

**ΣΧΟΛΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΩΝ 1994- 1998**

***Η ΑΚΟΟΜΕΤΡΙΑ***  
***με λίγα λόγια***

***Μαρία Λύρα Γεωργοσοπούλου***  
***Επικ. Καθηγήτρια Παν/μίου Αθηνών***

**Αθήνα**

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η αίσθηση της ακοής οφείλεται στ'ότι έχουμε την ικανότητα ν'αντιληφθούμε τα κύματα του ήχου που ταξιδεύουν μέσα στον αέρα.

Όργανο -εργαλείο του ανθρώπου το αυτί είναι ευαίσθητο στα φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου.

Η ομιλία, μία άλλη σημαντική ικανότητα του ανθρώπου, του δίνει την δυνατότητα επικοινωνίας μέσα από την παραγωγή ήχων.

Γι'αυτή την γνώση των ικανοτήτων μας θα συζητήσουμε στοιχεία της φυσικής της ακοής και ομιλίας.

**Μαρία Λύρα - Γεωργοσοπούλου**

**Αθήνα, 1994**

## ΑΚΟΟΜΕΤΡΙΑ

### Ανατομία και φυσιολογία αυτιού

Το αυτί είναι ένας μετατροπέας που συνδέεται με τον εγκέφαλο μέσω του 8ου κρανιακού νεύρου. Ο ήχος διαδίδεται στον **ακουστικό πόρο** και προκαλεί το **τύμπανο** του αυτιού (την **τυμπανική μεμβράνη**) να ταλαντωθεί. Το τύμπανο έχει σχήμα ωοειδές, πλάτος 8 mm και πάχος 0.1 mm.

Οι ταλαντώσεις της μεμβράνης (που έχουν πλάτος  $10^{-10}$ m, για χαμηλής έντασης ήχο) προκαλούν τα **οστάρια** στο **μέσο αυτί** να ταλαντώνονται. Τα οστάρια μεταδίδουν τις ταλαντώσεις στην **ωοειδή μεμβράνη** που καλύπτει την είσοδο του **γεμάτο υγρό έσω αυτιού**.

Τα οστάρια είναι αδιάφορα στις ταλαντώσεις του κρανίου αλλά είναι ικανά να μεγεθύνουν της μεταβολές πίεσης που εφαρμόζονται στο τύμπανο περίπου κατά 2-3 φορές. Μπορούν όμως και να ελαττώσουν τον ήχο, ώστε σε ανάγκη προστατεύουν το αυτί από ανεπιθύμητο θόρυβο (Οι μύες τραβούν το οστάριο -αναβολέας- μακριά από την ωοειδή θυρίδα). Η μεγαλύτερη ενίσχυση γίνεται στο μέσο αυτί κυρίως γιατί η ωοειδής θυρίδα έχει 20-30 φορές μικρότερη επιφάνεια απ' αυτή του τύμπανου. Αυτές οι μεγεθυμένες μεταβολές πίεσης δρουν μέσα στον **κοχλία** του **έσω αυτιού** που μετατρέπει την **ενέργεια ταλάντωσης** (μηχανική) σε **ηλεκτρική** ενέργεια.

Το μέσο αυτί είναι γεμάτο αέρα και επικοινωνεί μέσω της ευσταχιανής σάλπιγγας και του φάρυγγα με τον λάρυγγα. Αν αυτοί οι δίοδοι είναι ανοικτοί, τότε και **οι δύο πλευρές του τύμπανου** του αυτιού είναι στην αυτή πίεση (ισορροπία πίεσης). Έτσι το αυτί **δεν αισθάνεται μια πολύ αργή αλλαγή** στην πίεση. Μολύνσεις του μέσου αυτιού ή του φάρυγγα μπορεί να κλείσουν τις διόδους με αποτέλεσμα να υπάρχει μια μη φυσιολογική και καθόλου

ευχάριστη ευαισθησία στις μεταβολές πίεσης (όπως συμβαίνει στ' αεροπλάνα σε απότομες μεταβολές ύψους).

