



**ΤΕΙ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ**

**ΣΧΟΛΗ:ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ:ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΘΕΜΑ:<< ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ  
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ>>***

***ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΟΛΥΔΩΡΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ***

***ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ  
ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ***

***ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2010***

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
----------------	---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

1-1. Ήχος .....	7
1-2. Πηγές Ήχων .....	9
1-3. Εκπέμπουσες Επιφάνειες .....	13
1-4. Αντηχεία .....	13
1-5. Ανίχνευση των Ήχων .....	14
1-6. Ανάλυση των Ήχων .....	15
1-7. Κυματικά φαινόμενα στους ήχους .....	15
1-8. Υπέρηχοι .....	21

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

2-1. Το Ανθρώπινο Αυτί .....	24
2-2. Υποκειμενικά Χαρακτηριστικά των Ήχων .....	26
2-3. Μονάδες Ακουστότητας .....	32
2-4. Όρια Ακουστότητας .....	34
2-5. Φωνή του Ανθρώπου .....	36

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

3-1. Ο Απλός Ταλαντωτής .....	39
3-2. Αποσβενυμένες ή Φθίνουσες Ταλαντώσεις .....	41
3-3. Εξαναγκασμένες Ταλαντώσεις .....	45
3-4. Κύματα .....	49

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

4-1. Ορισμός της Ηχοαπορρόφησης, Γενικές Έννοιες .....	51
4-2. Διαδικασίες παραγωγής Ηχοαπορρόφησης .....	54
4-3. Συντελεστές Ηχοαπορρόφησης .....	56
4-4. Είδη και κατάταξη των Ηχοαπορροφητικών Υλικών .....	57
4-5. Ηχοαπορρόφηση του Αέρος .....	64
4-6. Απώλειες Διαδόσεως .....	68
4-7. Συγκρινόμενες Εφαρμογές Ηχοαπορρόφησης Ενεργής Μάζας .....	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	76

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα που έχω ασχοληθεί στην πτυχιακή εργασία μου αποτελείται από τρεις τομείς της επιστήμης της Φυσικής: την ακουστική, τις ταλαντώσεις – κύματα και την ηχοαπορρόφηση – απώλειες διαδόσεως ήχου.

Σαν ήχο χαρακτηρίζουμε τα ελαστικά κύματα που διαδίδονται μέσα στα στερεά, τα υγρά και τα αέρια και που η συχνότητά τους είναι ικανή να ερεθίζει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλεί το αντίστοιχο αίσθημα. Τους ήχους τους διακρίνουμε σε απλούς και σύνθετους ήχους. Στον απλό ήχο ή τόνο η ταλάντωση είναι αρμονική, ενώ στον σύνθετο ήχο ή φθόγγο η ταλάντωση είναι περιοδική.

Επίσης τους ήχους τους κατατάσσουμε σε θορύβους και κρότους. Στον θόρυβο η ταλάντωση είναι μεγάλης διάρκειας και ασαφούς συχνότητας, ενώ στον κρότο η ταλάντωση είναι απότομη.

Ορισμένες γνωστές πηγές οι οποίες παράγουν ήχους είναι: α) η σειρήνα όπου αποτελείται από ένα μεταλλικό κυλινδρικό δίσκο, που έχει στην περιφέρειά του τρύπες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, β) το διαπασών το οποίο είναι μια χαλύβδινη ράβδος λυγισμένη σε σχήμα U, γ) τις χορδές οι οποίες είναι επίμηκες κυλινδρικά στερεά σώματα, δ) τους ηχητικούς σωλήνες οι οποίοι είναι κυλινδρικοί ηπρισματικοί σωλήνες από ξύλο ή μέταλλο και τους οποίους διακρίνουμε σε ανοιχτούς ή κλειστούς και ε) το κουδούνι το οποίο είναι μια κοίλη πλάκα άνισου πάχους και σχήματος περίπου κωνικού.

Η ανίχνευση και μελέτη των ήχων γίνεται με την χρήση μικροφώνων τα οποία είναι συνδεδεμένα με παλμογράφο.

Επίσης η ανάλυση των ήχων γίνεται με σκοπό τον προσδιορισμό των εντάσεων και των συχνοτήτων των αρμονικών και μη που αποτελούν τον ήχο. Επιπλέον, η ανάλυση γίνεται με ηλεκτρική μέθοδο.

Ο ήχος αποτελείται από κυματικά φαινόμενα τα οποία είναι: α) η ανάκλαση του ήχου, β) η διάθλαση του ήχου, γ) η συμβολή των ήχων, δ) τα διακροτήματα, ε) τα στάσιμα ηχητικά κύματα, στ) η περίθλαση των ήχων και ζ) το φαινόμενο Doppler στους ήχους.

Επίσης, ένα άλλο φαινόμενο από τα οποία αποτελείται η ακουστική είναι οι υπέρηχοι. Ως υπέρηχους χαρακτηρίζουμε τους ήχους που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από 20000 Hz και δεν γίνονται αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί.

Τα χαρακτηριστικά των ήχων είναι το ύψος του ήχου, η ακουστικότητα του ήχου και η χροιά του ήχου. Η ακουστικότητα μετράται σε Phon και τα όρια της εξαρτώνται από ένα άνοιγμα ακουστότητας που εκτείνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής εντάσεως του ήχου.

Ως ταλαντώσεις χαρακτηρίζονται διάφορες δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα. Οι δυνάμεις οι οποίες τείνουν να ελαττώσουν το πλάτος των διαδοχικών ταλαντώσεων γύρω από την θέση ισορροπίας του σώματος ονομάζονται δυνάμεις αποσβέσεως.

Ένα είδος ταλαντώσεων είναι οι εξαναγκασμένες ταλαντώσεις το εύρος των οποίων εξαρτάται από το εύρος και την συχνότητα της διεγείρουσας δυνάμεως και των παραμέτρων του συστήματος στο οποίο εφαρμόζονται.

Επίσης, ηχοαπορρόφηση ονομάζουμε την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική κατά την πρόσπτωση των ηχητικών κυμάτων στις οριακές επιφάνειες του χώρου εντός του οποίου αυτά διαδίδονται.

Τέλος, τα ηχοαπορροφητικά υλικά τα κατατάσσουμε σε τρεις κατηγορίες: τα πορώδη υλικά, τα απορροφητικά πλαίσια ή τα διάτρητα απορροφητικά και τους συνηχητές. Τα πορώδη υλικά έχουν πολυάριθμα μικρά διάκενα τα οποία επικοινωνούν αφ' ενός μεν μεταξύ τους και αφ' ετέρου δε με τον εξωτερικό χώρο ο οποίος περιβάλλει το υλικό. Τα πορώδη υλικά παράγονται είτε σε στρώματα, είτε σε φύλα. Τα απορροφητικά πλαίσια ή τα διάτρητα απορροφητικά είναι χωρίσματα (πλάκες) μικρού πάχους και τα οποία τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια, ενώ οι συνηχητές είναι κοιλότητες με μικρό στόμιο οι οποίοι συντονίζονται σε χαμηλές συχνότητες τις οποίες και απορροφούν.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

### 1-1. ΉΧΟΣ

Γενικά σαν ήχους μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τα ελαστικά κύματα, που διαδίδονται μέσα στα στερεά, τα υγρά και τα αέρια και που η συχνότητά τους είναι ικανή να ερεθίζει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλεί το αντίστοιχο αίσθημα.

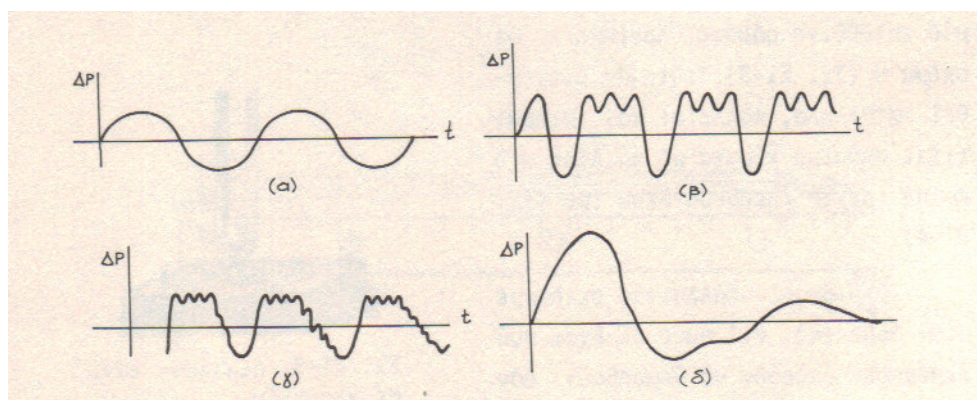
Από τον τρόπο που παράγονται και διαδίδονται τα κύματα, προκύπτει ότι οι ήχοι δεν διαδίδονται στο κενό, παρά μόνο μέσα στην ύλη και μάλιστα στα αέρια και τα υγρά αποτελούν διαμήκη κύματα, ενώ στα στερεά μπορούν να είναι και διαμήκη και εγκάρσια κύματα.

Τους ήχους τους διακρίνουμε σε απλούς και σύνθετους. Στον *απλό ήχο ή τόνο* η κίνηση των σωματιδίων του μέσου, μέσα από το οποίο διαδίδεται ο ήχος, είναι αρμονική ταλάντωση, ενώ στον *σύνθετο ήχο ή φθόγγο* η κίνηση των σωματιδίων του μέσου δεν είναι αρμονική ταλάντωση αλλά περιοδική. Ο σύνθετος ήχος όταν αναλυθεί κατά Fourier, βρίσκεται ότι αποτελείται από πολλούς απλούς ήχους, που οι συχνότητές τους είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας του θεμελιώδους ήχου, που υπάρχει ανάμεσα σ' αυτούς. Απλοί ήχοι παράγονται συνήθως από τα διαπασών, τις σειρήνες κ.α., ενώ σύνθετοι ήχοι παράγονται από τα μουσικά όργανα και την ανθρώπινη φωνή.

Στους ήχους μπορούμε να κατατάξουμε επίσης τους θορύβους και τους κρότους. Στο *θόρυβο* η κίνηση των σωματιδίων του μέσου δεν είναι περιοδική, αλλά ταλάντωση μεγάλης διάρκειας και ασαφούς συχνότητας, ενώ *στον κρότο* η κίνηση των σωματιδίων του αέρα είναι απότομη. Ο θόρυβος παράγεται

κατά την συγκέντρωση πολλών ανθρώπων, ενώ κρότος κατά την εκπυρσοκρότηση πυροβόλου όπλου.

Τα κύματα γενικά, επομένως και τα ηχητικά στον αέρα, είναι κύματα διαμήκη. Έτσι δημιουργούνται, κατά τη διάδοσή τους, πυκνώματα και αραιώματα, δηλαδή περιοδική αύξηση και ελάττωση της ατμοσφαιρικής πίεσεως. Στο σχήμα 1-1 έχουμε τη γραφική απεικόνιση των διάφορων ήχων. Οι ήχοι περιγράφονται εκεί με τη μεταβολή της πίεσεως του αέρα σε συνάρτηση προς το χρόνο. Η καμπύλη (α) παριστάνει απλό ήχο, η (β) σύνθετο, η (γ) θόρυβο και η (δ) κρότο.



**Σχήμα 1-1: Είδη ήχων (α) απλός, (β) σύνθετος, (γ) θόρυβος, (δ) κρότος.**

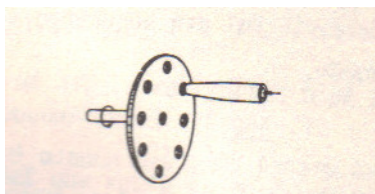
Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός απλού ήχου είναι η συχνότητα και το πλάτος του, ενώ ενός σύνθετου ήχου είναι η συχνότητα και το πλάτος καθενός από τους αρμονικούς του. Τα παραπάνω γνωρίσματα χαρακτηρίζουν τον ήχο σαν κύμα και ονομάζονται **αντικειμενικά γνωρίσματα** του ήχου, που έχουν σχέση με το αισθητήριο της ακοής.



## 1-2. ΠΗΓΕΣ ΗΧΩΝ

Για την παραγωγή ήχων με γνωστές συχνότητες χρησιμοποιούμε διάφορα όργανα. Παρακάτω περιγράφουμε τα σπουδαιότερα από αυτά.

A) Σειρήνα: Ένας απλούστατος τύπος σειρήνας αποτελείται από ένα μεταλλικό κυκλικό δίσκο, που έχει στην περιφέρειά του τρύπες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους.

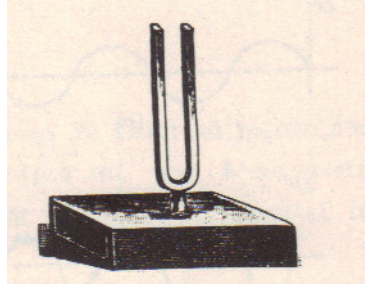


*Σχήμα 1-2: Σειρήνα*

Αν μπει σε περιστροφή ο δίσκος και διαβιβαστεί σε αυτόν αέρας με τη βοήθεια φυσητήρα, θα παραχθεί απλός ήχος που η συχνότητα του  $F$  θα είναι ανάλογη με τη συχνότητα περιστροφής του δίσκου  $\nu$  και τον αριθμό των τρυπών του  $\mu$ . Δηλαδή θα είναι :

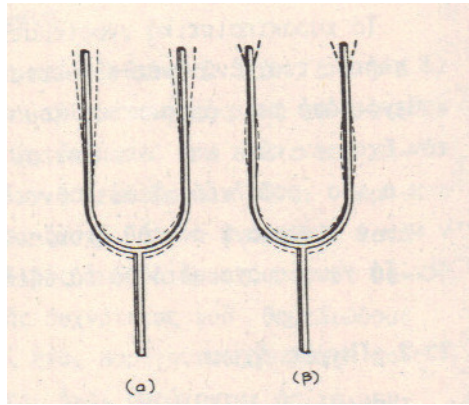
$$F = \nu * \mu$$

B) Διαπασών: Το διαπασών είναι μια χαλύβδινη ράβδος λυγισμένη σε σχήμα U (Σχήμα 1-3).



*Σχήμα 1-3: Διαπασών πάνω σε αντηχείο*

Τούτο αν διεγερθεί κατάλληλα, πάλλεται και σχηματίζει στάσιμα κύματα με κοιλίες στη καμπή και τα ελεύθερα άκρα του (Σχήμα 1-4).



*Σχήμα 1-4: Μορφές ταλαντώσεως ενός διαπασών σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Στην θεμελιώδη (α) και στη δεύτερη αρμονική (β).*

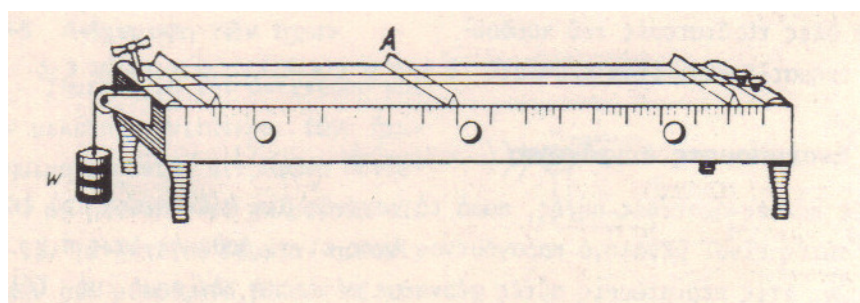
Τα διαπασών πάλλονται σχεδόν με μια αρμονική, για αυτό οι ήχοι που εκπέμπουν μπορούν να θεωρηθούν σαν απλοί ήχοι.

Η συχνότητα με την οποία πάλλεται ένα διαπασών εξαρτάται από τις διαστάσεις του, είναι δε αυτή τόσο μεγαλύτερη όσο βραχύτεροι και παχύτεροι είναι οι βραχίονές του.

Επειδή ο ήχος που παράγεται από τα διαπασών είναι ασθενής, για την ενίσχυσή του τα στηρίζουμε πάνω σε κιβώτια, που είναι

ανοιχτά κατά στο ένα μέρος (αντηχεία) και έχουν τέτοιες διαστάσεις, ώστε η στήλη του αέρα που περιέχεται μέσα σε αυτά να συντονίζεται στη συχνότητα του διαπασών.

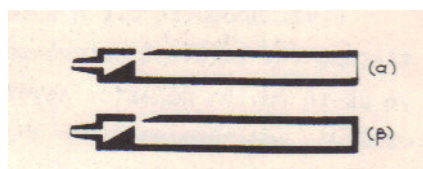
Γ) **Χορδές:** Στην ακουστική ονομάζεται χορδή ένα επίμηκες κυλινδρικό στερεό σώμα από κάποιο υλικό, που η διάμετρος του είναι πολύ μικρή σε σχέση προς το μήκος του και το οποίο δεν παρουσιάζει αντίσταση στην κάμψη του. Η χορδή είναι στερεωμένη στα δύο άκρα της και τεντωμένη μεταξύ τους. Οι χορδές που χρησιμοποιούνται στη μουσική είναι μεταλλικές ή ζωικής προελεύσεως. Οι χορδές διεγείρονται είτε με ελαφρό χτύπημα (πιάνο) είτε με προστριβή σε αυτές τοξαριού (βιολί). Οι χορδές, όταν στηρίζονται σε κατάλληλο ξύλινο κιβώτιο (Σχήμα 1-5), αποτελούν πηγές ήχων. Η συχνότητα που παράγει μια χορδή εξαρτάται από τα γεωμετρικά της στοιχεία, από το υλικό από το οποίο αποτελείται και από τη δύναμη που την τεντώνει.



Σχήμα1- 5: Χορδές

Δ) **Ηχητικοί σωλήνες:** Στην ακουστική ονομάζονται ηχητικοί σωλήνες κυλινδρικοί ηπρισματικοί σωλήνες από ξύλο ή μέταλλο, που είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλη διάταξη για τη διέργεση της αέριας στήλης που περιέχεται μέσα σε αυτούς. Οι ηχητικοί σωλήνες διακρίνονται σε **ανοιχτούς**, όταν και τα δύο τους άκρα τους συγκοινωνούν με την ατμόσφαιρα ( Σχήμα 1-6 α) και σε **κλειστούς** όταν το ένα τους μόνο άκρο συγκοινωνεί με την ατμόσφαιρα (Σχήμα 1-6 β).

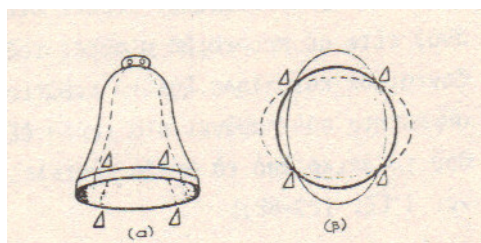
Οι ηχητικοί σωλήνες διεγείρονται ή με στόμιο και χείλος ή με γλωσσίδα.



