

Κεφάλαιο 1

ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΉΧΟΥ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

(Αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου)

Η μελέτη του ήχου είναι το αντικείμενο της ακουστικής, η οποία είναι ο κλάδος της φυσικής που ασχολείται με τη θεωρητική και πειραματική μελέτη των φαινομένων που σχετίζονται με τον ήχο.

Περιλαμβάνει την κυρίως ακουστική που ασχολείται με την αντικειμενική ανάλυση των ηχητικών φαινομένων και την ψυχοακουστική που ασχολείται με το αισθητήριο της ακοής και την υποκειμενική μελέτη του ήχου. Ειδικότερα η ψυχοακουστική περιλαμβάνει τις μεθόδους για τον προσδιορισμό των σχέσεων μεταξύ ψυχολογικών και φυσικών μετρήσεων αισθητηριακών φαινομένων. Παράλληλα μελετάει τον τρόπο που αλλάζουν οι αισθητηριακές εμπειρίες σε σχέση με την τροποποίηση μιας ή περισσότερων παραμέτρων του ήχου.

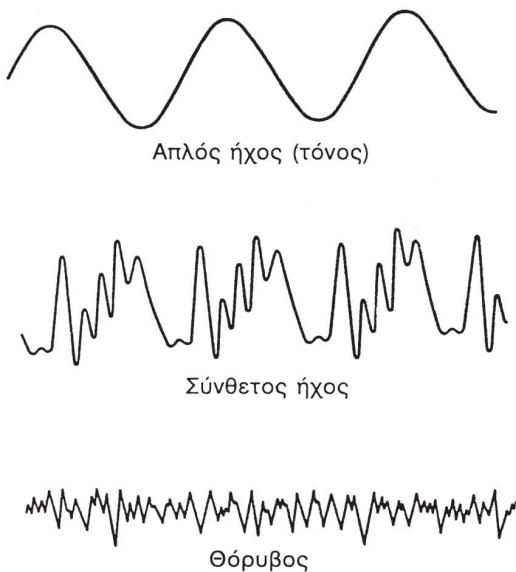
Επειδή ο ήχος αποτελεί το φυσιολογικό ακουστικό ερέθισμα, μια σύντομη παράθεση των βασικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του θα επιτρέψει την καλύτερη κατανόηση των φυσικών όρων και των μετρήσεων που θα εκτεθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Στη φυσιολογία της ακοής, ήχος είναι το αίτιο που είναι ικανό να διεγείρει το αισθητήριο όργανο της ακοής.

Στη φυσική, ήχος ονομάζεται το φαινόμενο που προκαλείται από ελαστική ταλάντωση υλικών σωμάτων και διαδίδεται με μορφή ελαστικών κυμάτων, των ηχητικών, διά μέσου υλικών μέσων διάδοσης, δηλ. στερεών, υγρών ή αερίων. Ο ήχος προϋποθέτει, όπως αναφέρθηκε, ταλάντωση κάποιου μέσου και επομένως δε διαδίδεται διά του κενού.

Απλός ήχος. Ο ήχος λέγεται απλός όταν προέρχεται από καθαρά αρμονική ή ημιτονική ταλάντωση με μία μόνο καθορισμένη συχνότητα και λέγεται αλλιώς και **τόνος ή καθαρός τόνος** (*Εικ. 1-1*).

Σύνθετος ήχος. Σύνθετος ονομάζεται ένας ήχος όταν προέρχεται από περιοδική αλλά όχι ημιτονική ταλάντωση και μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα ενός απλού θεμελιώδους ήχου και πολλών αρμονικών, των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Στους ήχους κατατάσσονται επίσης οι θόρυβοι και οι κρότοι.



Εικ. 1-1. Διάφορα είδη ήχων.

Θόρυβος είναι ήχος προερχόμενος από ακανόνιστες, μη περιοδικές δονήσεις, δυσάρεστος στην ακοή.