Το κομμάτι του έσω αυτιού που αποτελείται από τρία ημικυκλικά κανάλια γεμάτα υγρό, δεν χρησιμεύει σαν μετατροπέας του ήχου. Στέλνει νευρικά σήματα στον εγκέφαλο για τη διατήρηση της ισορροπίας. Τα κανάλια βρίσκονται σε 90° σχεδόν το ένα ως προς το άλλο.

Κάθε **κίνηση του κεφαλιού** προκαλεί την κίνηση του υγρού μέσα στα κανάλια που περιέχουν τριχοειδή κύτταρα που αντιλαμβάνονται αυτή την κίνηση. Τα τριχοειδή προκαλούν νευρικές ώσεις που χρησιμοποιεί ο εγκέφαλος για να διατηρηθεί το αίσθημα της ισορροπίας.

### **Θεωρίες ακοής**

Με βεβαιότητα μπορούμε να πούμε ότι το πιο **πολύπλοκο** μέρος του αυτιού είναι ο **κοχλίας**. Είναι σωλήνας, 35 mm διάμετρο, μακρύς και περιτυλιγμένος σχηματίζει δυόμισι στροφές. Ο σωλήνας (κοχλίας) διαιρείται καθ' όλο το **μήκος** από τη βασική μεμβράνη.

**Τα οστάρια**, ανταποκρινόμενα σε μια ηχητική διέγερση, κινούν την **ωοειδή θυρίδα** και η διατάραξη του υγρού περνά μέσα από τον κοχλία. Στο πέρασμά της, η διατάραξη, διαστρέφει τη **βασική μεμβράνη, χιλιάδες ευαίσθητα τριχοειδή κύτταρα** πάνω της μετατρέπουν την διαστροφή σε **νευρικές ώσεις**.

Υψηλής συχνότητας ήχοι διαταράσσουν μόνον τη βασική μεμβράνη κοντά στην ωοειδή θυρίδα ενώ χαμηλότερες συχνότητες μεταφέρονται σ' όλο το μήκος του κοχλίου. Π.χ. πιστεύεται ότι: ήχος συχνότητας 3 KHz προκαλεί διαταραχή στη **μισή μεμβράνη** προς το κάτω μέρος του κοχλίου ενώ ήχος 50 Hz ενεργεί **σ' ολόκληρη** τη βασική μεμβράνη. Για να αντιληφθούμε ένα ήχο είναι ανάγκη να έχουμε πληροφορίες και για την **συχνότητα** και την **ένταση** αυτού. **Γενικά, το σώμα αντιλαμβάνεται αύξηση έντασης μιας αίσθησης με αύξηση της συχνότητας που γεννά νευρικές ωθήσεις.**

Μια θεωρία δέχεται ότι:

1. **Διαφορετικά μέρη του κοχλίου** ανταποκρίνονται σε **διαφορετικές συχνότητες** του ήχου και ότι

2. **ο αριθμός των νευρικών ώσεων** που παράγονται από κάποιο τμήμα του κοχλίου **καθορίζεται από την ένταση** του ήχου συγκεκριμένης συχνότητας. Αυτή η θεωρία είναι πολύ απλή αλλά δυστυχώς δεν εξηγεί όλα τα φαινόμενα. Πειράματα σε ζώα έδειξαν ότι: **Όταν η ένταση του ήχου αυξάνει**, δεν αυξάνει μόνον **ο αριθμός των νευρικών ώσεων σε μια νευρική ίνα** αλλά διεγείρονται και **περισσότερες νευρικές ίνες**. Έχει ακόμηδειχθεί ότι: **Η συχνότητα** του ήχου αλλάζει και τον **αριθμό των ενεργών νευρικών ινών** και τη **συχνότητα αποφόρτισής τους**.