Σχήμα 1-6: Ηχητικοί σωλήνες, ανοιχτοί (α) και κλειστοί (β).

Ε) **Κουδούνι:** Αυτό μπορεί να θεωρηθεί σαν κοίλη πλάκα άνισου πάχους και σχήματος περίπου κωνικού (Σχήμα 1-7 α). Όταν το κουδούνι διεγερθεί δημιουργούνται στάσιμα κύματα, έτσι ώστε αν θεωρήσουμε μια εγκάρσια διατομή, αυτή, ενώ αρχικά είναι κυλινδρική στην συνέχεια παίρνει σχήμα ελλείψεως. Στο σχήμα 1-7 β παριστάνονται στιγμιότυπα της ταλάντωσης της διατομής. Παρατηρούμε ότι οι δεσμοί των στάσιμων κυμάτων της διατομής αυτής δημιουργούνται σε τέσσερα σημεία Δ.

Επειδή τέτοιοι δεσμοί δημιουργούνται σε όλες τις διατομές του κουδουνιού, σχηματίζονται έτσι τέσσερις δεσμικές γραμμές.



Σχήμα 1-7: Κουδούνι (α) και ταλάντωση εγκάρσιας διατομής του (β)

### **1-3. ΕΚΠΕΜΠΟΥΣΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ**

Σε πολλές ηχητικές πηγές παρά το γεγονός ότι η ενέργεια που εκπέμπουν αυτές είναι μεγάλη ο παραγόμενος ήχος είναι ασθενής, όπως π.χ. στο διαπασών. Στις περιπτώσεις αυτές φέρνουμε σε επαφή την πηγή με ξύλινη σανίδα, οπότε τότε ο ήχος ακούγεται ισχυρότερος. Τούτο συμβαίνει γιατί η σανίδα μπαίνει σε εξαναγκασμένη ταλάντωση και λόγω της μεγάλης της επιφάνειας η ισχύς που εκπέμπει είναι μεγαλύτερη. Για τους ίδιους λόγους και η βελόνα του γραμμοφώνου συνδέεται με λεπτό διάφραγμα.

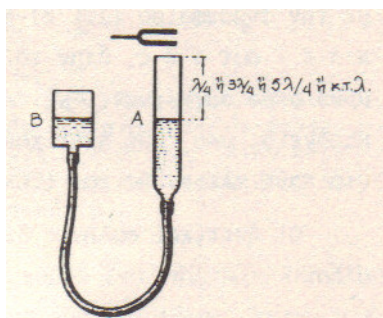
Είναι προφανές ότι η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη κατανάλωση της ενέργειας και επομένως η ηχητική πηγή με τη σανίδα πάλλεται λιγότερο χρόνο απ' ότι χωρίς αυτή.

### **1-4. ΑΝΤΗΧΕΙΑ**

Τα αντηχεία είναι κοιλότητες γεμάτες με αέρα, που χρησιμεύουν για την ενίσχυση των ήχων. Η λειτουργία των αντηχείων στηρίζεται στο φαινόμενο του συντονισμού. Αυτό το δείχνουμε με το ακόλουθο πείραμα: Έστω κατακόρυφος σωλήνας που περιέχει νερό (Σχήμα 1-8). Η στάθμη του νερού στον Α ανεβαίνει και κατεβαίνει ανάλογα με το ανεβοκατέβασμα ενός άλλου δοχείου Β, που συγκοινωνεί με το σωλήνα Α. Αν στο άνοιγμα του σωλήνα Α πλησιάσουμε ταλαντούμενο διαπασών και ανεβοκατεβάσουμε το δοχείο Β, θα παρατηρήσουμε ότι ο ήχος θα ακούγεται εντονότερα, όταν η

αέρια στήλη που σχηματίζεται μέσα στο σωλήνα A πάνω από την στάθμη του νερού πάλλεται σε συντονισμό με το διαπασών.

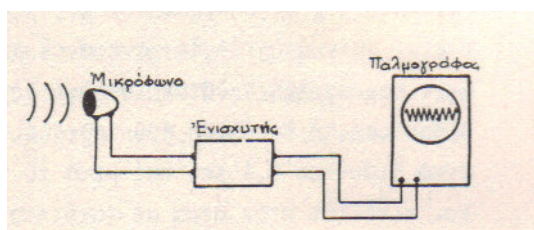
Τα αντηχεία που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των ήχων των διαφόρων μουσικών οργάνων παίρνουν τέτοιο σχήμα ώστε αυτά να συντονίζονται σε περισσότερες από μια συχνότητες.



**Σχήμα 1-8:** Συσκευή για την επίδειξη της αρχής λειτουργίας των αντηχείων

## 1-5. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΩΝ ΗΧΩΝ

Σήμερα για την ανίχνευση και την μελέτη των ήχων χρησιμοποιούνται μικρόφωνα συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό παλμογράφο (Σχήμα 1-9). Τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν στο μικρόφωνο, βάζουν σε ταλάντωση την πλάκα του και δημιουργούν έτσι αντίστοιχες ηλεκτρικές ταλαντώσεις. Οι ταλαντώσεις αυτές, αφού ενισχυθούν σε κατάλληλο ενισχυτή, μεταφέρονται σε παλμογράφο και δίνουν πάνω στην οθόνη του τη μορφή του ήχου.



Σχήμα 1-9: Ηλεκτρονική διάταξη για την ανίχνευση των ηχείων

## 1-6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΗΧΩΝ

Σκοπός της ανάλυσης ενός ήχου είναι ο προσδιορισμός των εντάσεων και των συχνοτήτων των αρμονικών που αποτελούν τον ήχο. Για αυτό το σκοπό παίρνουμε με τη βοήθεια μικροφώνου και παλμογράφου τη μορφή της καμπύλης του ήχου που εξετάζουμε και στη συνέχεια την αναλύουμε κατά Fourier. Σήμερα η ανάλυση του ήχου γίνεται συνήθως με ηλεκτρική μέθοδο. Κατ' αυτή ο ήχος πέφτει σ' ένα μικρόφωνο και δημιουργεί ένα μικροφωνικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό περνάει μέσα από κατάλληλα ηλεκτρικά φίλτρα, τα οποία επιτρέπουν να περάσουν ρεύματα ορισμένης μόνο συχνότητας. Έτσι γίνεται η ανάλυση του ήχου.

## 1-7. ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΥΣ ΗΧΟΥΣ

Οι ήχοι αποτελούν διαμήκη ελαστικά κύματα που διαδίδονται μέσα στον αέρα. Επομένως πρέπει στους ήχους αυτούς να παρατηρούνται όλα τα κυματικά φαινόμενα εκτός από το φαινόμενο της πλώσεως που όπως είναι γνωστό παρουσιάζεται μόνο στα εγκάρσια κύματα.

Α) Ανάκλαση του ήχου: Εφαρμογή της ανακλάσεως του ήχου έχουμε στο φαινόμενο της ηχούς και της μετηγήσεως. Αν



παρατηρητής βρίσκεται μπροστά σε μεγάλη επιφάνεια και παράγει ήχο μικρής διάρκειας, είναι φανερό ότι ο παρατηρητής εκτός από τον απευθείας ήχο θα ακούσει και τον ήχο που προέρχεται από την ανάκλαση στη θεωρούμενη επιφάνεια. Ο ήχος αυτός λέγεται ηχώ. Ο παρατηρητής για να ακούσει την ηχώ του πρέπει να βρίσκεται πριν την επιφάνεια σε απόσταση μεγαλύτερη από 17 m. Αυτό εξηγείται ως εξής: Όταν το αυτί δέχεται έναν εξωτερικό ερεθισμό μικρής διάρκειας η εντύπωση που προκαλείται στον εγκέφαλο παραμένει επί χρονικό διάστημα 0,1 sec και μετά το τέλος του ερεθισμού. Ξέρουμε ότι ο ήχος κινείται στον αέρα με ταχύτητα 340 m/sec. Επομένως για να ακούσει ο παρατηρητής ξεχωριστά τους δύο ήχους, τον απευθείας και τον μετά από ανάκλαση, πρέπει αυτοί να φτάσουν στον παρατηρητή με διαφορά χρόνου τουλάχιστον ίση με 0,1 sec. Άρα ο ήχος που προέρχεται από την ανάκλαση πρέπει να διανύσει συνολική διαδρομή τουλάχιστον 34m μέχρις ότου φτάσει στον παρατηρητή. Δηλαδή η απόσταση παρατηρητή – επιφάνειας πρέπει να είναι τουλάχιστον 17m. Αν η απόσταση παρατηρητή – επιφάνειας είναι μικρότερη από 17m, τότε ο παρατηρητής ακούει τον ήχο που προέρχεται από την ανάκλαση πριν εξαφανιστεί ο απευθείας. Έτσι ο ήχος που προέρχεται από την ανάκλαση εμφανίζεται σαν συνέχεια του απευθείας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μετήχηση.

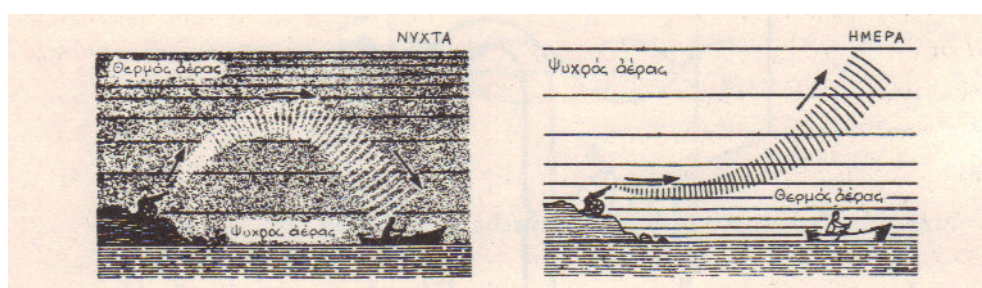
Μέσα σε κλειστούς χώρους που περιορίζονται από μεγάλες επιφάνειες παρατηρείται πολλαπλή ανάκλαση του ήχου, με αποτέλεσμα ένας ήχος μικρής διάρκειας να ακούγεται επί μεγάλο χρονικό διάστημα ( πολλαπλή ηχώ). Το φαινόμενο αυτό είναι βλαβερό για την καλή ακουστική των αιθουσών. Για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού στις αίθουσες συναυλιών προσέχεται, ώστε να μην εμφανίζονται παράλληλες επιφάνειες μέσα σε αυτές, το δε εσωτερικό τους να καλύπτεται με υλικό που να απορροφά τον ήχο. Ισχυρή απορρόφηση του ήχου σε μια



αίθουσα προκαλούν τα παραπετάσματα, τα χαλιά, το πλήθος μαζεμένων ανθρώπων, τα συμπαγή έπιπλα κ.λ.π.

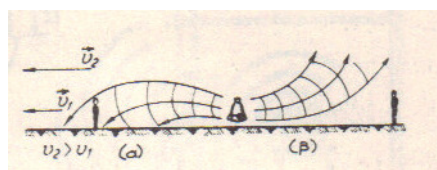
Β) Διάθλαση του ήχου: Όταν ηχητικό κύμα προσπέσει πλάγια πάνω σε μια οριική επιφάνεια που διαχωρίζει δυο μέσα, στα οποία ο ήχος έχει διαφορετική ταχύτητα εμφανίζεται το φαινόμενο της διαθλάσεως. Δηλαδή το ηχητικό κύμα κατά ένα μέρος ανακλάται και κατά ένα άλλο διαθλάται, σύμφωνα με τους νόμους της διαθλάσεως.

Εφαρμογή των φαινομένων της διαθλάσεως και ολικής ανακλάσεως έχουμε στις παρατηρούμενες ζώνες σιγής. Κατά την νύχτα ο ήχος λόγω διαθλάσεως και ολικής ανακλάσεως του πάνω στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, που είναι θερμότερα ( μεγαλύτερη ταχύτητα του ήχου) από τα κατώτερα της (μικρότερη ταχύτητα του ήχου), γίνεται αντιληπτός σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (Σχήμα 1-10 α) γεγονός που δεν αναμενόταν, ενώ στον ενδιάμεσο χώρο δημιουργούνται περιοχές σιγής (ζώνες σιγής). Αντίθετα φαινόμενα προς τα παραπάνω παρατηρούνται κατά την ημέρα (Σχήμα 1-10 β). Στην περίπτωση αυτή ο ήχος δεν ακούγεται από έναν παρατηρητή που βρίσκεται σε μεγάλη σχετικά απόσταση από την πηγή, γιατί διαθλάται προς τα πάνω.



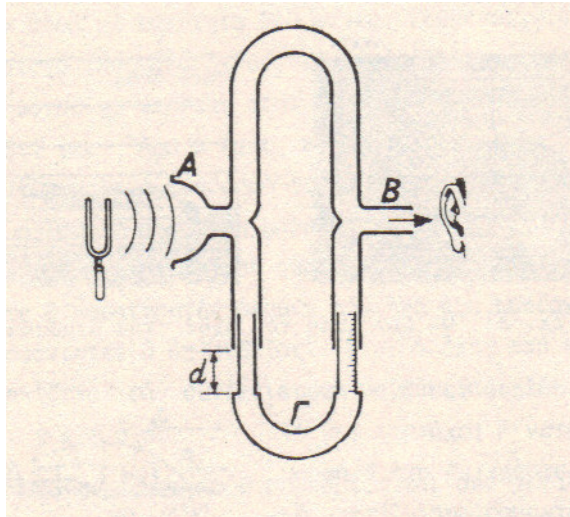
**Σχήμα 1-10: Διάθλαση του ήχου στην ατμόσφαιρα**

Επίσης διάθλαση του ήχου παρατηρείται και όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι διαφορετική στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας. Έτσι όταν ο ήχος διαδίδεται κατά τη φορά του ανέμου γίνεται αντιληπτός σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή (Σχήμα 1-11 α), ενώ όταν διαδίδεται αντίθετα από τη φορά του ανέμου διαθλάται προς τα πάνω (Σχήμα 1-11 β).



**Σχήμα 1-11:** Ανάλογα με την ταχύτητα του ήχου, σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου ο ήχος διαδίδεται σε μεγάλη απόσταση (α) ή προς τα πάνω (β)

Γ) **Συμβολή των ήχων:** Το φαινόμενο της συμβολής δυο ήχων μπορούμε να το μελετήσουμε με τη συσκευή του Σχήματος 1-12. Μπροστά από τη χοάνη Α παράγουμε ήχο π.χ. διαπασών. Ο ήχος αυτός μπαίνει μέσα στη συσκευή, διχάζεται και ακολουθεί τους δυο δρόμους της. Προφανώς οι δυο αυτοί ήχοι ξεκινάνε από την χοάνη με την ίδια φάση (σύμφωνα κύματα) και αφού συναντηθούν στον σωλήνα Β συμβάλλουν. Αν οι δυο δρόμοι που ακολουθούν οι δυο ήχοι είναι ίσοι, αυτοί θα συμβάλλουν με την ίδια φάση οπότε στο σωλήνα Β θα ακούσουμε ισχυρό ήχο (ενίσχυση). Αν τώρα αυξήσουμε το δρόμο του ενός ήχου μετακινώντας τον μεταθετό σωλήνα Γ κατά  $d$ , οπότε ο αντίστοιχος δρόμος αυξάνεται κατά  $2d$ , οι δυο ήχοι θα συμβάλουν με διαφορά φάσεως και έτσι θα ακούσουμε ασθενή ήχο (απόσβεση).

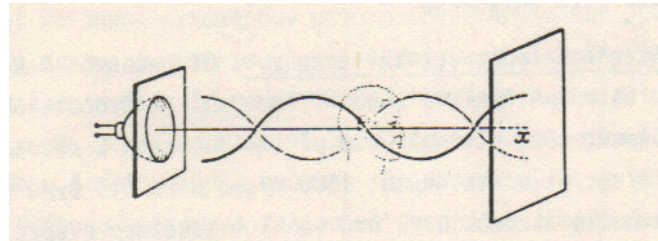


*Σχήμα 1-12: Συσκευή για την επίδειξη του φαινομένου της συμβολής των ήχων*

Δ) **Διακροτήματα:** Ένα από τα αποτελέσματα της συμβολής των ήχων είναι και τα διακροτήματα. Αυτά παράγονται όταν οι συμβαλλόμενοι ήχοι προέρχονται από δυο πηγές (π.χ. διαπασών), που οι συχνότητες τους διαφέρουν λίγο μεταξύ τους. Στα διακροτήματα ο ήχος που ακούμε έχει περίπου την ίδια συχνότητα με την συχνότητα των ήχων που συμβάλλουν, ενώ η ένταση του αλλάζει περιοδικά με το χρόνο. Διακροτήματα παρατηρούμε όταν δυο αυτοκίνητα κινούνται παράλληλα και με την ίδια περίπου ταχύτητα: Από την συμβολή των ήχων που προέρχονται από τις εκρήξεις των κινητήρων προκαλούνται σαφή διακροτήματα.

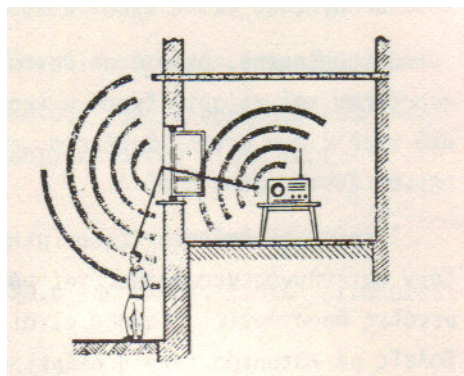
Ε) **Στάσιμα ηχητικά κύματα:** Αυτά δημιουργούνται από τη συμβολή δυο ήχων που έχουν την ίδια διεύθυνση και αντίθετη φορά. Στάσιμα κύματα μπορούμε να παρατηρήσουμε με τη διάταξη του Σχήματος 1-13. Μπροστά από την ηχητική πηγή και σε απόσταση μερικών μέτρων από αυτή είναι τοποθετημένη ανακλώσα επιφάνεια. Ο ήχος που εκπέμπεται από την πηγή συμβάλλει με τον προερχόμενο από την ανάκλαση και έτσι σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Μετακινώντας το αυτί μας κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τη πηγή με την επιφάνεια,

θα παρατηρήσουμε ότι σε άλλες θέσεις ο ήχος ακούγεται εντονότερος (κοιλίες του στασίμου), ενώ σε άλλες δεν ακούγεται καθόλου (δεσμοί του στασίμου).



*Σχήμα 1-13: Στάσιμα ηχητικά κύματα. Στους δεν έχουμε ήχο*

ΣΤ) **Περίθλαση των ήχων**: Το φαινόμενο της περιθλάσεως των κυμάτων γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό στα ηχητικά κύματα, γιατί λόγω του μεγάλου τους μήκους κύματος (από 0,3m μέχρι 3m), δεν απαιτούνται πολύ μικρά ανοίγματα. Έτσι περίθλαση του ήχου παρουσιάζεται στις πόρτες, τα παράθυρα κ.λ.π. (Σχήμα 1-14).