Κρότος είναι ο ήχος που προέρχεται από ισχυρές και απότομες δονήσεις, διαδιδόμενος στον αέρα με απότομες μη περιοδικές μεταβολές της πίεσης, υπό μορφή ακανόνιστων παλμών. Δεν ταυτίζεται με το θόρυβο.

Ηχητικά κύματα. Ηχητικό κύμα ονομάζεται το κύμα που προκαλείται στον αέρα από ηχογόνα σώματα. Τα ηχητικά κύματα δε διαδίδονται στο κενό αλλά μέσα σε υλικό σώμα. Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο γύρω από την ηχητική πηγή και η έντασή τους ελαττώνεται κατά αντίστροφο όρο προς το τετράγωνο της απόστασης από την ηχητική πηγή. Δηλαδή αν ένα άτομο διπλασιάσει την απόστασή του από την ηχητική πηγή, η ένταση του

ήχου θα είναι τέσσερις φορές μικρότερη, αν τριπλασιάσει την απόστασή του θα είναι εννέα φορές και ούτω καθεξής.

Όταν οι διαταραχές διαδίδονται προς μία μόνο κατεύθυνση, τα κύματα λέγονται **επίπεδα**, ενώ όταν η διαταραχή διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις από μία σημειακή πηγή κυμάτων λέγονται **σφαιρικά**.

Όταν οι κινήσεις των υλικών σωμάτων, που μεταφέρουν το κύμα, είναι κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, τότε το κύμα λέγεται **εγκάρσιο**.

Όταν η κίνηση των σωματίων που μεταφέρουν το κύμα γίνεται προς τα εμπρός και προς τα πίσω κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης τότε το κύμα λέγεται **διάμηκες**. Ο ήχος π.χ. οφείλεται σε διαμήκη κύματα που προέρχονται από την ταλάντωση των μορίων του αέρα παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης του ήχου.

Ταξιδεύον ή οδεύον ή τρέχον κύμα είναι το κύμα που διαδίδεται προς ορισμένη διεύθυνση του χώρου και που μεταφέρει ενέργεια κατά τη διεύθυνση αυτή. Τυπικό παράδειγμα είναι το επίπεδο κύμα που διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο. Ο όρος ταξιδεύον κύμα χρησιμοποιείται κυρίως σε αντίθεση με την έννοια του στάσιμου κύματος.

Στάσιμο κύμα. Όταν δύο κύματα έχουν το ίδιο πλάτος και το ίδιο μήκος κύματος αλλά διαδίδονται κατά αντίθετη διεύθυνση, από τη συμβολή τους δεν προκύπτει τρέχον κύμα αλλά μια ταλάντωση που ονομάζεται στάσιμο κύμα. Τα σημεία όπου η ταλάντωση παίρνει τη μέγιστη τιμή ονομάζονται κοιλίες του στάσιμου κύματος και τα σημεία που η ταλάντωση είναι διαρκώς ίση προς το μηδέν ονομάζονται δεσμοί. Στα τρέχοντα κύματα, οι φάσεις με-

τακινούνται με την πάροδο του χρόνου ενώ στα στάσιμα κύματα δεν παρατηρείται μετακίνηση των φάσεων· το κύμα δηλ. δεν προχωρεί, γι' αυτό ονομάζεται στάσιμο κύμα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών ισούται με το μισό του μήκους κύματος.

Πλάτος του κύματος είναι το μέγιστο της κίνησης των σωματίων.

Ακτίνα κύματος ονομάζεται η διεύθυνση διάδοσης.