Ενώ γνωρίζουμε λίγα γύρω από τον τρόπο που ο κοχλίας μετασχηματίζει τον ήχο ακόμη λιγότερο μας είναι γνωστός ο τρόπος που ο εγκέφαλος ερμηνεύει τα σήματα.

## **Μετρήσεις ακοής**

Η ακουστική οξύτητα ενός ανθρώπου εκφράζεται σαν την ικανότητα ν' ακούει τους ήχους χαμηλότερης εντάσεως. Η ικανότητα αυτή ποικίλλει στις διάφορες συχνότητες όχι μόνο παθολογικά αλλά και φυσιολογικά και εκφράζεται σε καθαρούς ήχους. Στην "**ακοομετρία καθαρών ήχων**" μια σειρά από πρότυπους ήχους παράγονται και ο άρρωστος ερωτάται εάν μπορεί ν' ακούσει τους ήχους. Αυτή η μέθοδος χρησιμεύει στη διάγνωση της παθολογίας του αυτιού και ακόμη βοηθά στο σχεδιασμό της θεραπείας. Ακοομετρία "**ακουστικής αντίστασης**" μέσου ωτός είναι μια άλλη δοκιμασία ακοής που δίνει τη δυνατότητα μιας αντικειμενικής μέτρησης της λειτουργίας του μέσου ωτός. Για τον έλεγχο της ακουστικής οξύτητας ειδικά στην **ομιλία** χρησιμοποιούνται τ' ακοογράμματα ομιλίας.

## **Ακουστικά βαρηκοΐας**

Κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1930 αλλά εκτός ότι ήταν άβολες συσκευές, παρήγαν και ήχο πολύ χαμηλής ποιότητας. Αυτά ήταν μικρόφωνα με ενισχυτές από κόκκους άνθρακα. Οι ενισχυτές του άνθρακα αντικαταστάθηκαν από μινιατούρες λοχοτές και τα μικρόφωνα από πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα. Το 1950 εισήχθησαν τα transistors και σήμερα

χρησιμοποιούνται ενισχυτές με ολοκληρωμένα κυκλώματα. Πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα χρησιμοποιούνται ακόμη μόνον που το φυσικό πιεζοηλεκτρικό υλικό (χαλαζίας) έχει αντικατασταθεί από συνθετικό κεραμικό.

Βασικό χαρακτηριστικό των ακουστικών βαρηκοΐας θα πρέπει να είναι: Η μέγιστη ένταση ήχων που παρέχουν να έχει ανώτατο όριο ασφαλείας, ανεξάρτητο από την ένταση των ήχων του περιβάλλοντος.

## **Ομιλία - Ηχος – Ακοή**

Ο ήχος διαδίδεται σαν επιμήκες κύμα στον αέρα. Όταν κάποιος μιλά, αέρας βγαίνει από τους πνεύμονες του προς τον λάρυγγα, περνά δυο ελαστικές χορδές, τις φωνητικές χορδές, μέσα στον λάρυγγα. Η ροή του αέρα που περνά τις φωνητικές χορδές τις προκαλεί σε ταλάντωση και το μέγεθος του ανοίγματος μεταξύ αυτών μεταβάλλεται περιοδικά.

Ο αέρας συνεπώς εξέρχεται κατά μικρές ποσότητες που ακολουθούν η μια την άλλη ταχύτητα.

Ο αριθμός αυτών των ποσοτήτων ανά δευτερόλεπτο καθορίζει τη συχνότητα (το ύψος) του ήχου που εξέρχεται από το στόμα. Καθώς μια ποσότητα αέρα εξέρχεται, η πίεση του αέρα κοντά στο στόμα αυξάνει. Τα μόρια του αέρα κοντά στο στόμα κινούνται για ν' αποδώσουν την επιπλέον πίεση, συγκρούονται με τα γειτονικά μόρια και τα συμπιέζουν. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και η περιοχή υψηλής πίεσης κινείται προς τα έξω με την ταχύτητα του ήχου.