*Σχήμα 1-14: Περίθλαση των ήχων*

Ζ) **Φαινόμενο Doppler στους ήχους**: Λόγω του φαινομένου Doppler όταν μια ηχητική πηγή μετακινείται ως προς έναν παρατηρητή αυτός αντιλαμβάνεται ήχο μεγαλύτερης ή μικρότερης συχνότητας, ανάλογα με το αν η πηγή πλησιάζει ή απομακρύνεται από αυτόν. Π.χ. Όταν ταξιδεύουμε με

αυτοκίνητο και συναντάμε άλλο αυτοκίνητο, που σφυρίζει, ο ήχος που ακούμε παρουσιάζει συνεχή αύξηση της συχνότητας όταν τα αυτοκίνητα πλησιάζουν. Το αντίθετο συμβαίνει όταν τα αυτοκίνητα απομακρύνονται.

## 1-8. ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Η συχνότητα των ήχων που μπορούμε να ακούσουμε περιέχεται μεταξύ των 16Hz και των 20000Hz. Οι ήχοι που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από 20000Hz λέγονται υπέρηχοι και δεν γίνονται αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί. Η περιοχή των υπερέχων εκτείνεται από  $2 \times 10^4$  Hz μέχρι  $5 \times 10^8$  Hz.

**Παραγωγή των υπερέχων:** Υπέρηχοι μπορούν να παραχθούν κατ' αρχή με τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων μέσα σε ράβδους ή ηχητικούς σωλήνες κατάλληλων διαστάσεων. Σήμερα οι συσκευές παραγωγής υπερέχων στηρίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

**Ιδιότητες και εφαρμογές των υπερέχων:** Οι υπέρηχοι διαδίδονται μέσα στα διάφορα υλικά με ηχητικά κύματα όπως και οι ακουστικοί ήχοι. Η ταχύτητα διαδόσεώς τους είναι η ίδια με την ταχύτητα διαδόσεως του ήχου, δηλαδή 340m/sec μέσα στα αέρια, 1500m/sec μέσα στα υγρά και πολύ μεγαλύτερη μέσα στα στερεά. Π.χ. στο γυαλί η ταχύτητα ανέρχεται στα 4000m/sec ενώ στα μέταλλα στα 5000m/sec.

Τα υπερηχητικά κύματα σε αντίθεση με τα ηχητικά μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας, γιατί έχουν πολύ ψηλή συχνότητα.

Οι υπέρηχοι όταν διαδίδονται μέσα στον αέρα παθαίνουν μεγάλη απορρόφηση και γι' αυτό έχουν μικρή εμβέλεια. Αντίθετα στα υγρά και κυρίως στο νερό έχουν μεγάλη εμβέλεια,

γι' αυτό και οι πρακτικές τους εφαρμογές περιορίζονται μέσα σε αυτά.

Επειδή οι υπέρηχοι έχουν μικρό μήκος κύματος μπορούν να σχηματίζουν κατευθυνόμενες δέσμες και να μεταφέρουν έτσι ηχητική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης είναι δυνατό να κατασκευαστούν ηχητικοί προβολείς με κάτοπτρα που η διάμετρος τους να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος μόνο για υπερήχους. Τέτοιου είδους προβολείς υπερήχων χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό διάφορων αντικειμένων μέσα στη θάλασσα (π.χ. υποβρυχίων, υφάλων, σμήνους ιχθύων κ.α.).

Έξαλλου οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται για τη βυθομέτρηση. Για το σκοπό αυτό εκπέμπεται μέσα στη θάλασσα κατακόρυφα προς τα κάτω υπέρηχος μικρής διάρκειας με ηχοβολιστικό μηχάνημα. Ο υπέρηχος αυτός ανακλάται πάνω στον πυθμένα και επιστρέφει. Από τη μέτρηση του χρόνου της διαδρομής του υπερήχου ( μετάβαση και επιστροφή) και τη γνωστή ταχύτητά του μέσα στο νερό της θάλασσας προσδιορίζουμε το βάθος της.

Όταν οι υπέρηχοι, όπως και οι ήχοι, προσπέσουν πάνω σε μια επιφάνεια που διαχωρίζει δυο υλικά κατά ένα μέρος ανακλώνται και κατά το υπόλοιπο διαθλώνται. Ειδικά όταν ο υπέρηχος πηγαίνει από το νερό στον αέρα ανακλάται κατά 100%. Το φαινόμενο αυτό έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία στασίμων κυμάτων μέσα στα υγρά και στη συνέχεια την αναταραχή τους. Εξαιτίας αυτού μπορούμε να δημιουργήσουμε γαλακτώματα δυο ή περισσότερων υγρών που κάτω από κανονικές συνθήκες ήταν αδύνατο να συμβεί αυτό ( π.χ. γαλάκτωμα λαδιού και νερού).



Επειδή οι υπέρηχοι μεταφέρουν μεγάλη ισχύ προκαλούν μέσα σε μικρό χώρο σημαντικά μηχανικά, θερμικά, χημικά και βιολογικά αποτελέσματα. Έτσι, αν με κατάλληλη διάταξη συγκεντρωθεί η ενέργεια που μεταφέρεται από τους υπέρηχους, αυτοί μπορούν να προκαλέσουν το σπάσιμο γυάλινων σωλήνων και ράβδων ή πολύ μεγάλη ανύψωση της θερμοκρασίας. Εξάλλου αν προσβάλλουμε διάλυμα ιωδιούχου καλίου με υπέρηχους, ελευθερώνεται ιώδιο.

Επίσης αραιό διάλυμα αιμοσφαιρίων μέσα σε ισοτονικό διάλυμα παθαίνει αιμόλυση με την επίδραση υπερήχων.

Τελευταία η βιομηχανία χρησιμοποιεί υπερήχους στον αυτοματισμό. Στην επιστήμη χρησιμοποιούνται στάσιμα κύματα σαν οπτικά φράγματα. Βρέθηκε ότι οι νυχτερίδες χρησιμοποιούν τους υπερήχους που εκπέμπουν για να εντοπίζουν τα διάφορα εμπόδια κατά την πτήση τους.

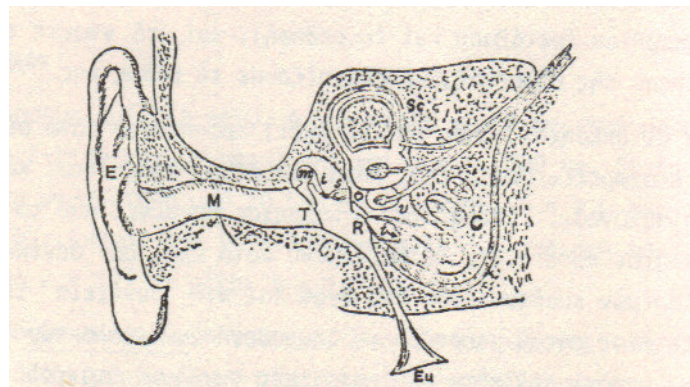
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2-1. ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΥΤΙ

Το όργανο αυτό αποτελεί το αισθητήριο της ακοής γιατί μετατρέπει τους ήχους στο αντίστοιχο αίσθημα.

Το αυτί αποτελείται από τρία μέρη: το έξω αυτί, το μεσαίο αυτί και το μέσα αυτί.

Το έξω αυτί αποτελείται από την κόγχη Ε (Σχήμα 2-1) και τον ακουστικό πόρο Μ. Αυτός είναι κυλινδρικός σωλήνας που φράζεται με το τύμπανο Τ, το οποίο είναι μεμβράνη σχεδόν κυκλική που χωρίζει το έξω αυτί από το μεσαίο.



*Σχήμα 2-1: Το ανθρώπινο αυτί*

Το μεσαίο αυτί είναι κοιλότητα γεμάτη αέρα που χωρίζεται από μεν το έξω αυτί με τύμπανο, από δε το μέσα με μεμβράνες οι οποίες κλείνουν δυο θυρίδες, την στρογγυλή θυρίδα R και την ωοειδή θυρίδα ο. Το μεσαίο αυτί συγκοινωνεί με τη κοιλότητα του στόματος μέσω της ευσταχιανής σάλπιγγας Eu, έτσι ώστε η πίεση από τη μια μεριά του τύμπανου και από την άλλη να είναι η ίδια. Στο μεσαίο αυτί βρίσκονται και τα τρία ακουστικά οστά η σφύρα m, ο άκμονας i και ο αναβολέας s.



Το μέσα αυτί αποτελείται από τον οστέϊνο λαβύρινθο και τον μεμβρανώδη λαβύρινθο που καλύπτει εσωτερικά τον πρώτο. Ο λαβύρινθος περιλαμβάνει την αίθουσα u, τους τρεις ημικύκλιους σωλήνες Sc και τον κοχλία c. Το μέρος του μέσα αυτιού που ενδιαφέρει την ακοή είναι ο κοχλίας. Αυτός είναι σωλήνας τυλιγμένος σε σχήμα κοχλίου είναι γεμάτος με υγρό (λεμφικό υγρό) και χωρίζεται κατά μήκος σε δυο μέρη με το βασικό υμένα, σχεδόν μέχρι το τέλος του. Στο σημείο αυτό αφήνεται άνοιγμα με το οποίο εξισώνεται η πίεση του αέρα στα δυο μισά του σωλήνα. Το πλάτος του βασικού υμένα είναι μικρό κοντά στο μέσα αυτί και προχωρεί αυξανόμενο κατά μήκος του σωλήνα. Πάνω στον υμένα αυτό βρίσκεται απλωμένο το όργανο του Corti, στο οποίο καταλήγουν οι ίνες των ακουστικών νεύρων. Το όργανο του Corti καταλαμβάνει έκταση 30mm μήκους επί 0,3mm πλάτους.

### ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΥΤΙΟΥ

Όλες οι θεωρίες που προτάθηκαν κατά καιρούς για την εξήγηση της λειτουργίας του αυτιού στηρίζονται στην παρατήρηση ότι το αίσθημα δοσμένης συχνότητας ήχου είναι συνυφασμένο με ορισμένη περιοχή του κοχλίου καθόσον η καταστροφή ενός μέρους του έχει σαν αποτέλεσμα την κουφότητα για ορισμένες μόνο συχνότητες.

Ο ήχος διαδίδεται στο έξω αυτί με τον αέρα για το σκοπό αυτό βοηθάει η κόγχη, στο μεσαίο με τα οστά και στο μέσα με το υγρό με το οποίο είναι γεμάτο. Κατά ένα μικρό ποσοστό ο ήχος διαδίδεται στο μέσα αυτί και απ' ευθείας με τα οστά της κεφαλής. Οι μεταβολές της πίεσεως του αέρα βάζουν το τύμπανο σε ταλαντώσεις που διαδίδονται με τα οστά και την ωοειδή θυρίδα στο λεμφικό υγρό του μέσα αυτιού. Οι

ταλαντώσεις αυτές βάζουν σε εξαναγκασμένη ταλάντωση και τον βασικό υμένα που πάλλεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε συχνότητα να αντιστοιχεί διαφορετική περιοχή έντονης ταλαντώσεώς του. Η περιοχή του υμένα που πάλλεται με μεγάλο πλάτος διεγείρει μόνο τα κύτταρα του οργάνου του Corti, που βρίσκονται σ' αυτή. Από το σύνολο δηλαδή των νευρικών απολήξεων διεγείρονται μόνο εκείνες που βρίσκονται πάνω στη διεγειρόμενη περιοχή. Έτσι διαβιβάζονται τα αντίστοιχα ερεθίσματα στον εγκέφαλο και προκαλείται το υποκειμενικό αίσθημα του ήχου, που έχει σχέση με την συχνότητά του.

## 2-2. ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΧΩΝ

Εδώ θα ασχοληθούμε με τα γνωρίσματα εκείνα τα οποία χαρακτηρίζουν τα αισθήματα που μας προκαλούνται από τους διάφορους ήχους. Τα γνωρίσματα αυτά ονομάζονται υποκειμενικά γνωρίσματα του ήχου και είναι το ύψος, η ακουστότητα και η χροιά.

A) Ύψος του ήχου: Η έννοια του ύψους είναι εμπειρική και δεν μπορεί να οριστεί με άλλες έννοιες. Είναι ένα υποκειμενικό γνώρισμα εξαιτίας του οποίου μπορούμε να διακρίνουμε ένα βαρύ ήχο από έναν οξύ. Το ύψος του ήχου εξαρτάται από τη συχνότητα του ηχητικού κύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του ηχητικού κύματος, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ύψος του αντίστοιχου ήχου, δηλαδή τόσο οξύτερος είναι αυτός. Εξαιτίας αυτού αντί του όρου “ύψος” του ήχου χρησιμοποιείται συχνά ο όρος “συχνότητα” του ήχου.

Είναι γνωστό ότι σ' ένα μέσο η συχνότητα (δηλαδή το ύψος) ενός ήχου είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητά του. Έτσι π.χ. οι μουσικοί ήχοι που προέρχονται από μια συναυλία, η οποία εκτελείται μακριά ακούγονται με την ίδια σχέση μεταξύ τους σαν η συναυλία να γινόταν σε πολύ μικρή απόσταση. Επίσης στην αρμονία δεν υπάρχει σύγχυση των ήχων γεγονός που θα έπρεπε να συμβαίνει, αν οι ήχοι μεγάλου ύψους διαδίδονταν ταχύτερα από τους ήχους μικρού ύψους.

Η ελάχιστη διαφορά συχνοτήτων  $\Delta f$  που πρέπει να έχουν δυο ήχοι της ίδιας εντάσεως, για να μπορούν να διακριθούν, όταν ακούγονται διαδοχικά, δίνεται από

$$\Delta f/f = 0,003 \text{ (εξίσωση 2-1)}$$

Η σχέση αυτή βρέθηκε πειραματικά και ισχύει για μια περιοχή συχνοτήτων 500 Hz – 4000 Hz.

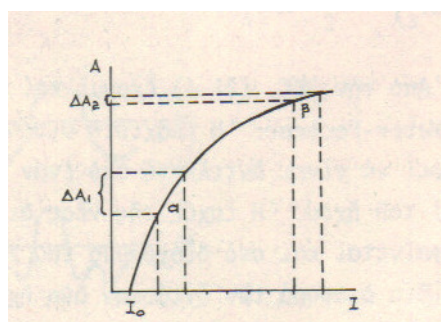
Όσο αφορά την ελάχιστη χρονική διάρκεια ενός ήχου που είναι αναγκαία για να διαμορφωθεί το αίσθημα του ύψους βρέθηκε ότι αρκούν 5 μέχρι 10 περίοδοι για να διαμορφωθεί τέλεια.

**B) Ακουστότητα του ήχου:** Δυο απλοί ήχοι της ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικής εντάσεως προκαλούν σ' εμάς την εντύπωση δυο ήχων του ίδιου ύψους, αλλά διαφορετικής ακουστότητας. Η ακουστότητα είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα που καθορίζει την ένταση του υποκειμενικού αισθήματος.

Με πειραματικές παρατηρήσεις βρέθηκε ότι η ακουστότητα που προκαλεί ένας ήχος ορισμένης συχνότητας σ' ένα παρατηρητή εξαρτάται από την ένταση του ήχου. Η σχέση μεταξύ της ακουστότητας ενός ήχου και της εντάσεως του καθορίζεται από τον ψυχοφυσικό νόμο των Weber- Fechner, που συνδέει γενικά

την ένταση ενός υποκειμενικού αισθήματος με την ένταση του αντίστοιχου ερεθίσματος. Ο νόμος αυτός στην προκειμένη περίπτωση διατυπώνεται ως εξής: Η ακουστότητα ενός ήχου είναι ανάλογη με το λογάριθμο της εντάσεως του. Δηλαδή ισχύει  $A = C \log I$ , (εξίσωση 2-2) όπου  $A$  είναι η ακουστότητα του ήχου,  $I$  η ένταση του και  $C$  μια σταθερή που εξαρτάται από την ιδιοσυγκρασία του παρατηρητή και τη συχνότητα του ήχου.

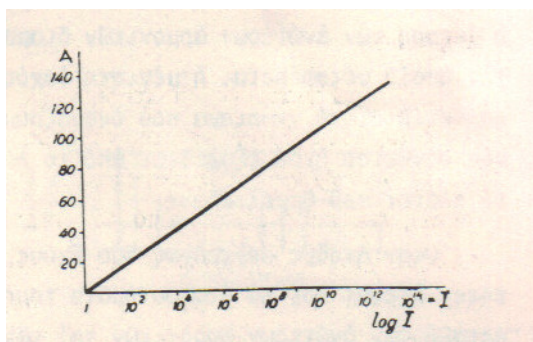
Το σχήμα 2-2 δίνει γραφικά την εξίσωση 2-2. Το  $I_0$  στο διάγραμμα λέγεται **κατώφλι ακουστότητας** και παριστάνει την ελάχιστη τιμή της εντάσεως ενός ήχου ορισμένης συχνότητας που μπορούμε να ακούσουμε.



*Σχήμα 2-2*

Το αυτί του ανθρώπου ακούει εξίσου καλά ήχους μικρής ή μεγάλης εντάσεως που οι τιμές τους μπορεί να διαφέρουν κατά  $10^{13}$  φορές. Είναι λοιπόν φανερό ότι για τη γραφική παράσταση τόσο μεγάλης περιοχής εντάσεων και ακουστότητων δεν είναι κατάλληλο πια το σχήμα που χρησιμοποιήσαμε οποιαδήποτε κλίμακα εντάσεων και αν διαλέξουμε. Γι' αυτό στις περιπτώσεις αυτές που απαιτείται να περιληφθεί μεγάλη περιοχή τιμών σε περιορισμένο μήκος άξονα χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στην οποία οι διαδοχικές δυνάμεις του 10 βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Τέτοια κλίμακα χρησιμοποιούμε για να σχηματίσουμε το διάγραμμα του

Σχήματος 2-3. Σ' αυτό, στον άξονα των τετμημένων παίρνουμε μήκη ανάλογα με το  $\log I$ , ενώ στον άξονα των τεταγμένων μήκη ανάλογα με την ακουστότητα. Επειδή η σχέση που συνδέει το  $A$  και το  $\log I$  είναι πρώτου βαθμού, θα προκύψει στο διάγραμμα αυτό ευθεία γραμμή. Έτσι παρατηρούμε ότι με τη χρήση της λογαριθμικής κλίμακας μπορούμε να περιλάβουμε στον άξονα των εντάσεων την μέγιστη περιοχή των εντάσεων που εκτείνεται από τους μόλις ακουστούς ήχους μέχρι τους ισχυρότατους.