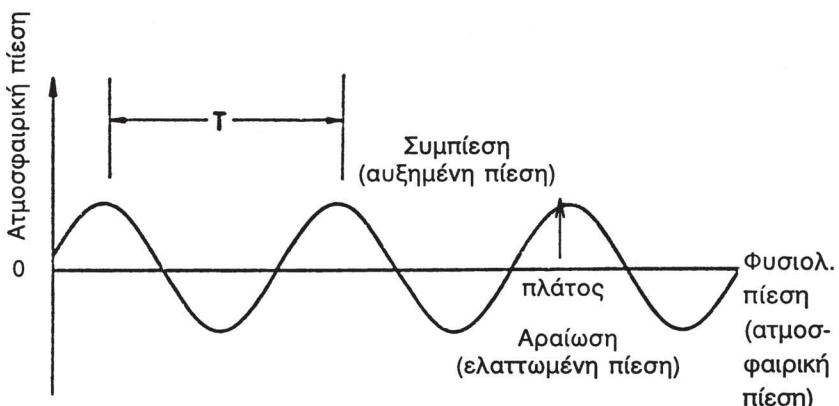
Διάδοση του ήχου. Ο όρος γενικά σημαίνει την εξάπλωση στο χώρο ενός φυσικού μεγέθους, συνήθως κυματικού. Η διάδοση του ήχου απαιτεί ένα υλικό φορέα. Η ταχύτητα διάδοσης (v) του ήχου εντός αερίου εξαρτάται από τη φύση αυτού και είναι ανάλογη προς \sqrt{T} όπου T η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου, αλλά δεν εξαρτάται από την πυκνότητα αυτού. Η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι υπό κανονικές συνθήκες, ίση προς 340 m/sec.

Ταχύτητα διάδοσης (v) ονομάζεται η ταχύτητα με την οποία κινείται μια ορισμένη κορυφή κύματος.

Απόσβεση είναι η συνεχής μείωση του πλάτους μιας ταλάντωσης εξαιτίας διαφόρων αντιστάσεων (π.χ. τριβής).

Εξασθένηση του κύματος σημαίνει ελάττωση της έντασής του γιατί μέρος της ενέργειάς του μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας π.χ. θερμότητα.

Στον αέρα τα ηχητικά κύματα εμφανίζονται ως μετακινούμενα πυκνώματα και αραιώματα, δηλ. ως διαδιδόμενες μεταβολές της πίεσης και επομένως ένα ηχητικό κύμα μπορεί να θεωρείται ως κύμα απομάκρυνσης και πίεσης. Τα μόρια όμως του αέρα δε μετακινούνται μαζί με το κύμα αλλά εκτελούν ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας τους. Όταν οι μεταβολές της ηχητικής πίεσης γίνονται σύμφωνα με το νόμο του ημίτονου, το κύμα λέγεται **ημιτονικό ή αρμονικό** δηλ. όταν οι κινήσεις των μορίων του αέρα που μεταφέρουν το κύμα επαναλαμβάνονται κατά χρονικά διαστήματα ίσα προς την περίοδο T . Αρμονική ή ημιτονική ταλάντωση είναι μια περιοδική κίνηση που η απομάκρυνση του κινητού από τη θέση ισορροπίας παριστάνεται, σε συνάρτηση με το χρόνο, με μία ημιτονική καμπύλη, τη γνωστή κυματοειδή καμπύλη ή με την εξίσωση $a = A_0 \sin(\omega t + \phi)$ όπου a η απομάκρυνση κατά τη στιγμή t , A_0 το πλάτος, δηλ. η μέγιστη απομάκρυνση, ω η κυκλική συχνότητα και ϕ η φάση της κίνησης (**Εικ. 1-2**).



Εικ. 1-2. Ημιτονική καμπύλη

Η αρμονική ταλάντωση είναι η απλούστερη περίπτωση περιοδικού φαινομένου. Όλα τ' άλλα συνθετότερα περιοδικά φαινόμενα αναλύονται, κατά την ανάλυση Fourier, σε άθροισμα αρμονικών ταλαντώσεων. Από αυτές, εκείνη που έχει την μικρότερη συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης και οι υπόλοιπες ονομάζονται αρμονικές. Οι συχνότητες των αρμονικών είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας.

Περίοδος (T) μιας αρμονικής κίνησης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να συμπληρώσει η κίνηση μια πλήρη περιφορά δηλ. μία πλήρη ταλάντωση ή κύκλο.