Όταν τα ηχητικά κύματα που ονομάζουμε φωνή προσπέσουν πάνω στη μεμβράνη που ονομάζουμε «τύμπανο αυτιού» την προκαλούν να ταλαντωθεί μπρος πίσω με την ίδια συχνότητα όπως οι φωνητικές χορδές.

Ακουστικοί μηχανισμοί στο αυτί μετατρέπουν αυτή την ταλάντωση σε σειρά ηλεκτρικών παλμών που διαμέσου των νεύρων φθάνουν στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η συχνότητα άφιξης των ηλεκτρικών παλμών είναι ακριβώς η ίδια όπως η συχνότητα ταλάντωσης των φωνητικών χορδών.

## Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ήχου

### 1) Ύψος του ήχου είναι εμπειρική έννοια.

Εν τούτοις κάθε άνθρωπος έχει το αίσθημα του ύψους και μπορεί να κρίνει μεταξύ δύο ήχων ποιος είναι ο οξύτερος.

Το ύψος του ήχου εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος και είναι οξύτερος όταν η συχνότητα γίνει μεγαλύτερη.

Οι θόρυβοι δεν έχουν το χαρακτηριστικό του ύψους αν και σε μερικές περιπτώσεις μπορούμε και σ' αυτούς να αντιληφθούμε ύψος.

### 2) Ακουστότης ή ηχοαίσθημα ή ένταση υποκειμενικού αισθήματος.

Δυο απλοί ήχοι της αυτής συχνότητας αλλά διαφορετικών εντάσεων δίδουν σ' εμάς την εντύπωση δυο ήχων που έχουν το αυτό ύψος αλλά διάφορο ακουστότητα.

Η ακουστότητα  $A$  εξαρτάται από την ένταση  $J$  του ήχου. Όταν η ένταση του ήχου είναι μικρότερη μιας τιμής  $J_0$ , η ακουστότης είναι ίση με μηδέν, δηλαδή ο ήχος δεν είναι ακουστός. Την ένταση αυτή ορίζουμε σαν κατώφλι ακουστότητας.

Η σχέση μεταξύ της ακουστότητας  $A$  και της έντασης  $J$  του ήχου είναι λογαριθμική και εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και την ιδιοσυγκρασία του ακροατού. Η λογαριθμική σχέση μεταξύ της ακουστότητας και της εντάσεως του προκαλούντος ήχου αποτελεί περίπτωση του νόμου των Weber-Fechner (νόμος ψυχοφυσικής) που συνδέει, γενικά την ένταση οποιουδήποτε υποκειμενικού αισθήματος με την ένταση του αντίστοιχου ερεθίσματος.

Για τη μέτρηση των ακουστοτήτων χρησιμοποιείται η μονάδα **Phon** που λαμβάνεται τέτοια ώστε, ήχος μόλις ακουστός να προκαλεί ακουστότητα μηδέν **Phon** και ήχος έντασης τέτοιας ώστε να προκαλείται πόνος να είναι

ακουστότητας **130 Phon** (Ο ορισμός του Phon ισχύει για την πρότυπο συχνότητα 1000Hz).

### 3) Χροιά

Είναι το υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου που μας δίνει τη δυνατότητα να ξεχωρίσουμε δυο διαφορετικά όργανα που παράγουν ήχους της αυτής ακουστότητας.

Η χροιά παρουσιάζεται στους σύνθετους ήχους και εξαρτάται από το λόγο  $A_i/A_\theta$  του πλάτους κάθε ανώτερης αρμονικής  $A_i$  δια του πλάτους  $A_\theta$  της θεμελιώδους.

### **Μουσικά όργανα**

Τα μουσικά όργανα χρησιμοποιούν διαφορετικά είδη ταλαντούμενων υλικών για να παράγουν ήχο.