Σχήμα 2-3

Από την εξίσωση 2-2 έχουμε  $dA = C dI / I$

Αν ονομάσουμε  $\Delta A_{\varepsilon\lambda}$  την ελάχιστη διαφορά δυο ακουστοτήτων που μπορούμε να καταλάβουμε για ήχους οποιασδήποτε εντάσεως, η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$\Delta I_{\varepsilon\lambda} = 1/C \Delta A_{\varepsilon\lambda} I \quad (\text{εξίσωση 2-3})$$

Από την εξίσωση 2-3 έχουμε και την ακόλουθη διατύπωση του νόμου των Weber – Fechner : Η ελάχιστη διαφορά  $\Delta I_{\varepsilon\lambda}$  των εντάσεων δυο ήχων που μπορεί να γίνει αντιληπτή από έναν παρατηρητή είναι ανάλογη με την ένταση  $I$  του ήχου. Η ισχύς της νέας διατυπώσεως του νόμου Weber – Fechner φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 2-2. Σε αυτό παρατηρούμε ότι για

την ίδια διαφορά των εντάσεων δυο ήχων στη μεν περιοχή α της καμπύλης προκαλείται διαφορά ακουστότητας  $\Delta A_1$  στη δε περιοχή β, δηλαδή σε ήχους μεγαλύτερης εντάσεως προκαλείται διαφορά ακουστότητας  $\Delta A_2$ , μικρότερη από την  $\Delta A_1$ .

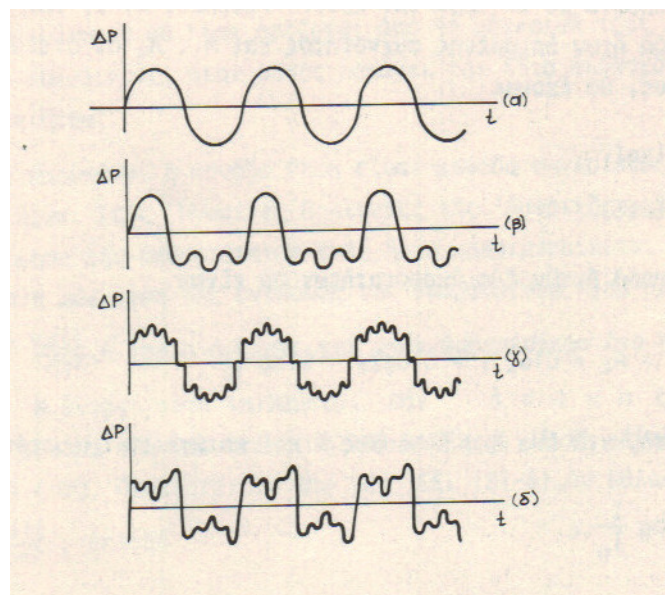
Γ) Χροιά του ήχου: Δυο ήχοι που μας προκαλούν το ίδιο αίσθημα του ύψους και την ίδια ακουστότητα, αλλά προερχόμενοι από διαφορετικά μουσικά όργανα προκαλούν διαφορετικά αισθήματα από τα οποία είναι δυνατό να κρίνουμε για το όργανο από το οποίο προέρχονται οι δυο αυτοί ήχοι. Το υποκειμενικό αυτό γνώρισμα του ήχου που μας επιτρέπει να διακρίνουμε μεταξύ τους δυο ήχους του ίδιου ύψους και της ίδιας ακουστότητας προερχόμενους όμως από διαφορετικά όργανα ονομάζεται χροιά.

Ο Helmholtz( Χέλμολτς) απέδειξε ότι η χροιά ενός σύνθετου ήχου οφείλεται στην παρουσία ανωτέρων αρμονικών ήχων που παράγονται μαζί με τον θεμελιώδη. Όπως είναι γνωστό κάθε σύνθετος ήχος αποτελείται από τη θεμελιώδη συχνότητα και τις ανώτερες αρμονικές του. Το πλήθος, η τάξη και η ένταση των ανωτέρων αρμονικών διαμορφώνουν τη θεμελιώδη συχνότητα με την οποία μεταφέρεται η μέγιστη ισχύς του ήχου και προσδίδουν σε αυτόν το χαρακτηριστικό γνώρισμα που ονομάζουμε χροιά. Βρέθηκε δε ότι η χροιά ενός σύνθετου ήχου εξαρτάται από το λόγο του πλάτους κάθε αρμονικού προς το πλάτος του θεμελιώδους.

Όταν ακούμε συγχρόνως δυο ήχους εκτός από τις θεμελιώδεις συχνότητες ακούμε και τα διακροτήματα τους, όπως επίσης και τα διακροτήματα μεταξύ των ανώτερων αρμονικών και των θεμελιωδών. Για να είναι το συναίσθημα ευχάριστο, για να έχουμε, δηλαδή αρμονία πρέπει να υπάρχει συμφωνία μεταξύ

των ήχων δηλαδή να συμπίπτουν όσο το δυνατό περισσότεροι από τους αρμονικούς.

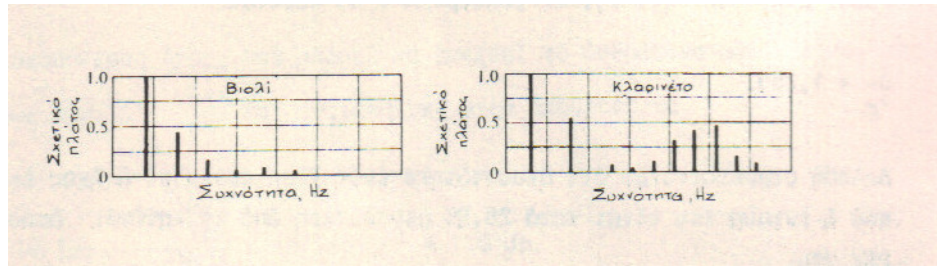
Στο Σχήμα 2-4 έχουμε τη μορφή του ήχου διαφόρων μουσικών οργάνων: α) διαπασών, β) φλάουτο, γ) βιολί και δ) κλαρινέτο. Παρατηρούμε ότι ο ήχος κάθε πηγής έχει δική του χροιά, που οφείλεται στην παρουσία αρμονικών συχνοτήτων, οι οποίες παράγονται συγχρόνως με το θεμελιώδη.



**Σχήμα 2-4: Ήχοι που προέρχονται από διάφορα όργανα: α) διαπασών, β) φλάουτο, γ) βιολί και δ) κλαρινέτο**

Στο σχήμα 2-5 παριστάνονται τα φάσματα συχνοτήτων ήχων, που προέρχονται αντίστοιχα από α) βιολί και β) κλαρινέτο. Σε αυτά φαίνεται η ύπαρξη των αρμονικών και το πλάτος τους.





Σχήμα 2-5: Φάσμα συχνοτήτων του ήχου του βιολιού και του κλαρινέτου

### 2-3. ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΚΟΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με το νόμο των Weber – Fechner, αν  $I_1$  και  $I_2$  είναι οι εντάσεις δυο ήχων ορισμένης συχνότητας και  $A_1$ ,  $A_2$  οι αντίστοιχες ακουστότητες τους θα έχουμε:

$$A_1 = C \log I_1$$

$$A_2 = C \log I_2$$

Η διαφορά  $A$  των δυο ακουστότητων θα είναι:

$$A = A_1 - A_2 = C \log I_1 - C \log I_2 = C \log I_1/I_2 \quad (\text{εξίσωση 2-4})$$

Από αυτή για ένα ήχο εντάσεως  $I$  και κατωφλίου ακουστότητας  $I_0$ , έχουμε:  $A = C \log I/I_0$ , (εξίσωση 2-5)

από την οποία αν βάλουμε  $C = 10$  και περιοριστούμε στον ήχο της πρότυπης συχνότητας δηλαδή των 1000Hz, ορίζουμε τη μονάδα της ακουστότητας που ονομάζουμε Phon. Δηλαδή ισχύει:

$$A(\text{σε Phon}) = 10 \log I/I_0 \quad (\text{εξίσωση 2-6})$$

Έτσι παρατηρούμε ότι ο ήχος των 1000Hz, που η ένταση του είναι δεκαπλάσια από την ένταση του κατωφλιού ακουστότητας, προκαλεί ακουστότητα 10 (Phon). Στην εξίσωση 2-6 αν βάλουμε  $A = 1$  θα πάρουμε



$$I/I_0 = 1,259$$

Δηλαδή συμπεραίνουμε ότι ακουστότητα ενός Phon προκαλεί ο ήχος εκείνος, που η ένταση του είναι κατά 25,9% μεγαλύτερη από το κατώφλι ακουστότητας του.

Πειραματικά βρέθηκε ότι δυο ήχοι που οι ακουστότητές τους διαφέρουν κατά 1 Phon, μόλις είναι δυνατό να ακουστούν.

Ο ορισμός της μονάδας Phon που δόθηκε πιο πάνω ισχύει για την πρότυπη συχνότητα, δηλαδή την συχνότητα των 1000Hz. Για ήχους άλλων συχνοτήτων η ακουστότητα τους σε Phon ορίζεται από τη σύγκριση τους με τον ήχο της πρότυπης συχνότητας, όταν αυτός παράγει την ίδια ακουστότητα με τους θεωρημένους ήχους.

Όπως είδαμε παραπάνω, η μονάδα Phon είναι μονάδα συγκρίσεως των ακουστοτήτων δυο ήχων. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για την απόλυτη μέτρηση της ακουστότητας ενός ήχου χρησιμοποιείται μέθοδος που συνιστάται στη σύγκριση της εντάσεως του θεωρημένου ήχου προς την ένταση των  $10^{-16}$  Watt/cm<sup>2</sup>, η οποία αντιστοιχεί στον ασθενέστερο ήχο που μπορεί να ακουστεί. Η ένταση αυτή λαμβάνεται σαν ακουστική στάθμη. Η μονάδα της ακουστότητας που ορίζεται με τη μέθοδο αυτή είναι το decibel (db). Προκύπτει δε από την εξίσωση 2-4, αν βάλουμε  $C = 10$  και  $I_2 = 10^{-16}$  Watt/cm<sup>2</sup>. Δηλαδή:

$$A \text{ (σε db)} = 10 \log \frac{I_1}{10^{-16} \text{ Watt/cm}^2} \quad \text{(εξίσωση 2-7)}$$

Ο ισχυρότερος ήχος που μπορεί να ανεχθεί το ανθρώπινο αυτί, είναι της τάξεως των  $10^{-4} \text{ Watt/cm}^2$  και αντιστοιχεί στην ακουστότητα

$$A = 10 \log \frac{10^{-4} \text{ Watt/cm}^2}{10^{-16} \text{ Watt/cm}^2} = 10 \log 10^{12} = 120 \text{ db}$$

Επειδή για την πρότυπη συχνότητα (1000Hz), είναι  $I_0 = 10^{-16} \text{ Watt/cm}^2$ , από την σύγκριση των εξισώσεων 2-6 και 2-7 προκύπτει ότι για αυτή η τιμή της ακουστότητάς της σε Phon και db είναι η ίδια.

Στο πίνακα 2-1 δίνονται οι ακουστότητες ήχων, που προέρχονται από διάφορες πηγές.

Είδος ήχητικής πηγής	Ακουστότητα σε db
Όριο πόνου.....	120
Σιδηρόδρομος.....	90
Κεντρική αρτηρία πόλεως κατά τις μεσημβρινές ώρες.....	70
Συνήθης όμιλία.....	65
Ήσυχος δρόμος.....	30
Ψίθυρος φύλλων.....	10
Κατώφλι ακουστότητας.....	0

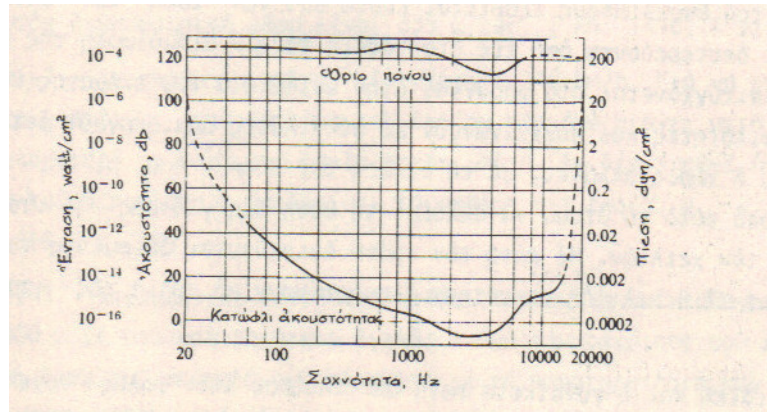
*Πίνακας 2-1*

## 2-4. ΟΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Είδαμε ότι για κάθε ήχο ορισμένης συχνότητας υπάρχει μια ελάχιστη τιμή εντάσεως, κάτω από την οποία ο θεωρούμενος

ήχος δεν είναι ακουστός. Την ελάχιστη αυτή τιμή της εντάσεως ονομάσαμε *κατώφλι ακουστότητας*. Επίσης για κάθε ήχο ορισμένης συχνότητας υπάρχει μια μέγιστη τιμή εντάσεως πάνω από την οποία ο θεωρούμενος ήχος πάλι δεν είναι ακουστός, γιατί προκαλεί πόνο. Τη μέγιστη αυτή τιμή της εντάσεως ονομάζουμε *όριο πόνου*. Έτσι για κάθε ήχο ορισμένης συχνότητας υπάρχει ένα άνοιγμα ακουστότητας, που εκτείνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής εντάσεως (*κατώφλι ακουστότητας*) και μιας μέγιστης τιμής εντάσεως (*όριο πόνου*) του θεωρούμενου ήχου. Η ένταση, τόσο στο κατώφλι ακουστότητας όσο και στο όριο πόνου, εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου.

Στο σχήμα 2-6 διακρίνουμε την καμπύλη του κατωφλιού ακουστότητας, δηλαδή την καμπύλη που ενώνει τα κατώφλια ακουστότητας των ήχων διαφόρων συχνοτήτων και την καμπύλη του ορίου πόνου, δηλαδή την καμπύλη που ενώνει τα όρια πόνου των ήχων διαφόρων συχνοτήτων. Οι δυο αυτές καμπύλες ενώνονται στα 16 Hz και στα 20000 Hz. Αυτό σημαίνει ότι οι ήχοι των συχνοτήτων αυτών μόλις γίνουν αντιληπτοί ταυτόχρονα προκαλούν και πόνο. Δηλαδή, ήχος που η συχνότητα του είναι μικρότερη από 16 Hz ή μεγαλύτερη από 20000 Hz, δεν γίνεται αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί. Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι οι δυο καμπύλες ορίου πόνου και ορίου ακουστότητας, περικλείουν μια περιοχή που τα σημεία της αντιστοιχούν σε ακουστούς ήχους και ονομάζεται ***ακουστή περιοχή***. Έξω από αυτή υπάρχει ***η μη ακουστή περιοχή ή περιοχή σιγής***, που τα σημεία της αντιστοιχούν σε μη ακουστούς ήχους.

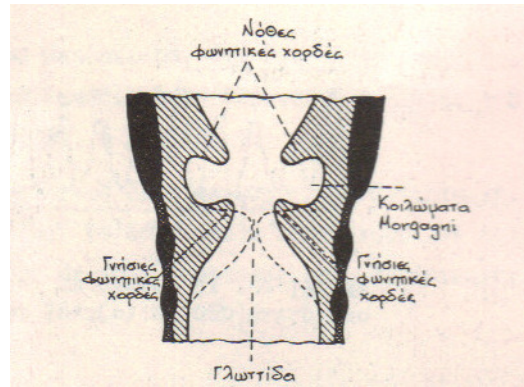


**Σχήμα 2-6:** Ακουστική επιφάνεια που περιλαμβάνεται μεταξύ της καμπύλης του κατώφλιού ακουστότητας και της καμπύλης του ορίου πόνου

Στο θεωρούμενο διάγραμμα ο οριζόντιος άξονας παριστάνει τις συχνότητες των διάφορων ήχων σε λογαριθμική κλίμακα. Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει τις εντάσεις των ήχων σε λογαριθμική κλίμακα ή τα αντίστοιχα πλάτη της μεταβολής της πίεσεως του αέρα ή τις ακουστότητες των ήχων σε db.

## 2-5. ΦΩΝΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

Το βασικό όργανο της φωνής είναι ο λάρυγγας. Αυτός έχει δυο ζεύγη από πτυχές που ονομάζονται φωνητικές χορδές ( Σχήμα 2-7). Από τις φωνητικές αυτές χορδές το κατώτερο ζεύγος παίζει τον κύριο ρόλο στην παραγωγή της φωνής και ονομάζονται γνήσιες φωνητικές χορδές, ενώ το ανώτερο ζεύγος ονομάζονται νόθες φωνητικές χορδές. Ανάμεσα στα δυο αυτά ζεύγη των φωνητικών χορδών σχηματίζονται κοιλότητες που ονομάζονται **κοιλώματα του Morgagni**. Οι γνήσιες φωνητικές χορδές αφήνουν μεταξύ τους σχισμή που ονομάζεται **γλωττίδα**.



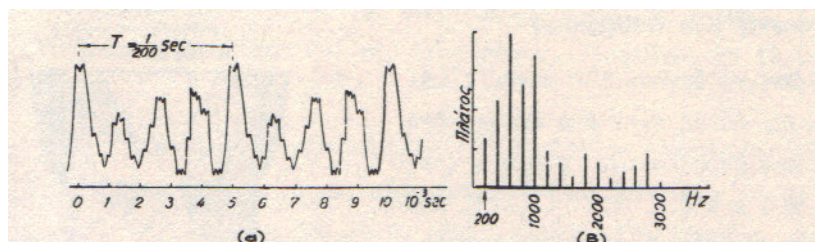
*Σχήμα 2-7: Σχηματική παράσταση του λάρυγγα για την παραγωγή της φωνής*

Ο ήχος που προέρχεται από τους πνεύμονες, καθώς περνάει μέσα από τη γλωττίδα, βάζει τις φωνητικές χορδές σε ταλάντωση και έτσι παράγει τη φωνή. Η φωνή είναι ένας σύνθετος ήχος με μεγάλο αριθμό αρμονικών. Η συχνότητα του θεμελιώδους εξαρτάται κυρίως από την τάση των φωνητικών χορδών και δευτερευόντως από τις διαστάσεις τους. Η διαμόρφωση της χροιάς του ήχου επιτυγχάνεται στο φάρυγγα, στην κοιλότητα του στόματος και τις ρινικές κοιλότητες που συγκοινωνούν με αυτή. Αυτές δημιουργούν αντηχείο του οποίου ο χώρος αλλάζει με τη θέληση του ατόμου που μιλάει, αρκεί για το σκοπό αυτό το άτομο να αλλάξει τη θέση της γλώσσας της κάτω σιαγόνας και των χειλιών. Με αυτό τον τρόπο ενισχύονται ορισμένες συχνότητες, που με τη θεμελιώδη συχνότητα διαμορφώνουν τη χροιά της παραγόμενης φωνής.