Συχνότητα (f) της κίνησης είναι ο αριθμός των ταλαντώσεων ή κύκλων ανά μονάδα χρόνου. Η μονάδα συχνότητας είναι ένας c/sec ή Hertz.

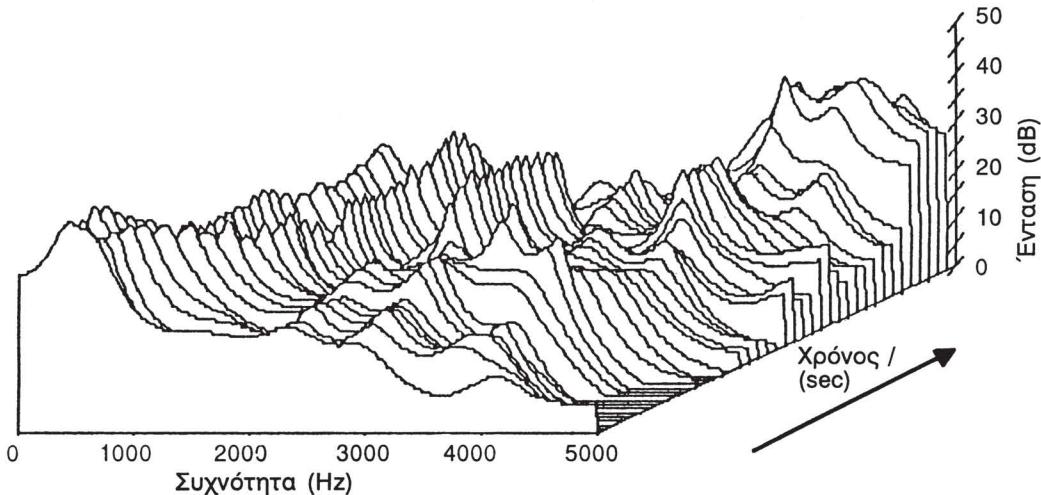
Μήκος κύματος (λ) είναι η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ομόλογων τιμών π.χ. μέγιστων ή ελάχιστων κορυφών του κύματος.

Μεταξύ των πιο πάνω χαρακτηριστικών ισχύει η σχέση $\lambda = u/f$ και $f = u/\lambda$ δηλ. η συχνότητα και το μήκος κύματος είναι ποσά αντιστρόφως ανάλογα.

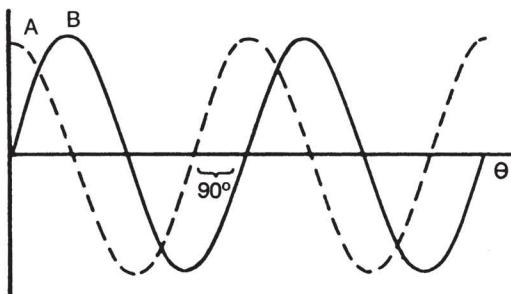
Οι ακουστές συχνότητες περιλαμβάνονται στην περιοχή από 16 Hz έως 26.000 Hz και τ' αντίστοιχα μήκη κύματος στον αέρα είναι 17 m έως 17 mm περίπου δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου είναι 340 m/sec.

Εκτός από τη συχνότητα, που αναφέρθηκε ήδη, τ' άλλα δύο κύρια αντικείμενικά χαρακτηριστικά του ήχου είναι ο χρόνος και η ένταση. Ο **χρόνος** στον ήχο αναφέρεται στη διάρκεια, στο χρόνο έγερσης και πτώσης στη φάση και στο ρυθμό επανάληψης (**Εικ. 1-3**).

Ο **χρόνος έγερσης** ή **ανάβασης** είναι ο απαιτούμενος χρόνος για την άνοδο της έντασης ενός ήχου από 0,1 έως 0,9 της μέγιστης τιμής του μετά την έναρξη του.



Εικ. 1-3. Οι τρεις διαστάσεις του ήχου.