Μεμβράνη (τύμπανο), μεταλλικά κομμάτια (ξηλόφωνο, καμπάνα) ταλαντούμενες χορδές (βιολί, πιάνο, κιθάρα) ταλαντούμενη στήλη αέρα (φλογέρες).

Σε κάθε είδους μουσικό όργανο δημιουργούνται στάσιμα κύματα. Η συχνότητα ενός μουσικού ήχου καθορίζεται από την απλούστερη αρμονική συχνότητα τη θεμελιώδη.

Σ' ένα ταλαντούμενο σώμα, όπως η χορδή ενός μουσικού οργάνου μπορεί να δημιουργηθούν στάσιμα κύματα. Η χαμηλότερη συχνότητα,  $f_0$ , ονομάζεται **θεμελιώδης** και είναι η ιδιοσυχνότητα του αντικειμένου: η ταλάντωση τότε έχει το μέγιστο πλάτος της. Οι υψηλότερες συχνότητες που μπορεί επίσης να ταλαντωθεί είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους και ονομάζονται **αρμονικές**. Η αύξηση του αριθμού μιας αρμονικής ( $1^{\eta}$ ,  $2^{\eta}$ ,  $3^{\eta}$  ...) ενέχει παράλληλη μείωση του πλάτους της ταλάντωσης.

Η ποιότητα ενός μουσικού ήχου εξαρτάται από το μίγμα των αρμονικών που είναι παρούσες.

Τα διάφορα όργανα δημιουργούν (δίδουν έμφαση) διαφορετικές αρμονικές και έχουν διαφορετική χροιά ή ποιότητα.



## **Θόρυβος**

Ένας συνήθης θόρυβος όπως ο ήχος ενός σφυριού που κτυπά καρφί, έχει μια ορισμένη ποιότητα (χροιά) αλλά συνήθως λείπει μια διακεκριμένη συχνότητα (ο ήχος του είναι απεριοδικός).

Αυτοί οι θόρυβοι είναι μείγματα μιας μεγάλης ποικιλίας συχνοτήτων που έχουν πολύ μικρή σχέση μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει γιατί τα αντικείμενα που προκαλούν θόρυβο συνήθως, δεν είναι τόσο απλά όπως μια χορδή ή μια λεπτή στήλη αέρα και γι' αυτό έχουν και πολυσύνθετη ομάδα από συχνότητες συντονισμού. Καμιά συχνότητα δεν κυριαρχεί, κι αυτές που είναι παρούσες δεν συσχετίζονται απλά η μια με την άλλη όπως συμβαίνει με τα μουσικά όργανα. Ο θόρυβος είναι ακανόνιστος, απεριοδικός ήχος και το πλάτος του αυξομειώνεται τυχαία.

## **Ηχορύπανση**

Αύξηση της έντασης του ήχου στο περιβάλλον διαμονής και εργασίας μπορεί να προκαλέσει βλάβες. Μετά μακροχρόνια δράση, βλάβες προκαλούνται από ήχους έντασης μεγαλύτερης από 80 ή 90 dB όπως:

1. ελάττωση ακουστικής οξύτητας
2. ψυχολογικές διαταραχές
3. Αϋπνία

Ελάττωση ακουστικής οξύτητας παρατηρείται κυρίως σε εργάτες ορισμένων βιομηχανιών, σε μουσικούς συγκροτημάτων μοντέρνας μουσικής. Η ελάττωση ακουστικής οξύτητας αρχίζει για τους κατοίκους της πόλης σε ηλικία 25-30 ετών, ενώ σε λαούς που ζούν σε ήρεμο περιβάλλον η ελάττωση είναι μικρότερη και αρχίζει σε μεγαλύτερη ηλικία.