Η παιδική και η γυναικεία φωνή αποτελείται από ψηλές θεμελιώδεις συχνότητες, ενώ αντίθετα η ανδρική φωνή αποτελείται από θεμελιώδη χαμηλής συχνότητας.

Από την ανάλυση της φωνής κατά Fourier προέκυψε ότι τα φωνήεντα δίνουν φάσμα, στο οποίο οι αρμονικές είναι χαμηλής

συχνότητας. Π.χ. στο φωνήεν α, που εκφωνείται με θεμελιώδη συχνότητα  $f = 200\text{Hz}$  (Σχήμα 2-8), η μεγαλύτερη συχνότητα από τις αρμονικές φτάνει τα  $3000\text{Hz}$ . Αντίθετα ορισμένα σύμφωνα (θ, σ, χ, ...) αποτελούνται κυρίως από αρμονικές στην περιοχή των  $6000\text{ Hz}$ .



**Σχήμα 2-8: Το φωνήεν α, που εκφωνείται με θεμελιώδη συχνότητα 200 Hz (α) και το φάσμα συχνοτήτων του (β)**



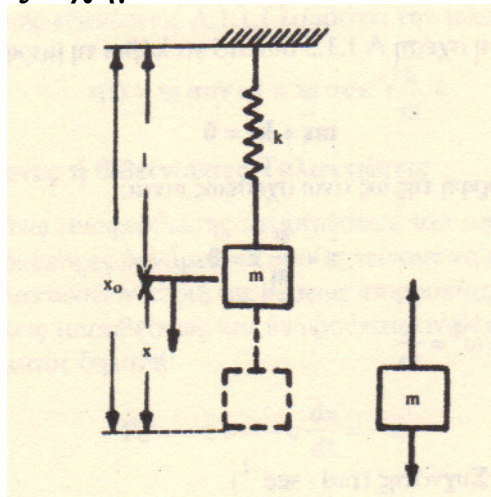
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ – ΚΥΜΑΤΑ

#### ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

##### 3-1. Ο ΑΠΛΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ

Ας θεωρήσουμε ένα ελατήριο, αμελητέας μάζας το οποίο έχει φυσικό μήκος  $l$  και του οποίου το ένα άκρο στηρίζεται σε ένα ακλόνητο στήριγμα ενώ το από το άλλο άκρο του εξαρτάται ένα σώμα μάζας  $m$  ως Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Απεικόνιση συστήματος απλού ταλαντωτή

Εάν τώρα το σώμα μάζας  $m$  μετατοπισθεί κατά μήκος του άξονα  $x$  και κατόπιν αφεθεί ελεύθερο τότε αυτό θα αρχίσει να ταλαντώνεται γύρω από την θέση ισορροπίας. Σε περίπτωση κατά την οποία το ελατήριο ως εκ της επιμηκύνσεώς του έχει μήκος  $l + x = x_0$  τότε ως γνωστόν θα υφίσταται μια δύναμη η οποία θα τείνει να επαναφέρει αυτό στην αρχική του θέση. Η δύναμη αυτή σύμφωνα προς το νόμο του Hooke θα είναι ίση προς:  $\mathbf{F} = -\mathbf{kx}$  (εξίσωση 3-1) όπου  $k$ : σταθερά του ελατηρίου ( $\text{kg} \cdot \text{sec}^{-2}$ )

Επίσης σύμφωνα προς τον 3<sup>ο</sup> νόμο του Newton εφ' όσον το σώμα βρίσκεται στη θέση  $1 + x$  θα εξασκείται επ' αυτού μία δύναμη ίση προς:  $\mathbf{F} = \mathbf{m} * \mathbf{a}$  (εξίσωση 3-2) όπου:

$m$ : Μάζα του σώματος (kg)

$a$ : Επιτάχυνση του σώματος ( $m \cdot sec^{-2}$ )

Εκ των εξισώσεων 3-1 και 3-2 προκύπτει ότι:

$$ma = - kx \quad (\text{εξίσωση 3-3})$$

επειδή  $a = \frac{d^2x}{dt^2} = x''$  η εξίσωση 3-3 δυνατό λάβει τη μορφή

$$m x'' + kx = 0 \quad (\text{εξίσωση 3-4})$$

μια εναλλακτική μορφή της παραπάνω εξισώσεως είναι:

$$x'' + \frac{k}{m} x = 0 \quad (\text{εξίσωση 3-5})$$

εφ' όσον τώρα τεθεί  $\omega^2 = \frac{k}{m}$  όπου:

$\omega$ : κυκλική φυσική συχνότητα ( $rad \cdot sec^{-1}$ ) η εξίσωση 3-5 λαμβάνει τη μορφή:

$$x'' + \omega x = 0 \quad (\text{εξίσωση 3-6})$$

η γενική λύση των διαφορετικών εξισώσεων της παραπάνω μορφής είναι:

$$x(t) = A \sin \omega t + B \eta \mu \omega t \quad (\text{εξίσωση 3-7})$$



όπου A και B είναι οι σταθερές της ολοκλήρωσεως οι οποίες προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες της κινήσεως.

Εν προκειμένω  $x(0) = x_0$  (για  $t = 0 \Rightarrow x = x_0$ )  
 και  $x'(0) = 0$  (για  $t = 0 \Rightarrow v = \frac{dx}{dt} = 0$ )

Συνεπώς:  $x(0) = x_0 = A \sin 0^0 + B \eta\mu 0^0 \Rightarrow x_0 = A$

Επίσης :  $x(t) = -A\omega \eta\mu \omega t + B\omega \sigma\upsilon\nu \omega t$

Συνεπώς :  $x(0) = 0 = -A\omega \eta\mu 0^0 + B\omega \sigma\upsilon\nu 0^0 \Rightarrow 0 = B\omega$   
 Επειδή  $\omega \neq 0$  συνεπάγεται ότι  $B = 0$ . Κατόπιν των παραπάνω για  $A = x_0$  και  $B = 0$  η λύση της διαφορετικής εξίσωσεως 3-1 λαμβάνει την τελική της μορφή:

$$x(t) = x_0 \sigma\upsilon\nu \omega t = x_0 \sigma\upsilon\nu \frac{k}{m} t \text{ (εξίσωση 3-8)}$$

### 3-2. ΑΠΟΣΒΕΝΥΜΕΝΕΣ Ή ΦΘΙΝΟΥΣΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

Εκτός της παραπάνω περίπτωσης του απλού ταλαντωτή στην πράξη υφίστανται διάφορες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να ελαττώσουν το πλάτος των διαδοχικών ταλαντώσεων γύρω από την θέση ισορροπίας. Οι εν λόγω δυνάμεις ονομάζονται δυνάμεις αποσβέσεως και θεωρούνται ανάλογες της ταχύτητας του ταλαντουμένου σώματος δηλαδή:

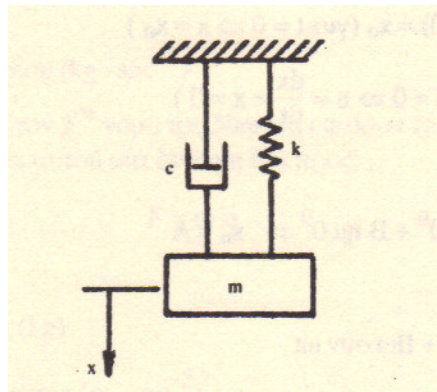
$$F_d = -cu = -c \frac{dx}{dt} = -cx \cdot \quad \text{(εξίσωση 3-9)}$$

όπου: c: Συντελεστής αποσβέσεως ( $\text{kg} \cdot \text{sec}^{-1}$ )

Κατόπιν των παραπάνω η εξίσωση 3-4 είναι δυνατόν να γραφεί  
 $m \ddot{x} + kx = -cx \cdot$  (εξίσωση 3-10)

$$\text{ή} \quad m \ddot{x} + cx \cdot + kx = u$$

Μια απεικόνιση ενός συστήματος αποσβενυμένης ταλάντωσης φαίνεται στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2: Απεικόνιση συστήματος αποσβενυμένης ταλάντωσης

Για την διαφορική εξίσωση της σχέσεως 3-10 υποθέτουμε λύση της μορφής  $x = e^{rt}$  οπότε  $\dot{x} = r e^{rt}$  και  $\ddot{x} = r^2 e^{rt}$ .

$$\text{Συνεπώς: } mr^2 e^{rt} + cre^{rt} + ke^{rt} = 0$$

$$\text{ή} \quad \mathbf{mr^2 + cr + k = 0} \quad (\text{εξίσωση 3-11})$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την χαρακτηριστική εξίσωση της διαφορικής εξισώσεως 3-10 οι ρίζες της οποίας είναι:

$$r_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} = (-\zeta \pm \zeta - 1) \omega_n$$

όπου:  $\omega_n = \frac{k}{m}$  και  $\zeta = \frac{c}{2m \omega_n}$  ( $\zeta$ : Παράγων αποσβέσεως)

Επειδή οι τιμές του  $r$  εξαρτώνται από το μέγεθος του  $\zeta$  στην συγκεκριμένη περίπτωση διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις.

**Περίπτωση 1<sup>η</sup>**: Εφόσον  $\zeta > 1$  οι τιμές του  $r$  είναι πραγματικές και διακεκριμένες. Το εύρος της ταλαντώσεως ελαττώνεται χωρίς όμως ποτέ να αλλάζει πρόσημο. Επομένως δεν υφίσταται παλινδρομική κίνηση (ταλάντωση) του συστήματος ανεξαρτήτως της τιμής των αρχικών συνθηκών της κινήσεως. Η περίπτωση αυτή αποτελεί την ***Υπερκρίσιμο Απόσβεση*** και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση 3-12 και απεικονίζεται από το Σχήμα 3-3(α).

$$x(t) = Ae^{-r_1 t} + Be^{-r_2 t} \quad (A \text{ και } B \text{ σταθερές}) \quad (\text{εξίσωση 3-12})$$

**Περίπτωση 2<sup>η</sup>**: Εφόσον  $\zeta = 1$  οι τιμές του  $r$  είναι πραγματικές, αρνητικές και ίσες προς  $-\omega_n$ . Το εύρος της ταλαντώσεως ελαττώνεται χωρίς όμως ποτέ να αλλάζει πρόσημο και σε κάποιο δεδομένο χρόνο, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες της κινήσεως, θα λάβει την τιμή μηδέν. Η περίπτωση αυτή αποτελεί την ***Κρίσιμο Απόσβεση*** και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση 3-13 και απεικονίζεται από το Σχήμα 3-3(β).

$$x(t) = (C + D) e^{-\omega_n t} \quad (\text{εξίσωση 3-13})$$

**Περίπτωση 3<sup>η</sup>** : Εφόσον  $\zeta < 1$  οι τιμές του  $r$  είναι συζυγείς μιγαδικές δηλαδή :

$$r_1 = \omega n(-\zeta + i \sqrt{1-\zeta^2}) \text{ και } r_2 = \omega n(-\zeta - i \sqrt{1-\zeta^2})$$

Εφόσον ορίσουμε ως  $\omega d = \omega n \sqrt{1-\zeta^2}$  **την Φυσική Συχνότητα Αποσβέσεως** θα έχουμε:  $r_1 = -\zeta \omega n + i \omega d$ ,  $r_2 = -\zeta \omega n - i \omega d$

Οπότε:  $x(t) = e^{-\zeta \omega n t} (E e^{i \omega d t} + F e^{-i \omega d t})$  (εξίσωση 3-14)

ή  $x(t) = e^{-\zeta \omega n t} [(E+F) \cos \omega d t + i(E-F) \sin \omega d t]$  (εξίσωση 3-15)

Εφόσον τώρα τεθεί  $E + F = G$  και  $i(E - F) = H$  η σχέση 3-15 λαμβάνει μορφή:

$$x(t) = e^{-\zeta \omega n t} (G \cos \omega d t + H \sin \omega d t) \text{ (εξίσωση 3-16)}$$

Η παραπάνω εξίσωση 3-16 είναι δυνατόν να τεθεί υπό την μορφή μιας συναρτήσεως ημιτόνου ή συνημιτόνου ως ακολούθως:

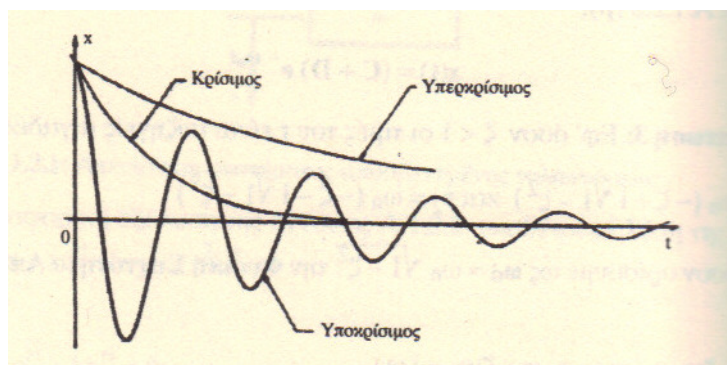
$$x(t) = I e^{-\zeta \omega n t} \eta \mu(\omega d t + \theta) \text{ (εξίσωση 3-17 α)}$$

ή  $x(t) = I e^{-\zeta \omega n t} \sigma \upsilon \nu(\omega d t + \varphi) \text{ (εξίσωση 3-17 β)}$

όπου:  $I = \sqrt{G^2 + H^2}$ ,  $\theta = \varepsilon \varphi^{-1} \frac{G}{H}$ ,  $\varphi = \varepsilon \varphi^{-1} \frac{H}{G}$

Στην περίπτωση αυτή η ταλάντωση έχει γωνιακή συχνότητα  $\omega d$  και το εύρος της κινήσεως με αλλαγή προσήμου ελαττώνεται εκθετικώς συναρτήσσει του χρόνου λόγω του όρου  $e^{-\zeta \omega n t}$ . Η εν λόγω περίπτωση αποτελεί την Υποκρίσιμο Απόσβεση η οποία

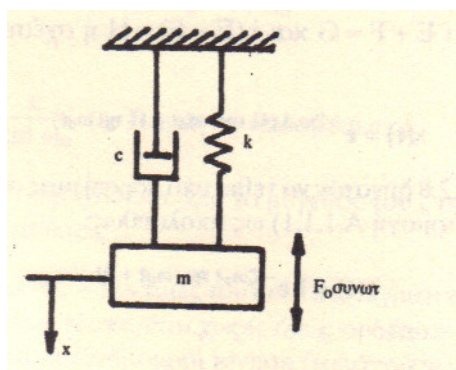
περιγράφεται από τις παραπάνω εξισώσεις 3-17(α) ή 3-17(β) και παραλλήλως απεικονίζεται από το Σχήμα 3-3(γ).



**Σχήμα 3-3:** Διαγωγή ενός συστήματος ελεύθερης ταλαντώσεως με απόσβεση (α) Υπερκρίσιμο, (β) Κρίσιμο, (γ) Υποκρίσιμο

### 3-3. ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

Ας θεωρήσουμε τώρα την προηγούμενη περίπτωση της αποσβενυμένης ταλαντώσεως κατά την οποία όμως το σύστημα ελατηρίου- σώματος διεγείρεται από μια δύναμη της μορφής  $F_0 \sin \omega t$ .



**Σχήμα 3-4:** Απεικόνιση συστήματος εξαναγκασμένης ταλαντώσεως

Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση της κινήσεως θα είναι:

$$m \ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \text{ (εξίσωση 3-18)}$$

η γενική λύση των διαφορικών εξισώσεων της παραπάνω μορφής είναι:

$$x = x_c + x_p \text{ (εξίσωση 3-19)}$$

όπου:  $x_c$  είναι η συμπληρωματική λύση της ομογενούς εξισώσεως  $m \ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$  και  $x_p$  είναι η ειδική λύση της δεδομένης εξισώσεως.

Η συμπληρωματική λύση είναι γνωστή ήδη από την προηγούμενη παράγραφο. Η ειδική λύση λαμβάνεται από το μη ομογενές τμήμα  $F_0 \sin \omega t$  της διαφορικής εξισώσεως της κινήσεως ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} x_p(t) &= A \eta \mu \omega t + B \sigma \nu \omega t \\ x \cdot p(t) &= \omega A \sigma \nu \omega t - \omega B \eta \mu \omega t \quad \} \text{ (εξίσωση 3-20)} \\ x'' \cdot p(t) &= -\omega^2 A \eta \mu \omega t - \omega^2 B \sigma \nu \omega t \end{aligned}$$

Αντικατάσταση της εξίσωσης 3-19 στην εξίσωση 3-18 παρέχει:

$$(kA - mA\omega^2 - c\omega B) \eta \mu \omega t + (kB - mB\omega^2 + c\omega A) \sigma \nu \omega t = F_0 \sigma \nu \omega t \text{ (εξίσωση 3-21)}$$

εξισώνοντας τους συντελεστές λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} & (k - m\omega^2)A - C\omega B = 0 \quad \} \text{ (εξίσωση 3-22)} \\ \text{και} & \quad c\omega A + (k - m\omega^2) B = F_0 \end{aligned}$$

Από το σύστημα των εξισώσεων 3-22 προκύπτει ότι:

$$A = \frac{F_0 \omega c}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \quad (\text{εξίσωση 3-23})$$

και

$$B = \frac{F_0 (k - m\omega^2)}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \quad (\text{εξίσωση 3-24})$$

οπότε:

$$x_p(t) = \frac{F_0 \omega c}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \eta \mu \omega t + \frac{F_0 (k - m\omega^2)}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \sigma \nu \omega t$$

(εξίσωση 3-25)

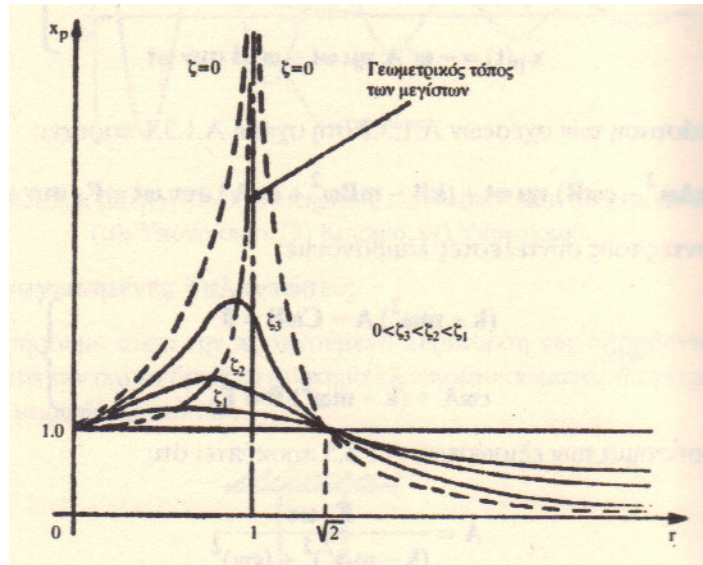
Η παραπάνω σχέση είναι δυνατόν να γραφεί και υπό τις ακόλουθες μορφές:

$$x_p(t) = \frac{F_0}{(k - m\omega^2) + (c\omega)^2} \sigma \nu (\omega t - \varphi) \quad (\text{εξίσωση 3-26})$$

ή  $x_p(t) = \frac{F_0/k}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \quad (\text{εξίσωση 3-27})$

όπου:  $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ ,  $\omega_n = \frac{k}{m}$ , και  $\varphi = \varepsilon \varphi^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2} = \varepsilon \varphi^{-1} \frac{2\zeta r}{1 - r^2}$

Μια γραφική απεικόνιση των παραπάνω ειδικών λύσεων παρέχεται από το διάγραμμα του Σχήματος 3-5.