Εικ. 1-4. Διαφορά φάσης μεταξύ δύο ημιτονικών καμπυλών. Η καμπύλη A προηγείται της καμπύλης B κατά 90° .

Χρόνος πτώσης είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένας ήχος για να φθάσει στην ελάχιστη ένταση μετά την παύση του.

Φάση ενός κύματος είναι η στιγμιαία τιμή του κύματος σε κάποιο σημείο του χώρου. Η φάση μετράται σε βαθμούς από $0\text{--}360^\circ$ (μοίρες) (**Εικ. 1-4**).

Η κάθε χρονική διάσταση του ήχου αλληλεπιδρά με τη συχνότητα και την έντασή του με αποτέλεσμα τη δημιουργία σύνθετων ηχητικών αισθημάτων που θ' αναφερθούν στο κεφάλαιο της Ψυχοακουστικής.

Ένταση του ήχου. Κατά τη διάδοση του ήχου διά του αέρα, τα ταλαντούμενα μόρια παίρνουν κινητική ενέργεια από τα προηγούμενα μόρια, που τη μεταδίδουν στα επόμενα. Τα ηχητικά κύματα μεταφέρουν επομένως ενέργεια κατά τη διεύθυνση της διάδοσης. Ύλη δε μεταφέρεται γιατί τα μόρια εκτελούν μόνο ταλάντωση γύρω από μια θέση ισορροπίας. Η μεταφερόμενη ενέργεια είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους των ελαστικών ταλαντώσεων του μέσου διάδοσης. Ονομάζουμε **ένταση** ενός απλού

ήχου, την ενέργεια που μεταφέρουν τα ηχητικά κύματα ανά δευτερόλεπτο διά μέσου της μονάδας επιφάνειας που είναι τοποθετημένη κάθετα προς τη διεύθυνση μετάδοσης. Δηλαδή η ένταση $J = A/St$, όπου A η ενέργεια που διέρχεται ομοιόμορφα διά της επιφάνειας S και t ο αντίστοιχος χρόνος. Το A/t (ενέργεια διά του χρόνου) παριστάνει ισχύ και μπορεί να μετρηθεί σε ίππους (HP) ή Watt. Η ένταση του ήχου επομένως μπορεί να μετρηθεί σε ίππους ή Watt.

Την έννοια της ισχύος την αντιλαμβανόμαστε ευχερέστερα σαν ισχύ του αυτοκινήτου μας που αντιπροσωπεύεται ως ισχύς σε ίππους ή σε Watt ηλεκτρικής ισχύος που καταναλίσκεται από τους ηλεκτρικούς λαμπτήρες. Η ακουστική ισχύς μπορεί και αυτή να μετρηθεί με τις ίδιες μονάδες, αν και είναι πολύ μικρές.

Η ακουστική ισχύς του ασθενέστερου τόνου συχνότητας 1000 Hz που μπορεί ν' ακούσει ένα άτομο με φυσιολογική ακοή είναι $0,000,000,000,000,1 \text{ Watt/cm}^2$ ή $0,000,000,000,000,000,13 \text{ HP/cm}^2$. Αριθμοί του είδους αυτού που αποτελούνται από ένα δεκαδικό αριθμό που ακολουθείται από μια σειρά μηδενικών είναι περισσότερο εντυπωσιακοί παρά κατάλληλοι για υπολογισμούς. Επιπλέον η κλίμακα μεταξύ του μόλις ακουστού ήχου και του ήχου που η ακοή του προκαλεί πόνο είναι τεράστια. Ο δεύτερος ήχος είναι δέκα εκατομμύρια φορές ισχυρότερος από τον πρώτο.

Αν αντί ισχύος χρησιμοποιήσουμε πίεση που συνήθως γίνονται οι μετρήσεις στην ακουστική και που είναι ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα της ισχύος προκύπτουν αριθμοί με λιγότερα μηδενικά. (Ηχητική πίεση είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που προκαλείται από