوي:

حيث: $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, أما $Q = m\omega_0/b$.

19) هل يتساوى تواتر موجة دورية بسيطة مع تواتر اهتزازة مثارة منها؟ ولماذا؟

20) بين الاختلاف بين سرعة الموجة العرضية والمتقدمة في حبل وسرعة الجزيء ضمن

جزء صغير من الحبل؟

21) أذكر أمثلة إضافية على أمواج أحادية وثنائية وثلاثية البعد؟

22) اذكر سببان يبينان سبب انخفاض سعة الموجة في الماء كلما ابتعدت عن المنبع؟

23) موجتان وحيدتا البعد لهما نفس السعة وهما متماثلتان بكافة الخواص ماعدا أن الأولى

لها طول موجة أكبر بمرتين من الثانية. أي من الموجتين تحمل طاقة أكبر؟ وبكم

مرّة؟

24) لاحظ صياد سمك أن ذروة الموجة تمر أمام مقدمة القارب الواقف عليه والمتوقف كل

5s. وإذا كانت المسافة بين الذرى (كما قدرهما) تساوي 15m. ما هي سرعة حركة

الأمواج؟

25) إن تواتر المجال الموجي الوسطي يقع بين (550-1600kHz) وإن الأمواج الراديوية (الأمواج الكهرومغناطيسية) تنتشر بسرعة $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. ما هو طول الموجة الموافق لهذا المجال؟ ما هو مجال طول الموجة الموافق للمجال من التواتر بين (88-108MHz).

26) حبل كتلته 0,85kg مشدود بين مسندين يقعان على مسافة 30m الواحد عن الآخر. إذا كانت قوة الشد 1950N. أوجد زمن انتقال النبضة من أول مسند إلى المسند الآخر؟

27) احسب سرعة الأمواج الطولية: أ- بالماء، ب- بالغرانيت.

28) أوجد طول الموجة الصوتية ذات التواتر 7000Hz والمنتشرة على طول قضيب حديدي.

29) حبل متماثل كتلته m وطوله L ومعلق بصورة شاقولية.

أ- بيّن أن سرعة الموجة العرضية في هذا الحبل تساوي \sqrt{gh} . حيث h ارتفاع الحبل عن النهاية السفلى.

ب- ما هو زمن عبور النبضة الموجية من النهاية السفلى إلى العليا؟

30) تمتلك موجتان في نفس المنطقة من القشرة الأرضية نفس التواتر ولكن طاقة إحداها أكبر بمرتين من الأخرى. ما هي علاقة سعة هاتين الموجتين؟

31) قارن بين: أ- شدة، ب- سعة الموجة الزلزالية على مسافة 10km و 20km عن بؤرة الهزة الأرضية.

32) بيّن أن الإزاحة في الموجة الكروية، تتناقص في كل الاتجاهات بصورة متساوية عن منبع نقطي يمكن كتابتها على الشكل:

D

حيث r- المسافة عن المنبع، أما A- ثابت.

33) لنفرض موجتان وحيدتا البعد والموصوفتان بالتابعان:

$D_2 =$

بيّن أنه إذا حقق هذان التابعان العلاقة الموجية:

فإن أي مجموعة خطية $D = c_1 D_1 + c_2 D_2$ تحقق هذه العلاقة الموجية حيث c_1 و c_2 ثابتان.

(34) لنفرض موجتان وحيثما البعد ولهما نفس السعة والتواتر تنتشران في نفس الوسط والفرق طور Φ يمكن كتابة هاتان الموجتان كمايلي:

$$D_1 = D_M \sin (kx - \omega t)$$

$$D_2 = D_M \sin (kx - \omega t + \Phi)$$

أ- باستخدام علاقة المثلثات:

$$\sin\theta_1 + \sin\theta_2 = 2 \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)$$

بيّن أن الموجة المحصلة لها الشكل:

$$D = 2D_M \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\Phi}{2}\right)$$

ب- ما هي سعة الموجة المحصلة؟ هل الموجة جيبيّة تماماً؟

ج- بيّن أننا سنراقب التداخل البناء عندما: $\Phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ وتداخل هدام عندما: $\Phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$.

د- صف الموجة المحصلة (بالمعادلات الرياضية وكلامياً) عندما $\Phi = \pi/2$.

(35) تتجاوب الأوتار بأربعة بطون عند التواتر 22Hz. اذكر ثلاثة تواترات إدى والتي عندها ستتجاوب أيضاً.

(36) إذا كانت سرعة الموجة في الوتر 480m/s. ماهي المسافة بين العقد للأمواج الواقفة بتواتر 86,0Hz؟

(37) إذا كان تواتر مدروجان متتاليان بالتوتر يساويان 320Hz و 360Hz ما هو تواتر المدروج الأساسي؟

(38) بيّن أن تواتر الموجة الواقفة في وضع طوله L وكثافته الخطية μ ، والمشدود بقوة F_T يعطى بالعلاقة:

حيث n - عدد صحيح.

- 39) يعلق قرص رقيق متجانس نصف قطره $R = 10 \text{ cm}$ في نقطة من محيطه بسلك مهمل الكتلة طوله $2R$. وعند إزاحة القرص عن وضع التوازن بزاوية صغيرة α وتركه بدون سرعة بدائية (يهمل الاحتكاك)، يهتز النواس في مستوي القرص باهتزازات صغيرة حول وضع التوازن.
- أ- أرسم الشكل الموافق، وأكتب المعادلة التفاضلية لحركة القرص مبيناً مدلول كل حد من حدودها.
- ب- احسب نبض الاهتزاز ω والدور P (بفرض أن تسارع الجاذبية $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$)
- ج- احسب نصف قطر القرص بحيث يكون دور الاهتزاز $P = 1 \text{ s}$.

الفصل الثالث

الصوت

The sound

1-3- الصوت The sound :

يرتبط مفهوم الصوت بالسمع وبالتالي بالعمليات الفيزيولوجية في الأذان وكذلك العمليات النفسية في أدمغتنا (حيث تجري هناك معالجة الاحساسات الواردة إلى عضو السمع). إضافة لذلك نفهم تحت مفهوم السمع الظاهرة الفيزيائية التي تؤثر في أذاننا وبالضبط الأمواج الطولانية.

عند دراسة الصوت يمكن التحدث عن ثلاثة مفاهيم مختلفة:

الأول: يجب أن يتواجد منبع للصوت, وكما بالنسبة لأية موجة فإن منبع الأمواج الصوتية هو عبارة عن جسم مهتز.

الثاني: الطاقة المحمولة من منبع الصوت إلى المستقبل وهي على شكل أمواج صوتية طولانية.

الثالث: استقبال الصوت من قبل آذاننا أو أية أجهزة استقبال للصوت.

سندرس في نهاية هذا الفصل منابع ومستقبلات الصوت ولندرس بعضاً من خواص الأمواج الصوتية.

1-3-1- خواص الصوت :

لنأخذ مثلاً طبلة تصدر صوتاً, يهتز الجلد المثبت على الطبلة ويشكل في الهواء موجة صوتية. تنتشر فيه ولذلك وكون الهواء يتصل مع غشاء الطبلة فإن اهتزاز الهواء مرتبط باهتزاز هذه الأغشية. غير أن الأمواج الصوتية يمكنها الانتشار في مواد أخرى يمكن سماع اصطدام حجران مع بعضهما بعضاً وكذلك السباح تحت الماء يمكن أن يسمع الأصوات حيث تنتقل الأمواج الصوتية إلى الأذن عبر الماء, ولو وضعنا آذاننا على سكة القطار يمكننا سماع صوت قطار يقترب أو صوت جرار زراعي عندما نضع آذاننا على الأرض. في هذه الحالة لا تؤثر بصورة مباشرة على طبلة الأذن غير أن الأمواج الطولية المنتشرة في الأرض تسمى أمواجاً صوتية حيث أن أي اهتزاز يؤدي إلى اهتزاز الهواء حول الآذن.

في الحقيقة إن الأمواج الطولية تنتشر في أي وسط مادي وعادة ما يسمى وسطاً صوتياً. يتضح أنه لا يمكن للصوت أن ينتشر في حال عدم وجود وسط مادي. فعلى سبيل المثال لا يمكن سماع صوت جرس كهربائي إذا وضع الجرس في وعاء مفرغ من الهواء. تمتلك سرعة الصوت قيمة مختلفة بحسب الأوساط المادية المختلفة. إن سرعة انتشار الصوت في الهواء عند الدرجة 0°C والضغط الجوي 1atm تساوي $331,3\text{m}$ ففي الفصل السابق شاهدنا أن السرعة تتعلق بمعامل المرونة وكثافة المادة. وتعطى سرعة الصوت في الهواء والغازات والأوساط السائلة بالمعادلة :

حيث B : معامل الانضغاط بكل الاتجاهات, أما ρ : كثافة الوسط.

ففي الهليوم الذي كثافته أقل بكثير من كثافة الهواء ومعامل الانضغاط في كل الاتجاهات تقريباً متساوي لذلك فسرعة الصوت فيه أكبر بحوالي ثلاث مرات من الهواء وفي السوائل والأجسام الصلبة, الأقل انضغاطاً وبالتالي تمتلك معامل مرونة أكبر فستكون سرعة الصوت أكبر. إن قيم سرعة الصوت في مواد مختلفة معطاة في الجدول (1-3-1) وهذه السرعة تتعلق بصورة واضحة بدرجة الحرارة. وهذه التابعة تكون واضحة في الغازات بينما لا تكون مؤثرة في المواد الصلبة والسائلة. على سبيل المثال في الهواء عند ارتفاع درجة الحرارة درجة مئوية واحدة, فإن سرعة الصوت تزداد تقريباً بمقدار $0,60\text{m/s}$:

حيث t : درجة الحرارة مقدرة بـ $^{\circ}\text{C}$.

على سبيل المثال عند درجة الحرارة 20°C يكون لدينا:

$v \approx (331$

الجدول (1-3-1) سرعة الصوت في مواد مختلفة عند درجة الحرارة 20°C

المادة	سرعة الصوت m/s
الهواء	343
الهواء ($^{\circ}\text{C}$)	331
الهليوم	1005

الهيدروجين	1300
الماء	1440
ماء البحر	1560
الحديد والفولاذ	≈ 5000
الزجاج	≈ 4500
الألمنيوم	≈ 5100
لب الخشب الثقيل	≈ 4000

ومن أجل إنسان ذي سمع طبيعي نجد خاصيتين للصوت ألا وهما سوية الشدة (الجهارة) والإرتفاع. وهاتان الخاصتان تصفان الشعور الناشئ في وعي السامع. غير أنه كل خاصة من هذه الخواص تطابق قيمة يمكن قياسها بالطرائق الفيزيائية.

فالجهارة (سوية الشدة) مرتبطة مع شدة الموجة الصوتية وسندرسها لاحقاً بينما ارتفاع الصوت يمثل كون هذا الصوت مرتفعاً كما في الكمان أو الفيليبونت ومنخفضاً كصوت طبل كبيراً أو أوتار جهيرة. إن القيمة الفيزيائية التي تصف ارتفاع الصوت هي تواتر اهتزاز الأمواج الصوتية وإن هذا ما لاحظته أولاً العالم غاليليو. فكلما انخفض التواتر كلما تناقص ارتفاع الصوت وكلما ازداد التواتر كان الصوت أكثر ارتفاعاً. تستقبل الأذن تواترات في المجال من 20 حتى 20000 هرتز، والمسماة بالمجال المسموع. ومن المعروف أنه من الممكن ملاحظة بعض الحيود عن هذا المجال (المجال المسموع) فالطبيعة العامة أن المسنون يبدؤون بالسماع السيء للتواترات العالية والحد الأعلى عندهم ينخفض حتى 10000 هرتز وحتى أخفض من ذلك.

إن الأمواج الصوتية التي تواتراتها تقع خارج المجال المسموع يمكن أن تصل إلى آذاننا ولكن لا نسمعها. وتسمى الأمواج الصوتية ذات التواترات التي تزيد عن 20000 هرتز بالأمواج فوق الصوتية. (يجب عدم الخلط بينها وبين السرعة الأعلى من سرعة الصوت والتي تصف الجسم المتحرك بسرعة أعلى من سرعة الصوت). إن كثير من الحيوانات يمكنها سماع التواترات فوق الصوتية فعلى سبيل المثال تستطيع الكلاب سماع أصوات ذات ارتفاع حتى 50000Hz أما