*Σχήμα 3-5: Γραφική απεικόνιση των μερικών λύσεων στην περίπτωση εξαναγκασμένης ταλαντώσεως*

Κατόπιν των παραπάνω και συνοψίζοντας μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

1. Η ειδική λύση  $x_p(t)$  η οποία είναι γνωστή ως απόκριση σταθεράς καταστάσεως έχει την ίδια συχνότητα με τη διεγείρουσα δύναμη ανεξαρτήτως των αρχικών συνθηκών .
2. Το εύρος της εξαναγκασμένης ταλαντώσεως εξαρτάται από το εύρος και την συχνότητα της διεγείρουσας δυνάμεως και των παραμέτρων του συστήματος.
3. Κατά τον συντονισμό δηλαδή όταν η συχνότητα της διεγείρουσας δυνάμεως είναι ίση προς τη φυσική συχνότητα ( $\omega = \omega_n$ ) το εύρος της εξαναγκασμένης ταλαντώσεως περιορίζεται μόνο από τον παράγοντα αποσβέσεως  $\zeta$ .
4. Η απόκριση σταθεράς καταστάσεως του συστήματος δεν βρίσκεται εν φάσει με τη διεγείρουσα δύναμη και η ταλάντωση αυτού μέσω της φασικής γωνίας  $\phi$ , οφείλεται λόγω της παρουσίας αποσβέσεως εντός του ταλαντωμένου συστήματος.



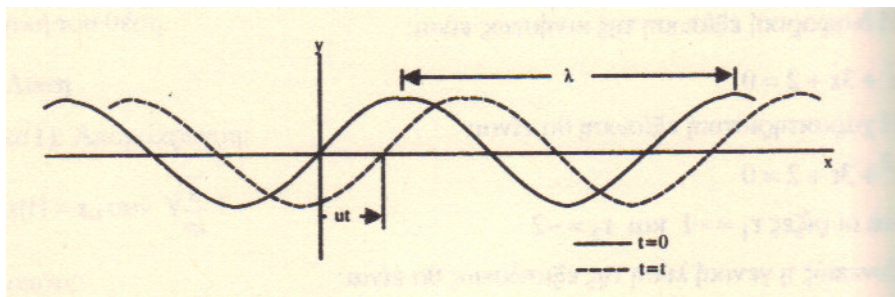
## 3-4. ΚΥΜΑΤΑ

### ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ

Ας υποθέσουμε μια απλή αρμονική ταλάντωση κατά μήκος ενός σύρματος η εξίσωση της οποίας να παρέχεται από την σχέση  $y = y_0 \sin \omega t$ . Στην περίπτωση αυτή θα ισχύει:

$$y = y_0 \sin \omega t = y_0 \sin 2\pi f t = y_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (\text{εξίσωση 3-28})$$

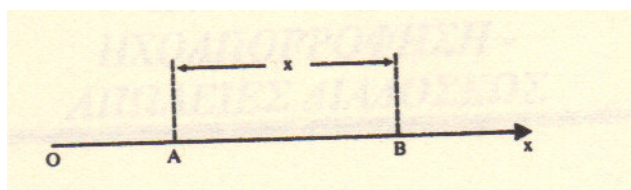
Η γραφική απεικόνιση της εν λόγω ταλαντώσεως παρέχεται από το Σχήμα 3-6 στο οποίο θεωρούμε ότι η κύμανση οδεύει προς τα δεξιά με ταχύτητα  $v$ .



Σχήμα 3-6: Γραφική απεικόνιση Οδεύοντος Κύματος

Προκειμένου τώρα η κύμανση να διαδοθεί από ένα σημείο A σε ένα σημείο B με την υπόψη ταχύτητα  $v$  Σχήμα 3-7 τότε θα απαιτηθεί χρόνος ίσος προς  $\tau = \frac{x}{v}$  και ως εκ τούτου η

απομάκρυνση  $y$  του B από τη μέση θέση ισορροπίας κατά την χρονική στιγμή  $t$  θα είναι ίση με την απομάκρυνση την οποία είχε το A πριν από χρόνο  $\tau$  δηλαδή κατά την χρονική στιγμή  $t - \tau = t - \frac{x}{v}$ .



Σχήμα 3-7: Γεωμετρία διαδόσεως κυμάνσεως

Κατόπιν των παραπάνω η εξίσωση 3-28 λαμβάνει την μορφή :  
 $y = y_0 \text{ συν } \frac{2\pi}{\tau} (t - \frac{x}{v})$  (εξίσωση 3-29)

ή  $y = y_0 \text{ συν } 2\pi (\frac{t}{\tau} - \frac{x}{v\tau})$  (εξίσωση 3-30)

επειδή όμως  $v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{\tau} \Rightarrow \lambda = v\tau$

και η εξίσωση 3-29 είναι δυνατόν να λάβει την μορφή:

$$y = y_0 \text{ συν } 2\pi (\frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda}) \quad (\text{εξίσωση 3-31})$$

Οι εξισώσεις 3-29 και 3-31 αποτελούν την εξίσωση κύματος το οποίο κινείται κατά τη θετική φορά του άξονα των x. Σε περίπτωση κατά την οποία η κίνηση εκτελείται κατά την αρνητική φορά του άξονα των x οι εν λόγω εξισώσεις ισχύουν ως:

$$y = y_0 \text{ συν } \frac{2\pi}{\tau} (t + \frac{x}{v}) \quad (\text{εξίσωση 3-32})$$

και  $y = y_0 \text{ συν } 2\pi (\frac{t}{\tau} + \frac{x}{\lambda})$  (εξίσωση 3-33)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ – ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΑΔΟΣΕΩΣ**

#### **ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ**

##### **4-1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΩΣ, ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ**

Ο ορισμός της Ηχοαπορροφήσεως είναι μια έννοια ταυτόσημη με την έννοια της μετατροπής ενέργειας. Πλέον συγκεκριμένα << Ηχοαπορρόφηση είναι η μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική κατά την πρόσπτωση των ηχητικών κυμάτων στις οριακές επιφάνειες του χώρου εντός του οποίου αυτά διαδίδονται.

Η παραπάνω μετατροπή αφ' ενός μεν αφορά ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ηχητικής ενέργειας και όχι το σύνολο αυτής και αφ' ετέρου δε οι διαδικασίες ή οι μηχανισμοί βάσει των οποίων εκτελείται η εν λόγω μετατροπή είναι περισσότερες της μίας. Επίσης η ηχοαπορρόφηση ποικίλλει αφ' ενός μεν από υλικό σε υλικό και αφ' ετέρου δε ποικίλλει και στο αυτό υλικό ως συνάρτηση της συχνότητας. Στην Αρχιτεκτονική Ακουστική οι ενδιαφέρουσες συχνότητες σε ότι αφορά την ηχοαπορρόφηση καλύπτουν το φάσμα των συχνοτήτων από 250 – 4000 Hz και κατόπιν αυτού οι κατασκευαστές των διάφορων ηχοαπορροφητικών υλικών παρέχουν διαγράμματα ή πίνακες της ηχοαπορροφήσεως, ενός εκάστου υλικού, τα οποία καλύπτουν το ως άνω διάστημα συχνοτήτων.

Ηχοαπορροφητικές ιδιότητες πλην αυτών καθ' εαυτών των υλικών τα οποία κατασκευάζονται για επενδύσεις χώρων οι οποίοι έχουν υψηλές ακουστικές απαιτήσεις παρουσιάζουν και όλα σχεδόν τα δομικά υλικά. Η ηχοαπορρόφηση όμως των εν

λόγω υλικών είναι πολύ μικρή και πρακτικώς θεωρείται αμελητέα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπως είναι τα ξύλινα στοιχεία, οι γυάλινες επιφάνειες, οι τάπητες, οι κουρτίνες και η εν γένει επίπλωση του χώρου των οποίων το ηχοαπορροφητικό αποτέλεσμα είναι σημαντικό και ως εκ τούτου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε ότι αφορά την επιθυμητή ακουστική του χώρου στα οποία αυτά είναι τοποθετημένα.

Επίσης μια σημαντική παράμετρος ηχοαπορρόφησης είναι η επίπλωση καθώς το πλήθος των ατόμων τα οποία βρίσκονται μέσα σε ένα χώρο.

Τέλος μια ειδική περίπτωση ηχοαπορρόφησης είναι και αυτή η οποία οφείλεται στον αέρα ο οποίος αποτελεί το ελαστικό μέσο διαδόσεως των ηχητικών κυμάτων.

Στους πίνακες 4-1 και 4-2 παρέχονται ενδεικτικές τιμές συντελεστών ηχοαπορρόφησης διαφόρων δομικών υλικών, επιπλώσεως και ακροατηρίου.

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΧΝΟΤΗΣ (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Αέρας (ανά m <sup>2</sup> )		-	-	0,001	0,003	0,007	0,012
Ασβεστοκονίαμα πεταχού 15 mm		0,08	0,15	0,31	0,50	0,61	0,71
Ασβεστοκονίαμα πεταχού 25 mm		0,19	0,22	0,48	0,59	0,73	0,80
Αμιαντοπυμένιο (4mm με 50 mm διάκενο)		0,43	0,15	0,10	0,05	0,04	0,02
Αφρολέξ (50 mm σε τοίχο)		0,12	0,20	0,45	0,65	0,70	0,75
Γυψοσιβίς κοίτης		0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Γυψοσιβίς σε τοίχο		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Γυαλί συνηθισμένο περατέθιο		0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
1/4" σε μεγάλια φύλλα		0,1	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
διπλό περατέθιο		0,1	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
σε τοίχο (Vitrolite)		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
<b>Καθίσματα</b>							
Κάθισμα Ξύλινο (ανά m <sup>2</sup> )		0,02	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08
Πολυθρόνη με τεσπεταρικά ύφασμα (ανά m <sup>2</sup> )		0,28	0,28	0,28	0,28	0,34	0,34
Κουνο καθιστό (ανά m <sup>2</sup> )		0,20	0,24	0,56	0,78	0,88	0,88
<b>Κουρτίνες</b>							
Στερεομένη σε τοίχο		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25
Κρεμασμένη μακριά από τοίχο		0,05		0,35		0,5	
που χωρίζει σε δύο ένα χώρο		0,03	0,04	0,1	0,15	0,2	0,25
που ανοίγει ορατή		0,20		0,30		0,40	
βαρειά		0,12	0,20	0,42	0,53	0,64	0,64
<b>Μάξιμο (επένδυση)</b>		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
<b>Μοσέτα</b>							
Λεπτή σε δάπεδο		0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Παχιά σε δάπεδο		0,07	0,25	0,5	0,55	0,6	0,6
<b>Μοσαϊκά</b>		0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
<b>Νονοραν</b>							
10 mm αερό σε διάκενο 50 mm		0,13	0,24	0,14	0,14	0,16	0,16
20 mm σε μπεντόν		0,06	0,15	0,44	0,9	0,66	0,66
8 mm σε διάκενο 20 mm με υαλοβάμβακα		0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	0,01
<b>Ξύλινες επιφάνειες</b>							
Πάχος		0,14		0,06		0,01	
Δάπεδο		0,10	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08
Παχιά σε δάπεδο		0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,1
Παχιά σε ψευδοστέψομα		0,2	0,15	0,1	0,1	0,05	
Βάθρο		0,15		0,10		0,10	
Σκηνή θεάτρου		0,20		0,25		0,40	
Στερεομένη ξύλινη επιφάνεια		0,10		0,10		0,10	
Επένδυση 3/4"		0,30		0,10		0,10	
Ορχήστρα (κατ' άτομο) σε βάθρο		0,40	0,80	1	1,40	1,30	1,20
<b>Πανού</b>							
Μεταλλικό σε διάσταση 10%, 1" υαλοβάμβακα στον αέρα		0,10		0,55		0,80	
Μεταλλικό σε διάσταση 10%, 2" υαλοβάμβακα στον αέρα		0,20		0,75		0,70	
Κόντρα-πλακέ 6 mm σε καουτσάουμα 50x100cm με 50 mm διάκενο		0,18	0,28	0,12	0,07	0,04	0,04
Πλάκες Ξύλινες 12mm διάστρες με 50 mm διάκενο		0,30	0,30	0,30	0,40	0,50	0,50
Πλάκες Ξύλινες τυπικές με 15% διάστρη, 2" υαλοβάμβακα στον αέρα		0,20		0,60		0,35	
Πλαστικό δάπεδο 2,5 mm		0,01		0,01		0,05	
<b>Τοίχος σκυλίστος, άβαφος</b>		0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
βημμένος, καλυμμένος		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
με τοίχλα και 30 mm διάκενο		0,16	0,13	0,15	0,11	0,13	0,13
Τσιμέντο άβαφο αερό		0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Φελλός σε παχωέ		0,04	0,03	0,05	0,11	0,07	0,02
Μείωση συντελεστών δαπέδου όταν σκεπάζεται από καθίσματα		20%		40%		60%	

**Πίνακας 4-1: Ενδεικτικές τιμές Συντελεστών Ηχοαπορρόφησης Δομικών Υλικών**

Ας σημειωθεί ότι οι εν λόγω τιμές του συντελεστού ηχοαπορρόφησης εκάστου υλικού εξαρτάται από τις λεπτομέρειες της υφής και τον τρόπο τοποθέτησής του υλικού.



ΣΥΧΝΟΤΗΣ (HZ) ΥΛΙΚΟ	125	250	500	100	2000	4000
Κάθισμα, ξύλινο, απλό	0,42	0,21	0,06	0,05	0,04	0,04
Κάθισμα, απλή επένδυση, δέρμα	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50
Κάθισμα, κανονική επένδυση, δέρμα	0,44	0,54	0,60	0,62	0,58	0,50
Πολυθρόνα, κανονική επένδυση, ύφασμα	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Πολυθρόνα, κανονική επένδυση, ύφασμα, τοποθ. 0,90 + 0,55 m	0,44	0,56	0,67	0,74	0,83	0,87
Πολυθρόνα, κανονική επένδυση, ύφασμα, διάτρηση κάτω πλευράς, σε ανακλαστικό δάπεδο	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
Πολυθρόνα, κανονική επένδυση, ύφασμα διάτρηση κάτω πλευράς	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Ακροατήριο, ξύλινα καθίσματα 1/m <sup>2</sup>	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,70
Ακροατήριο, ξύλινα καθίσματα 2/m <sup>2</sup>	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,78
Ακροατήριο, επενδεδυμένες πολυθρόνες τοποθ. 0,85 + 0,63 m	0,72	0,82	0,91	0,93	0,94	0,87
Ακροατήριο, επενδεδυμένες πολυθρόνες τοποθ. 0,90 + 0,55 m	0,55	0,86	0,83	0,87	0,90	0,87
Ακροατήριο συμπεριλ. ορχήστρας, χορωδίας και διαδρόμων πλάτους 1 m	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85
Ακροατήριο συμπεριλ. ορχήστρας, χορωδίας και διαδρόμων πλάτους 1 m	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85

**Πίνακας 4-2: Ενδεικτικές τιμές συντελεστών ηχοαπορρόφησης επιπλώσεως και ακροατηρίου**

## 4-2.ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΩΣ

Οι διαδικασίες παραγωγής της ηχοαπορρόφησης οφείλονται σε δυο βασικές αιτίες.

Η πρώτη αιτία αφορά την **Τριβή** στους πόρους του υλικού. Συγκεκριμένα όταν το ηχητικό κύμα το οποίο ως γνωστό είναι μια ταλάντωση των μορίων ενός ελαστικού μέσου και εν προκειμένου του αέρος, συναντήσει ένα πορώδες υλικό τότε αυτό εισχωρεί εντός αυτού χωρίς ιδιαίτερη αντίσταση. Λαμβανομένου τώρα υπόψη ότι εντός του πορώδους υλικού

υπάρχει αέρας οι εν λόγω ταλαντώσεις θα συνεχίσουν να εκτελούνται πλην όμως εντός ενός περιορισμένου χώρου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δυνάμεων τριβής μεταξύ των μορίων του αέρος και της εσωτερικής επιφάνειας των πόρων. Λόγω της υπόψη τριβής έχουμε μετατροπή της ενέργειας την οποία μεταφέρουν τα μόρια του αέρος σε θερμική και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της εντάσεως του ηχητικού κύματος με παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας του πορώδους υλικού. Κατ' αυτόν τον τρόπο η κατανάλωση ενέργειας η οποία προκαλείται κατά την εν λόγω διαδικασία είναι το αίτιο της ηχοαπορρόφησης την οποία διαθέτουν τα πορώδη υλικά.

Η δεύτερη αιτία η οποία προκαλεί ηχοαπορρόφηση είναι εντελώς διαφορετική της πρώτης και οφείλεται στο γεγονός ότι εφ' όσον σε ένα σύστημα *Μάζας- Ελατηρίου* εφαρμοσθεί κατάλληλη διέγερση αυτό τίθεται σε ταλάντωση (Εξαναγκασμένες Ταλαντώσεις) της οποίας η συχνότητα εξαρτάται αφ' ενός μεν από την μάζα ( $m$ ) του σώματος και αφ' ετέρου από την σταθερά ( $k$ ) του ελατηρίου. Κατόπιν αυτού το σύστημα εφ' όσον το σύστημα Μάζας – Ελατηρίου διεγερθεί από ένα ηχητικό κύμα τότε η ενέργεια του κύματος η οποία θα θέσει το σύστημα σε ταλάντωση ουσιαστικώς αφαιρείται από την αρχική ενέργεια αυτού. Κατόπιν αυτού η παραπάνω κατανάλωση ενέργειας αποτελεί το αίτιο της ηχοαπορρόφησης. Ας σημειωθεί ότι, αν και η ενέργεια η οποία καταναλώνεται προκειμένου να διεγερθεί το σύστημα Μάζας – Ελατηρίου, περιορίζεται σε μία μικρή περιοχή συχνοτήτων η απορρόφηση, η οποία προκύπτει για την εν λόγω περιοχή συχνοτήτων είναι αρκετά αξιόλογη. Καθώς είναι προφανές με κατάλληλη ρύθμιση της σχέσεως μάζας σώματος και σταθεράς ελατηρίου είναι δυνατόν να επιτευχθούν απορροφήσεις σε επιθυμητές περιοχές συχνοτήτων, κάτι το ιδιαίτερος χρήσιμο, στην περίπτωση υλικών τα οποία απαιτούνται για την

κατασκευή χώρων με ιδιαίτερες ακουστικές απαιτήσεις. Τέλος η συνηθέστερη πρακτική μορφή του συστήματος Μάζας – Ελατηρίου την οποία δυνάμεθα να συναντήσουμε αποτελείται από ένα λεπτό φύλο ξύλου ή πλαστικού όπισθεν του οποίου να υπάρχει ένα στρώμα αέρος το οποίο να ‘παίζει’ τον ρόλο του ελατηρίου.

### 4-3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΩΣ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί κατά την διέλευση των ηχητικών κυμάτων μέσω των διαφόρων σωμάτων, έχουμε μείωση της εντάσεως του κύματος λόγω μετατροπής μέρους της ενέργειας του σε θερμότητα.

Αν συμβολίσουμε την στοιχειώδη μείωση της ενέργειας και ως εκ τούτου και της εντάσεως ενός ηχητικού κύματος με  $dI$  και την στοιχειώδη απόσταση διελύσεως με  $dr$  θα ισχύει:  
 $dI \sim I dr$  (εξίσωση 4-1)

ή  $dI = -v I dr$  (εξίσωση 4-2) όπου :

$v$ : Συντελεστής αναλογίας

Συνεπώς :  $\frac{dI}{I} = -v dr$  (εξίσωση 4-3)

ή  $\frac{dI}{I} = -r dr$  (εξίσωση 4-4)

ή  $\ln I = -v r + c$  (εξίσωση 4-5) όπου :



c: Σταθερά της ολοκλήρωσης

Αν τώρα τεθεί  $c = \ln I_0$  τότε η εξίσωση 4-5 παίρνει την μορφή :

$$\ln I = -v r + \ln I_0 \quad (\text{εξίσωση 4-6})$$

$$\text{ή} \quad \ln \frac{I}{I_0} = -v r \quad (\text{εξίσωση 4-7})$$

$$\text{και τελικώς: } I = I_0 e^{-vr} \quad (\text{εξίσωση 4-8})$$

Ας σημειωθεί ότι εφ' όσον  $r = 0$  τότε  $I = I_0$  δηλαδή το  $I_0$  συμβολίζει την αρχική ενέργεια (ένταση) του ηχητικού κύματος πριν αυτό υποστεί τη διαδικασία της ηχοαπορρόφησης. Επίσης η σταθερά της αναλογίας  $v$  αποτελεί τον λεγόμενο **Συντελεστή Ηχοαπορρόφησης** ο οποίος όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια είναι συνάρτηση της συχνότητας εξ' ου και η προαναφερθείσα συνάφεια του συντελεστού ηχοαπορρόφησης και συχνότητας.

#### 4-4. ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα Ηχοαπορροφητικά υλικά τα κατατάσσουμε σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα **Πορώδη Υλικά**. Τα εν λόγω υλικά έχουν πολυάριθμα μικρά διάκενα τα οποία επικοινωνούν αφ' ενός μεν μεταξύ τους και αφ' ετέρου δε με τον εξωτερικό χώρο ο οποίος περιβάλλει το υλικό. Τα πορώδη υλικά παράγονται είτε σε **Στρώματα** είτε σε **Φύλλα**. Τα στρώματα έχουν αφ' ενός μεν συνήθως μικρή πυκνότητα και αφ' ετέρου δε το πάχος τους δεν είναι καθορισμένο επακριβώς.

Αντιθέτως τα φύλλα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με τα στρώματα και το πάχος τους είναι επακριβώς καθορισμένο.

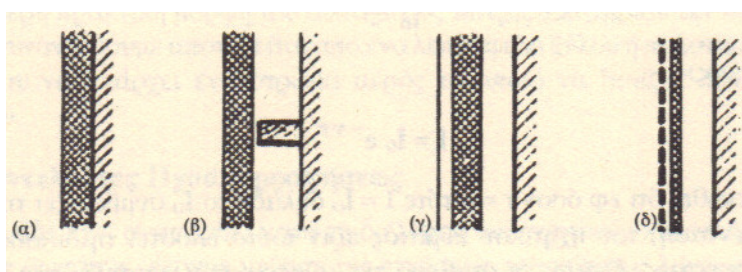
Σε ότι αφορά τώρα την τοποθέτηση των πορωδών υλικών αυτά τοποθετούνται είτε απ' ευθείας επί του τοίχου είτε σε κάποια απόσταση από αυτόν. Επίσης για λόγους αισθητικής την επιφάνεια των πορωδών υλικών την καλύπτουμε συνήθως από διάφορα ηχοδιαπερατά υφάσματα ή από λεπτά μεταλλικά φύλλα τα οποία έχουν διάτρηση άνω του 20% προκειμένου να μην επηρεάζονται οι ηχοαπορροφητικές ιδιότητες τους. Σε ότι αφορά τώρα την συχνότητα μετά από την αρχίζει να μειώνεται η απορρόφηση εξαιτίας του εν λόγω καλύμματος αυτή παρέχεται από την σχέση:

$$f = 1000 \frac{P}{d} \quad (\text{εξίσωση 4-9}) \quad \text{όπου:}$$

P: Ποσοστό Διατρήσεως Επιφάνειας Καλύψεως (%)

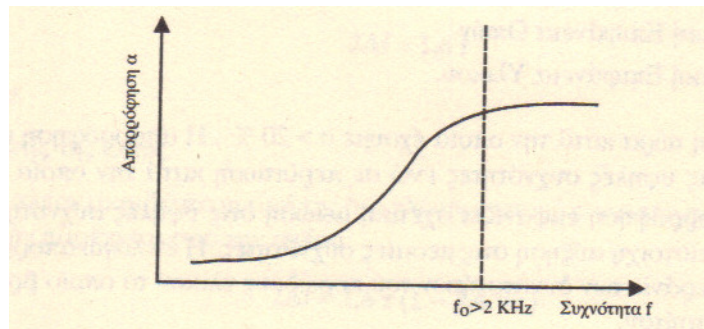
d: Διάμετρος Οπών Διάτρητου Επιφάνειας Καλύψεως (mm)

Στο σχήμα 4-1 απεικονίζονται οι διάφορες μορφές τοποθετήσεως των πορωδών υλικών.



**Σχήμα 4-1: Τοποθέτηση πορωδών ηχοαπορροφητικών υλικών:**  
(α) Επί τοίχου, (β) Σε απόσταση, (γ) Κάλυψη με λεπτό ύφασμα και (δ) Κάλυψη με διάτρητο λεπτό φύλλο

Τα πορώδη υλικά παράγονται σε πάχος μέχρι και 10 cm και η κατανομή των ηχοαπορροφητικών ικανοτήτων τους απεικονίζονται στο σχήμα 4-2. Από το εν λόγω σχήμα είναι αντιληπτό ότι τα πορώδη υλικά παρουσιάζουν σημαντικές ηχοαπορροφητικές ιδιότητες σε συχνότητες άνω των 2000 Hz.



Σχήμα 4-2: Ηχοαπορρόφηση πορωδών υλικών

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα **Απορροφητικά Πλαίσια** ή τα **Διάτρητα Απορροφητικά** τα οποία είναι χωρίσματα (πλάκες) μικρού πάχους και τα οποία τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια. Η **Συχνότητα Συντονισμού ( $f_0$ )** των εν λόγω πλαισίων παρέχεται από την σχέση:

$$f_0 = \frac{600}{\sin \theta \cdot d \cdot m'} \quad (\text{εξίσωση 4-10}) \quad \text{όπου:}$$

$\theta$ : Γωνία προσπτώσεως του Ηχητικού Κύματος σε σχέση προς την κάθετο επί του πλαισίου

$m'$ : Ενεργός Μάζα του πλαισίου ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$d$ : Απόσταση του πλαισίου από τον τοίχο (cm)

Για συνήθη βάρη (Μάζα 2 έως  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) και αποστάσεις 1 έως 10 cm τα απορροφητικά πλαίσια παρουσιάζουν συχνότητα

συντονισμού η οποία μεταβάλλεται από 60 – 450 Hz περίπου. Στα εν λόγω υλικά εφ' όσον η διάταξη των οπών διατρήσεως είναι πυκνή (μεγαλύτερα του 20%) κάθε μία οπή αποτελεί μια νέα ηχητική πηγή και το ηχητικό κύμα συνεχίζει πρακτικώς τη διάδοσή του και όπισθεν του υλικού το οποίο στην περίπτωση αυτή ονομάζεται **Ηχοδιαφανές**.

Ας σημειωθεί ότι η διάτρηση των εν λόγω υλικών ορίζεται από τον **Συντελεστή Διατρήσεως ( $\sigma$ )** μέσω της σχέσεως:

$$\sigma = \frac{\Sigma S_o}{\Sigma S_u} \quad (\text{εξίσωση 4-11}) \quad \text{όπου:}$$

$\Sigma S_o$ : Συνολική Επιφάνεια Οπών

$\Sigma S_u$ : Συνολική Επιφάνεια Υλικού

Σε περίπτωση τώρα κατά την οποία έχουμε  $\sigma > 20\%$ . Η απορρόφηση εμφανίζεται ισχυρή στις υψηλές συχνότητες ενώ σε περίπτωση κατά την οποία έχουμε  $\sigma < 20\%$  η απορρόφηση εμφανίζει σχετική μείωση στις υψηλές συχνότητες και παραλλήλως αντίστοιχη αύξηση στις μεσαίες συχνότητες. Η εν λόγω απορρόφηση είναι σαφώς υπεράνω των δυνατοτήτων του πορώδους υλικού το οποίο βρίσκεται όπισθεν του διάτρητου.

Μια περαιτέρω εξέταση των διάτρητων υλικών παρέχει ότι η συνολική μάζα του αέρος ( $m$ ) εντός των υφισταμένων οπών είναι ίση προς:

$$m = \rho l \Sigma S_o \quad (\text{εξίσωση 4-12}) \quad \text{όπου:}$$

$\rho$ : Πυκνότητα Αέρος ( $0,0012 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3} = 1,2 \text{ kgr} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$l$ : Βάθος Οπής

$\Sigma S_o$ : Συνολική Επιφάνεια Οπών

Σε ότι αφορά τώρα την *Ενεργό Μάζα ανά Μονάδα Επιφανείας* ( $m'$ ) αυτή είναι ίση προς:

$$m' = \frac{m}{\Sigma S_v} = \frac{\rho l \Sigma S_o}{\Sigma S_v} \quad (\text{εξίσωση 4-13})$$

η εν λόγω της εξίσωσης 4-11:

$$m' = \frac{\rho l}{\sigma} \quad (\text{εξίσωση 4-14})$$

Κατά την παλινδρομική κίνηση της μικρής αυτής μάζας του αέρος συμπαρασύρονται και συνεργούν επίσης μικρά στρώματα αέρος τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το στόμιο της οπής και έτσι προκαλείται η λεγόμενη *Διόρθωση Στομίου* ( $2 \Delta l$ ) και συνεπώς η εξίσωση 4-14 παίρνει την μορφή:

$$m' = \frac{\rho(l + 2 \Delta l)}{\sigma} \quad (\text{εξίσωση 4-15})$$

Για κυκλικές οπές ισχύει:

$$2\Delta l = 1,6 r \quad (\text{εξίσωση 4-16}) \quad \text{όπου:}$$

r: Ακτίνα της Οπής

Μία πλέον ακριβέστερη τιμή της διορθώσεως στομίου για την περίπτωση κυκλικών οπών παρέχεται από την σχέση:

$$2\Delta l = 1,6 r (1 - 1,4 \sigma) \quad (\text{εξίσωση 4-17})$$

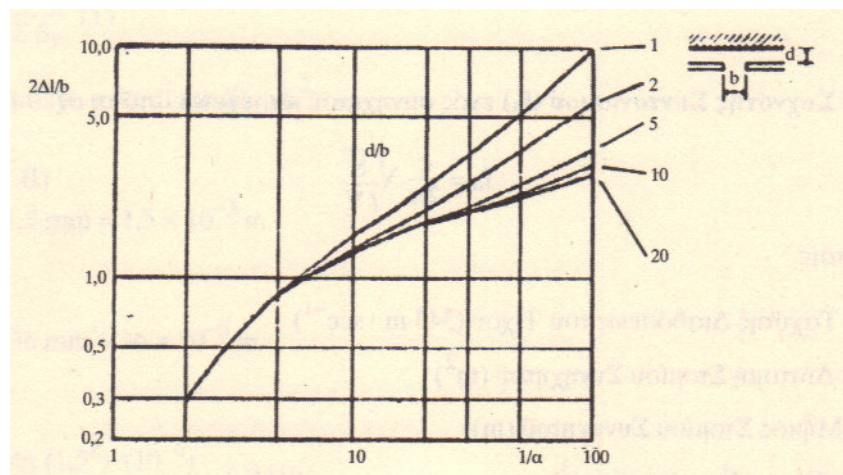
Ανάλογες ιδιότητες με τα διάτρητα παρουσιάζουν και τα υλικά με σχισμές. Στα εν λόγω υλικά ο συντελεστής διατρήσεως  $\sigma$  είναι ίση προς:

$$\sigma = \frac{w}{w + W} \text{ (εξίσωση 4-18) όπου:}$$

w: Εύρος Σχισμής

W: Εύρος Διάκενου μεταξύ Σχισμών

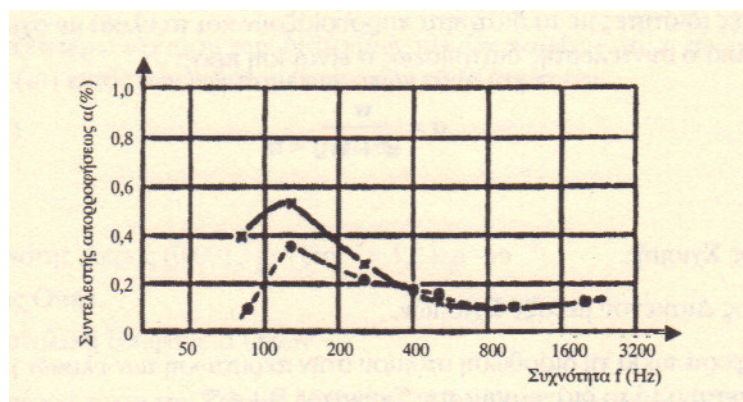
Σε ότι αφορά τη διόρθωση στομίου στην περίπτωση των υλικών με σχισμή αυτή παρέχεται από το διάγραμμα του Σχήματος 4-3.



Σχήμα 4-3: Διόρθωση Στομίου για υλικό με σχισμές

Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή η διόρθωση στομίου είναι συνάρτηση του εύρους της σχισμής και της αποστάσεως του υλικού από τον τοίχο.

Η τρίτη και τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τους **Συνηχητές**. Οι συνηχητές είναι κοιλότητες με μικρό στόμιο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-4. Αυτοί συντονίζονται σε χαμηλές συχνότητες τις οποίες και απορροφούν. Η αρχή λειτουργίας των συνηχητών βασίζεται στη διέγερση την οποία υφίσταται η μάζα του αέρος η οποία βρίσκεται εντός της κοιλότητας όπου η απορρόφηση είναι πολύ περισσότερη από αυτή η οποία αντιστοιχεί στην επιφάνεια του υλικού επί του οποίου υπάρχουν οι διάφορες κοιλότητες( οπές ή σχισμές).



*Σχήμα 4-4: Απορρόφηση ενός Συνηχητού*

Η **Συχνότητα Συντονισμού ( $f_0$ )** ενός συνηχητού παρέχεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \frac{S}{lV} \quad (\text{εξίσωση 4-19}) \quad \text{όπου:}$$

$c$ : Ταχύτητα Διαδόσεως του Ήχου ( $343 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ )  
 $S$ : Διατομή Στομίου Συνηχητού ( $\text{m}^2$ )  
 $l$ : Μήκος Στομίου Συνηχητού ( $\text{m}$ )  
 $V$ : Όγκος Συνηχητού ( $\text{m}^3$ )

Σε ότι αφορά τον μέγιστο συντελεστή ηχοαπορρόφησης ενός συνηχητού αυτός παρέχεται από την σχέση :

$$a_{\max} = \frac{\lambda^2}{2\pi} = \frac{c^2}{2\pi f^2 o} = \frac{18400}{f^2 o} \quad (\text{εξίσωση 4-20})$$

καθώς είναι προφανές προκειμένου  $a_{\max} \leq 1$  δέον όπως:

$$f_o \geq 18400 = 136 \text{ Hz}$$

Τέλος το **Εύρος Ζώνης** ( $2\Delta f$ ) των απορροφουμένων συχνοτήτων υπό ενός συνηχητού παρέχεται από την σχέση:

$$2\Delta f = \frac{8\pi^2 f^4 V}{c^3} \quad (\text{εξίσωση 4-21})$$

## 4-5. ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣ

Κατά την διάδοση των ηχητικών κυμάτων στον αέρα αυτά υφίστανται μείωση της ενέργειας τους ανάλογη με αυτή που λαμβάνει χώρα και κατά την διέλευσή τους μέσω των ηχοαπορροφητικών υλικών. Οι παράγοντες οι οποίοι προκαλούν την εν λόγω μείωση ενέργειας είναι:

1. Οι εσωτερικές τριβές του αέρος των οποίων το αποτέλεσμα  $\nu_1$  ( $\text{m}^{-1}$ ) παρέχεται από την εξίσωση:



$$v_1 = \frac{1,15 (10^{-6})}{\lambda^2} \quad (\text{εξίσωση 4-22})$$

όπου:  $\lambda$ : Μήκος κύματος (m)

2. Η θερμοαγωγιμότητα της οποίας το αποτέλεσμα  $v_2$  ( $\text{m}^{-1}$ ) παρέχεται από την εξίσωση:

$$v_2 = 0,54 v_1 \quad (\text{εξίσωση 4-23})$$

3. Οι ενδομοριακές διαδικασίες αποσβέσεως των οποίων το αποτέλεσμα  $v_3$  ( $\text{m}^{-1}$ ) παρέχεται από την εξίσωση:

$$v_3 = \frac{85 \times 10^{-4}}{\varphi} f^2 \quad (\text{εξίσωση 4-24})$$

όπου:  $f$ : Συχνότητα (kHz)

$\varphi$ : Σχετική Υγρασία(%)

Οι παραπάνω παράγοντες  $v_1$ ,  $v_2$  και  $v_3$  αποτελούν τους επί μέρους συντελεστές απορροφήσεως του αέρα. Επειδή οι μονάδες των παραπάνω συντελεστών ( $\text{m}^{-1}$ ) δεν είναι πρακτικές για την εκτέλεση περαιτέρω υπολογισμών τις εξισώσεις 4-22 – 4-24 τις μετατρέπουμε σε μια πλέον πρόσφορο μορφή μετρήσεως απωλειών ως ακολούθως:

Κατ' αρχήν λαμβάνουμε την εξίσωση 4-8 σε δυο διαδοχικές αποστάσεις  $r_1$  και  $r_2$  οπότε:

$$I_1 = I_0 e^{-v r_1} \quad (\text{εξίσωση 4-25})$$

και 
$$I_2 = I_0 e^{-v r_2} \quad (\text{εξίσωση 4-26})$$

ακολουθως δια λογαριθμισεως και πολλαπλασιασμου επί 20 λαμβάνουμε:

$$20 \log I_1 = 20 \log I_0 = 20 \nu r_1 \log e \quad (\text{εξίσωση 4-27})$$

και  $20 \log I_2 = 20 \log I_0 - 20 \nu r_2 \log e \quad (\text{εξίσωση 4-28})$

με αφαιρέση των 4-27 και 4-28 προκύπτει:

$$20 \log I_1 - 20 \log I_2 = 20 \nu \log e (r_2 - r_1) \quad (\text{εξίσωση 4-29})$$

και

$$20 \log e = \frac{20 \log I_1 - 20 \log I_2}{r_2 - r_1} = \frac{20 \log I_1/I_2}{r_1 - r_2} \quad (\text{εξίσωση 4-30})$$

Στην παραπάνω εξίσωση παρατηρούμε ότι η ποσότητα  $20 \log I_1/I_2$  εκφράζεται σε dB ενώ η ποσότητα  $r_2 - r_1$  εκφράζεται σε m άρα η ποσότητα  $20 \nu \log e$  εκφράζεται σε  $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ . Έτσι λοιπόν η εξίσωση 4-22 είναι δυνατόν να γραφεί ως:

$$\mu_1 = 20 \nu_1 \log e = \frac{20 (1,15)(10^{-6}) \log e}{\lambda_2} = \frac{10^{-5}}{\lambda_2} \quad (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$$

(εξίσωση 4-31)

Μια εναλλακτική μορφή της εξίσωσης 4-31 είναι:

$$\mu_1 = \frac{10^{-5}}{\lambda^2} = \frac{10^{-5}}{c^2/r^2} = \frac{10^{-5}}{340^2} f^2 = 8,65(10^{-5}) f^2 \quad (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (\text{εξ. 4-32})$$

όπου: c: Ταχύτητα Διαδόσεως του Ήχου =  $343 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$

f: Συχνότητα (kHz)

Κατόπιν αυτού:

$$\mu_2 = 0,54 \mu_1 = \frac{0,54 \times 10^{-5}}{\lambda^2} = 4,67 \times 10^{-5} f^2 \text{ (dB} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$$

(εξίσωση 4-33)

επίσης:

$$\mu_3 = 20v_3 \log e = \frac{20 \times 85 \times 10^{-4}}{\varphi} \log e f^2 = \frac{74 \times 10^{-3}}{\varphi} f^2 \text{ (dB} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$$

(εξίσωση 4-34)

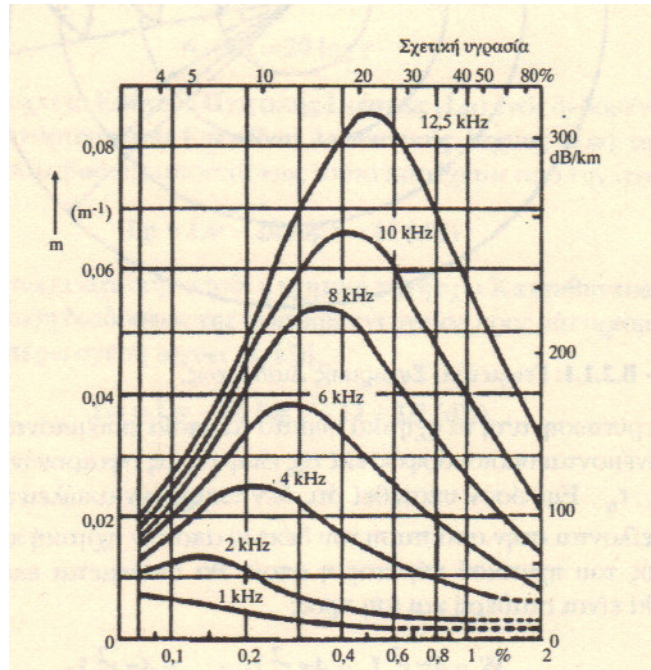
Το άθροισμα των παραπάνω συντελεστών  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  και  $\mu_3$  παρέχει τον συνολικό συντελεστή απορροφήσεως ο οποίος είναι:

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 \quad \text{(εξίσωση 4-35)}$$

Μια απλή παρατήρηση των εξισώσεων 4-32, 4-33 και 4-34 παρέχει  $\mu_3 \gg \mu_1, \mu_2$

και συνεπώς:  $\mu = \mu_3$  (εξίσωση 4-36)

Μια γραφική απεικόνιση του συντελεστού απορροφήσεως υπό την μορφή της σταθεράς αποσβέσεως  $m = 2v$  φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4-5.

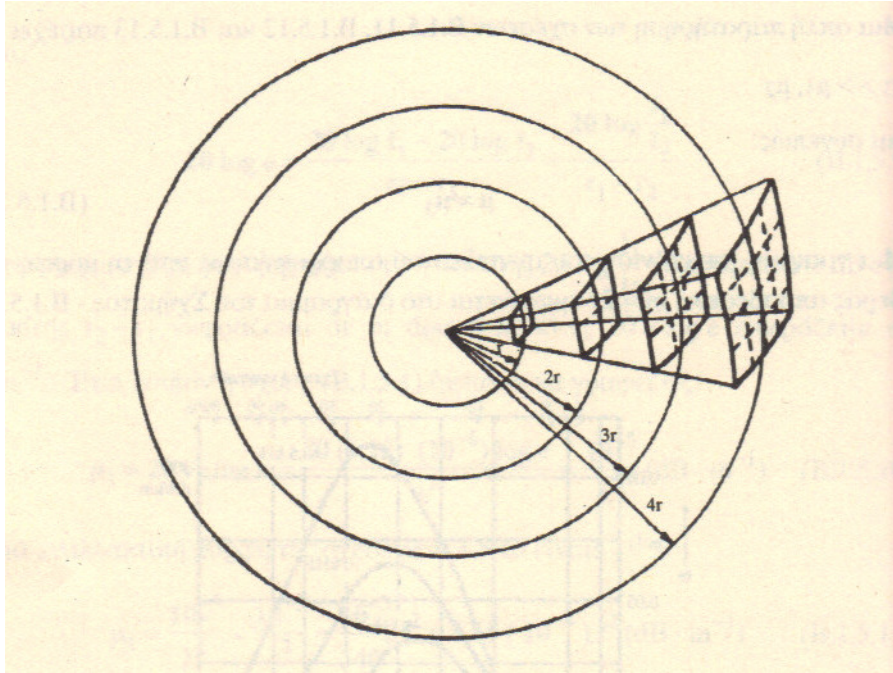


*Σχήμα 4-5: Σταθερά αποσβέσεως του αέρα*

## 4-6. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΑΔΟΣΕΩΣ

### ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Ας θεωρηθεί μια ηχητική πηγή η οποία εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις εντός ενός ομοιογενούς ελαστικού μέσου Σχήμα 4-6.



**Σχήμα 4-6: Γεωμετρία Σφαιρικής Διαδόσεως**

Στην περίπτωση αυτή τα ηχητικά κύματα τα οποία εκπέμπονται από την ηχητική πηγή κατανέμονται ομοιόμορφα επί της επιφάνειας σφαιρικών κελυφών ακτινών  $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$ . Εφ' όσον υποθεθεί ότι δεν υπάρχουν απώλειες ( πλέον αυτών οι οποίες οφείλονται στην απόσταση του δέκτη από την ηχητική πηγή) συνεπάγεται ότι η ισχύς του ηχητικού κύματος η οποία θα διανέμεται επί των διαδοχικών κελυφών θα είναι σταθερή και ίση προς:

$$W = 4\pi r_0^2 I_0 = 4\pi r_1^2 I_1 = \dots = 4\pi r_n^2 I_n \quad (\text{εξίσωση 4-37})$$

Όπου:

$r_n$ : Απόσταση της εκάστοτε σφαιρικής επιφάνειας από την ηχητική πηγή

$I_n$ : Ένταση της ηχητικής ενέργειας σε απόσταση  $r_n$  από την ηχητική πηγή

Εάν ορίσουμε ως *Απώλεια Διαδόσεως* (*Transmission Loss*) τον λόγο

$$TL = 10 \log \frac{I_0}{I} \quad (\text{εξίσωση 4-38})$$

Όπου:

$I_0$ : Ένταση του ηχητικού κύματος σε απόσταση  $r_0$  από την ηχητική πηγή

$I$ : Ένταση του ηχητικού κύματος σε απόσταση  $r$  από την ηχητική πηγή

τότε θα έχουμε:

$$TL = 10 \log \frac{I_0}{I} = 10 \log \frac{w/4\pi r_0^2}{w/4\pi r^2} = 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (\text{εξίσωση 4-39})$$

Εάν υποθεθεί ότι  $r_0 = 1\text{m}$  (συνήθης περίπτωση μετρήσεως της εντάσεως της ηχητικής πηγής) τότε η εξίσωση 4-39 παίρνει την μορφή:

$$TL = 20 \log r \quad (\text{εξίσωση 4-40})$$

Σε ότι αφορά το *Επίπεδο Ηχητικής Πίεσεως* ( $L_p$ ) ενός δεδομένου σημείου του χώρου ως συνάρτηση του *Επιπέδου Ακουστικής Ισχύος* ( $L_w$ ) της ηχητικής πηγής και της μεσολαβούσης αποστάσεως αυτό παρέχεται από την σχέση:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 \text{ (dB)} \text{ (εξίσωση 4-41)}$$

Σε περίπτωση κατά την οποία η ηχητική πηγή έχει **Κατευθυντικότητα (DI)** δηλαδή συγκέντρωση διαδόσεως της ηχητικής ενέργειας προς μια ορισμένη κατεύθυνση τότε η παραπάνω εξίσωση ισχύει ως εξής:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 + DI \text{ (dB)} \text{ (εξίσωση 4-42)}$$

#### **4-7. ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΧΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΜΑΖΑΣ**

Α) Δίδεται ένα απορροφητικό πλαίσιο οπών ακτίνας  $r = 1,5$  mm και βάθους οπής  $l = 3,5$  mm. Ζητείται να προσδιορισθεί η ενεργός μάζα του εφ' όσον υφίσταται 4 οπές ανά τετράγωνο πλευράς  $L = 36$  mm.

#### Λύση

Από την σχέση 4-11 προκύπτει ότι:

$$\sigma = \frac{\sum S_0}{\sum S_U} (1) \quad \text{όπου } \sum S_0 = 4\pi r^2 \text{ και } S_U = L^2 \text{ εδώ:}$$

$$r = 1,5 \text{ mm} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m και,}$$

$$L = 36 \text{ mm} = 36 \times 10^{-3} \text{ m άρα:}$$

$$\sigma = \frac{4\pi(1,5^2)(10^{-6})}{36^2(10^{-6})} = 0,0218$$

ακολούθως από την σχέση 4-15 προκύπτει ότι:

$$m' = \frac{\rho(1 + 2\Delta l)}{\sigma} = \frac{\rho(1 + 1,6 r)}{\sigma}$$

Συνεπώς:

$$m' = \frac{1,2[3,5(10^{-3}) + 1,6(1,5)(10^{-3})]}{21,8} = \frac{1,2(3,5 + 2,4)}{21,8} = 0,325 \text{ kg m}^{-2}$$

B) Δίδεται ένα απορροφητικό πλαίσιο σχισμών εύρους σχισμής  $w = 20 \text{ mm}$  και εύρους διακένου μεταξύ σχισμών  $w = 50 \text{ mm}$ . Ζητείται να προσδιορισθεί η ενεργός μάζα του εφ' όσον το βάθος των σχισμών είναι  $l = 25 \text{ mm}$ .

### Λύση

Από την σχέση 4-18 προκύπτει ότι:

$$\sigma = \frac{20}{20 + 50} = \frac{20}{70} = 0,2857 \Rightarrow \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{0,2857} = 3,5$$

ακολουθώντας από το διάγραμμα του Σχήματος 4-3 με  $\frac{1}{\sigma} = 3,5$

προκύπτει ότι:

$$\frac{2\Delta l}{w} = 0,62 \quad \text{οπότε:}$$

$$2\Delta l = 0,62 w = 0,62(20)(10^{-3}) \text{ m} = 12,4(10^{-3}) \text{ m}$$

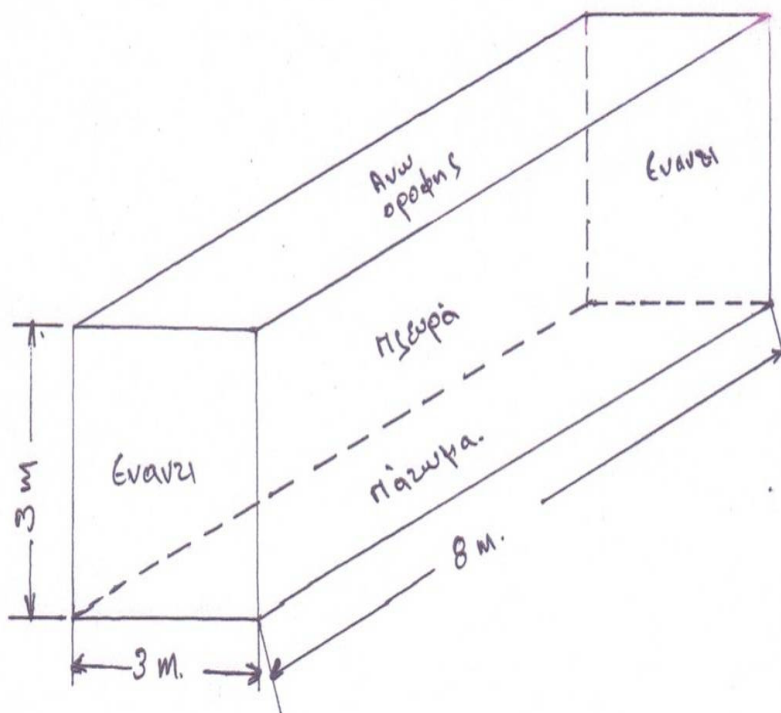
Συνεπώς λόγω της σχέσεως 4-18 προκύπτει ότι:

$$m' = \frac{\rho(1 + 2\Delta l)}{\sigma} = \frac{1,2[(25)(10^{-3}) + (12,4)(10^{-3})]}{0,2857} = 0,157 \text{ kg m}^{-2}$$



Γ) Ζητείται να υπολογιστεί η εφαρμοζόμενη ενεργή μάζα των δύο παραπάνω τύπων πλαισίων για την ηχοαπορρόφηση αίθουσας διαστάσεων μήκους 8m, πλάτους 3m και ύψους 3m (8m×3m×3m) όπως φαίνεται στο σχήμα 4-7, με χρήση πλαισίων σχισμών στις επιφάνειες άνω και πλευρικών θέσεων και χρήση πλαισίων οπών στις επιφάνειες κάτω και έναντι θέσεων. Τα χαρακτηριστικά των πλαισίων αναφέρονται στις δύο προηγούμενες εφαρμογές.

### Λύση



**Σχήμα 4-7**

Επιφάνειες άνω και πλευρικών θέσεων

Συνολικά τετραγωνικά μέτρα:

$$8\text{m} \times 3\text{m} = 24\text{m}^2 \text{ για κάθε πλευρά}$$

$$3 \text{ πλευρές} \times 24\text{m}^2 \text{ για κάθε πλευρά}$$

$$\text{Σύνολο} = 72\text{m}^2$$

$$72\text{m}^2 \times 0,325 \text{ kg m}^{-2} \text{ ανά πλαίσιο (από παράδειγμα εφαρμογής A)}$$

$$\text{Σύνολο} = 23,4\text{kgr (1)}$$

Επιφάνειες κάτω και έναντι θέσεων

Συνολικά τετραγωνικά μέτρα:

Πάτωμα

$$8\text{m} \times 3\text{m} = 24\text{m}^2$$

Έναντι θέσεις

$$3\text{m} \times 3\text{m} = 9 \text{ m}^2 \times 2 \text{ επιφάνειες} = 18 \text{ m}^2$$

Σύνολο

$$24 \text{ m}^2 + 18 \text{ m}^2 = 42 \text{ m}^2$$

$$42 \text{ m}^2 \times 0,157\text{kg m}^{-2} \text{ ανά πλαίσιο (από παράδειγμα εφαρμογής B)}$$

$$\text{Σύνολο} = 6,594 \text{ kgr (2)}$$

Τελικό βάρος πλαισίων τύπου A+ B:

$$\text{Σύνολο (1) + (2)} = 23,4 \text{ kgr} + 6,594 \text{ kgr} = 29,994 \text{ kgr}$$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα προηγούμενα είναι κατανοητό ότι για τον σχεδιασμό στην χρήση ηχοαπορροφητικών συστημάτων πλαισίων πρώτος λόγος δίδεται στην φύση της χρήσεως ενδεχόμενης κατασκευής π.χ. αίθουσα μουσικής – αίθουσα συνεδρίων κ.λ.π., στην μορφή της αίθουσας ( αντανακλώμενες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες) και στην συνέχεια ακολουθούν οι διάφοροι υπολογισμοί που τελειοποιούν τόσο την χρήση όσο και την μορφή της κατασκευής.

Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν τα κυματικά φαινόμενα που περιγράψαμε, την ηχοαπορρόφηση του αέρα, την γεωμετρία και συμμετρία στο φαινόμενο διάδοσης του ήχου και ηχοαπορρόφησης αυτού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Άγγελος Ι. Μπρατάκος (φυσικός, καθηγητής ΚΑΤΕΕ Πειραιώς). 1981. Φυσική Ι: Μηχανική θερμότητα – Ακουστική. Αθήνα
- Ι. Γ. Ιωάννου (μηχανικός ακουστικής). 1997. Ακουστική για ηχολήπτες. Εκδόσεις ΙΩΝ. Αθήνα
- Χρήστος Καρακίτσιος. 2001. Οργάνωση και χειρισμός ηχητικών συστημάτων (P.A.). Εκδόσεις ΙΩΝ. Αθήνα
- John M. Eargle. Μουσική ακουστική τεχνολογία. Εκδόσεις ΙΩΝ