## **Κρούση του θώρακα**

Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα ο Auenbrugger καθιέρωσε τη διάγνωση παθήσεων του θώρακα ερμηνεύοντας τους διαφορετικού ήχους που ακούγονται κατά την κρούση του θώρακα του αρρώστου σε διάφορα σημεία. Κατ' αυτήν τα

δάκτυλα του ενός χεριού στηρίζονται στο δέρμα και με τα δάκτυλα του άλλου χεριού δίδονται μικρά χτυπήματα στο πρώτο. «Ο ήχος που ακούγεται», έγραφε χαρακτηριστικά ο Auenbrugger, «από υγιή θώρακα μοιάζει με τον ήχο τυμπάνου καλυμμένου με χονδρό μάλλινο ύφασμα». Η κρούση του θώρακα είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα στη διάγνωση διαφόρων παθήσεων (όπως π.χ. παρουσία κοιλοτήτων σε διάφορα όργανα ή υγρού στο θώρακα).

## **Στηθοσκόπιο**

Αυτό το απλό όργανο βοηθάει το γιατρό ν' ακούσει τους ήχους που προκαλούνται μέσα στο σώμα, ιδιαίτερα στην καρδιά και στους πνεύμονες.

Τα κύρια μέρη του στηθοσκοπίου είναι τα ακουστικά, ο σωλήνας και το κουδούνι που είτε είναι ανοικτό ή κλειστό με λεπτό διάφραγμα.

Το ανοικτό κουδούνι έχει τιμή ακουστικής αντίστασης μεταξύ αυτής του αέρα και του δέρματος του σώματος, και συγκεντρώνει ήχους από την επιφάνεια που έρχεται σ' επαφή.

Το δέρμα κάτω από το ανοικτό κουδούνι συμπεριφέρεται σαν διάφραγμα. Το δέρμα-διάφραγμα έχει μια φυσική θεμελιώδη συχνότητα που σ' αυτήν μεταφέρει τα κύματα του ήχου πιο αποδοτικά. Η συχνότητα συντονισμού του δέρματος είναι μεγαλύτερη όσο η τάση (το τέντωμα) του δέρματος είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα γίνεται μικρότερη όσο η διάμετρος του κουδουνιού μεγαλώνει. Ετσι είναι δυνατόν να αυξήσουμε το εύρος των συχνοτήτων αλλάζοντας το μέγεθος του κουδουνιού ή την πίεση του κουδουνιού πάνω στο δέρμα. Ετσι ένας χαμηλής συχνότητας ψίθυρος της καρδιάς εξαφανίζεται αν το στηθοσκόπιο πιεσθεί πολύ πάνω στο δέρμα.

Ενα κλειστό κουδούνι είναι απλά ένα κουδούνι με διάφραγμα γνωστής συχνότητας συντονισμού συνήθως υψηλής. Το στηθοσκόπιο με κλειστό κουδούνι χρησιμεύει κυρίως για ν' ακούσουμε τους ήχους των πνευμόνων που είναι υψηλότερης συχνότητας από τους ήχους της καρδιάς.

Όσο μικρότερο είναι το κουδούνι τόσο (πιο ευαίσθητο) καλύτερο το στηθοσκόπιο. Διότι, όσο μικρότερος είναι ο όγκος του αέρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή πίεσης, για δεδομένη κίνηση του διαφράγματος στην άκρη της καμπάνας. Ο όγκος του σωλήνα πρέπει κι αυτός να είναι μικρός και να

προκαλεί όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες ήχου λόγω τριβής στα τοιχώματα του σωλήνα. Τα ακουστικά πρέπει να εφαρμόζουν στ' αυτιά γιατί διαρροές αέρα μειώνουν τη δυνατότητα ακοής των ήχων και όσο μικρότερη είναι η συχνότητα τόσο σημαντικότερη είναι η διαρροή. Με την κακή εφαρμογή των ακουστικών υπόστρωμα- θόρυβος εισέρχεται στο αυτί.

*Μαρία Λύρα Γεωργοσοπούλου*  
*Μονάδα Ακτινοφυσικής,*  
*Εργ. Ακτινολογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών*