

Φυσικές ιδιότητες του ήχου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες του ήχου με τρόπο, ώστε και ο μη ειδικός να κατανοήσει τις βασικές αρχές, ιδιότητες, νόμους, και σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογής να φανεί ακόμη και χρήσιμη η γνώση τους. Για την καταγραφή των όρων της ακουστικής, χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα ΕΛΟΤ. Στις περισσότερες περιπτώσεις συμπίπτουν με τα ISO, και για την περαιτέρω κατανόησή τους χρησιμοποιήθηκαν πολλά σχήματα, φωτογραφίες και διαγράμματα.

1.1 ΗΧΟΣ, ΗΧΗΤΙΚΟ ΚΥΜΑ

Ο ήχος ορίζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους, έναν σχετικό με τη φυσική και έναν σχετικό με τη φυσιολογική του σημασία:

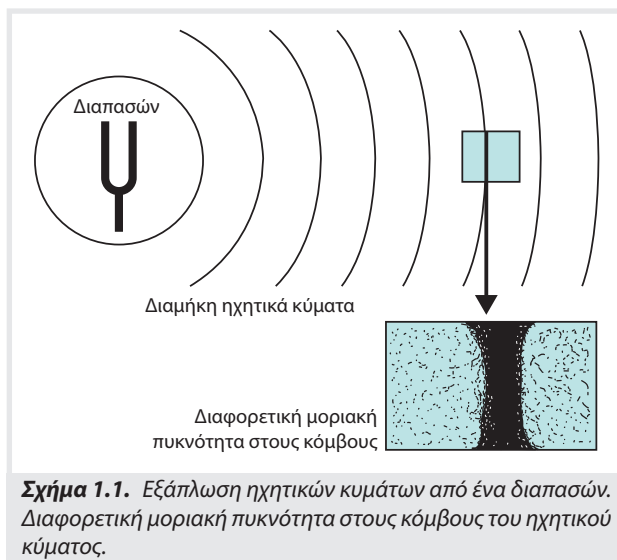
α) Μηχανική διαταραχή που διαδίδεται μέσα σε ένα ελαστικό μέσο, με ορισμένη ταχύτητα, και έχει τέτοιο χαρακτήρα, ώστε να μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα. Η πιο κοινή περίπτωση είναι ο ήχος που διαδίδεται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην περίπτωση αυτή η διαταραχή που συνήθως εξετάζεται είναι η μεταβολή της πίεσης του αέρα γύρω από τη βαρομετρική της τιμή. Αυτές οι διαταραχές προκαλούνται συνήθως από κάποιο αντικείμενο που δονείται, π.χ. το διαπασών, η χορδή της κιθάρας, σχήματα 1.1 έως 1.4. Οι διαταραχές που δεν μπορούν να προκαλέσουν ακουστικό αίσθημα με πολύ υψηλή συχνότητα λέγονται υπέρηχοι και με πολύ χα-

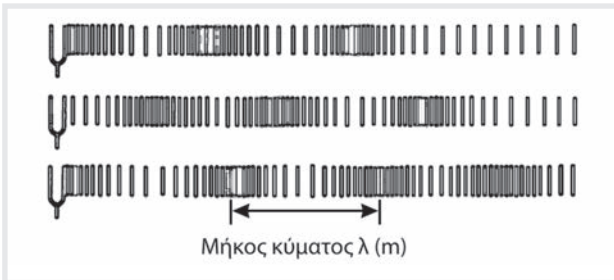
μηλή συχνότητα λέγονται υπόηχοι.

β) Το ακουστικό αίσθημα που προκαλείται όταν το αισθητήριο της ακοής διεγείρεται από μία μηχανική διαταραχή.

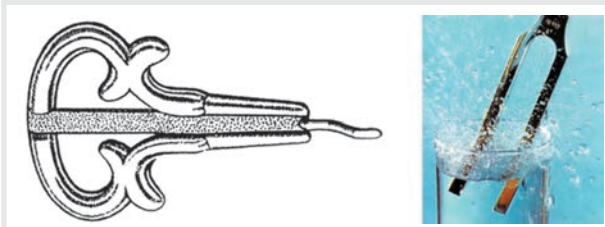
Για καλύτερη κατανόηση της έννοιας του ήχου ας σημειωθεί πως οι κατηγορίες των μουσικών οργάνων είναι τα έγχορδα (πλήξη και ταλάντωση χορδής), τα πνευστά (αεροδυναμικός ήχος) και τα κρουστά (κρούση και δόνηση επιφάνειας).

Ηχητικό κύμα είναι μηχανική διαταραχή (π.χ. της πίεσης, της τάσης, της πυκνότητας, της σωματιδιακής





Σχήμα 1.2. Δημιουργία ηχητικών κυμάτων από τη δόνηση ενός διαπασών. Παράγει τη νότα λα και χρησιμοποιείται ως ήχος αναφοράς για το κούρδισμα των οργάνων.



Σχήμα 1.4. Μέταλλο που πάλλεται και ακουμπάει στην άκρη του στόματος και παράγει συχνότητα ήχου ανάλογη με τον όγκο της κοιλότητας του στόματος. Δημιουργία κυμάτων νερού από τη δόνηση ενός διαπασών.

ταχύτητας κτλ.) που διαδίδεται μέσα σε ένα ελαστικό μέσο με ορισμένη ταχύτητα. Η πιο κοινή περίπτωση είναι το ηχητικό κύμα που διαδίδεται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην περίπτωση αυτή η διαταραχή που συνήθως εξετάζεται είναι η μεταβολή της πίεσης του αέρα γύρω από τη βαρομετρική της τιμή. Οι διακυμάνσεις της πίεσης παρομοιάζονται με τα κύματα νερού που δημιουργούνται από τη ρήψη μιας πέτρας και με τα εγκάρσια κύματα από τη χορδή ενός βιολιού, σχ. 1.5.

1.2 ΗΧΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ, ΑΚΟΥΣΤΟΣ ΗΧΟΣ

Ηχητικό φάσμα είναι:

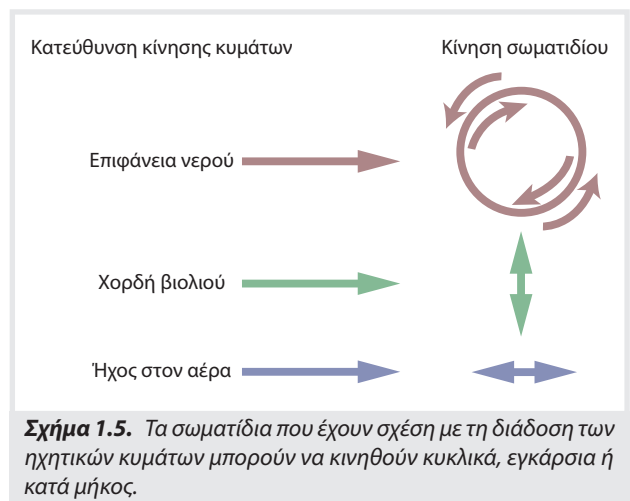
- η συνάρτηση ενός χαρακτηριστικού μεγέθους (π.χ. ηχητική πίεση, πυκνότητα ηχητικής ενέργειας, στάθμη ηχητικής ισχύος, κτλ.) του ηχητικού πεδίου, με τη συχνότητα, σχ. 1.6,
- το σύνολο των συχνοτήτων που μπορεί να περιέχει το ηχητικό πεδίο, σχ. 1.7,
- περιοχή συχνοτήτων, μέσα στην οποία το ηχητικό πεδίο έχει ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά (π.χ. ακουστικό ηχητικό φάσμα, υποηχητικό φάσμα, υπερηχητικό φάσμα).

Ακουστός ήχος είναι:

- ο ήχος που μπορεί να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα,
- το ακουστικό αίσθημα που προκαλείται από έναν τέτοιο ήχο. Ο ακουστός ήχος είναι "ήχος" με τη στενή έννοια του όρου. Η περιοχή του ηχητικού φάσματος



Σχήμα 1.3. Δίδυμα διαπασών. Ο ήχος που εκπέμπεται από το πρώτο διαπασών κάνει το δεύτερο, όμοιό του και αρχικά αδρανές, να δονείται (συνήρηση).



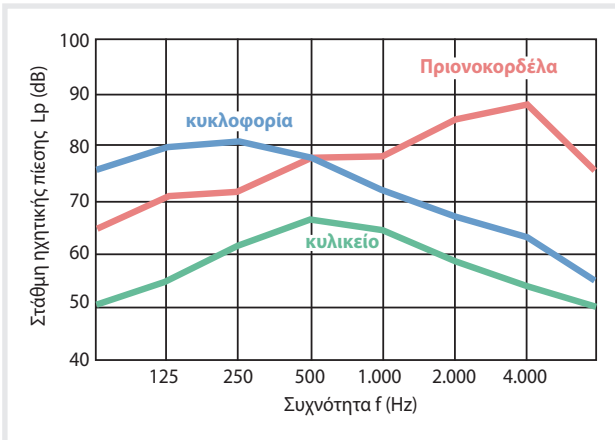
Σχήμα 1.5. Τα σωματίδια που έχουν σχέση με τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων μπορούν να κινηθούν κυκλικά, εγκάρσια ή κατά μήκος.

που αντιστοιχεί στους ακουστούς ήχους λέγεται "ακουστή περιοχή του ηχητικού φάσματος" ή "ακουστό ηχητικό φάσμα".

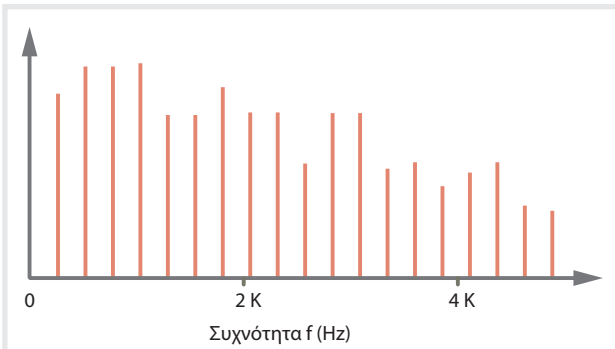
Ένα φυσιολογικό αφτί σε νεαρή ηλικία ακούει ήχους στο φάσμα συχνοτήτων από 20 έως 20.000 Hz. Αυτό το φάσμα διαφέρει από άτομο σε άτομο και στενεύει με την πάροδο της ηλικίας. Επίσης, διαφέρει και ανάμεσα στους άνδρες και τις γυναίκες. Συχνότητες πάνω από 10.000 Hz θεωρούνται αμελητέας σπουδαιότητας όσον αφορά την ευκρίνεια του ήχου ή την απόλαυση της μουσικής.

Η περιοχή του ηχητικού φάσματος που αντιστοιχεί στους υπόηχους λέγεται "**υποηχητικό φάσμα**" και η περιοχή του ηχητικού φάσματος που αντιστοιχεί στους υπερήχους λέγεται "**υπερηχητικό φάσμα**".

Υπόηχοι δημιουργούνται από ηφαιστειακές εκρήξεις, από υπερηχητικά αεροσκάφη, από τους μετεωρίτες όταν εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, από τις χιονοστιβάδες, από το βόρειο σέλας, από πυρηνικές υπόγειες εκρήξεις και από τους σεισμούς (η θεμελιώδης συχνότητα των σεισμών είναι υπόηχος, ενώ ο θόρυβος που συνήθως συνοδεύει τους σεισμούς είναι κάποια πολυλαπλάσια αρμονική συχνότητα της θεμελιώδους).



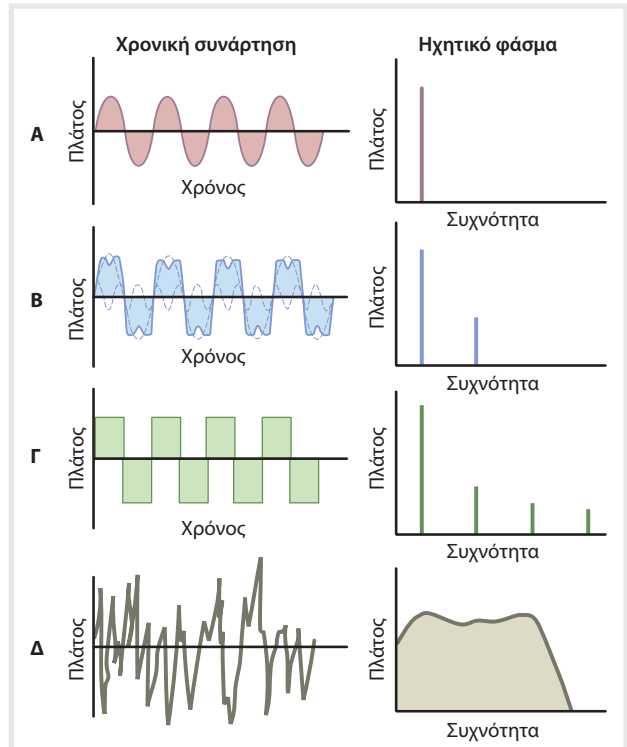
Σχήμα 1.6. Ηχητικό φάσμα. Ανάλυση ανά οκτάβα της στάθμης ηχητικής πίεσης (dB): πάνω, θόρυβος από πριονοκορδέλα, στη μέση, κυκλοφοριακός θόρυβος, και κάτω, θόρυβος κυλικείου (Moore).



Σχήμα 1.8. Φάσμα μουσικού οργάνου, τρομπέτα.

Υπέρηχους ακούνε διάφορα θηλαστικά όπως σκυλιά, γάτες, καπιμπάρα, νυχτερίδες, δελφίνια και έντομα.

Τα πιο συνήθη φάσματα στην ακουστική χώρα είναι η καταγραφή του χρόνου αντήχησης ανά οκτάβα, οι ιδιότητες των ηχοαπορροφητικών υλικών ανά οκτάβα ή τριτοοκτάβα, η απόκριση των ηχητικών πηγών, όπως τα φάσματα και οι κυματομορφές από τα μουσικά όργανα, σχ. 1.8 και 1.9, η ανθρώπινη φωνή ανά τριτοοκτάβα κ.ά.



Σχήμα 1.7. Κυματομορφές (αριστερά) και φασματογράμματα (δεξιά) (Hassal). Α. Ένας τόνος, μία συχνότητα, Β. Δύο συχνότητες, διφωνία, Γ. Τέσσερις συχνότητες, Δ. Πολλές συχνότητες - θόρυβος.



Σχήμα 1.9. Κυματομορφή νότας που παίχτηκε από κλαρινέτο (Moore).

μεταβολής ενός περιοδικού μεγέθους. Μονάδα μέτρησης είναι το δευτερόλεπτο (s), σχ. 1.10.

Συχνότητα f ενός περιοδικού μεγέθους είναι το αντίστροφο της περιόδου του:

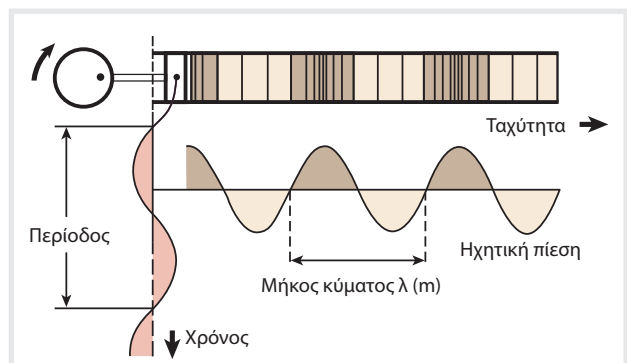
$$f = 1 / T$$

1.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΧΟΥ, ΠΕΡΙΟΔΟΣ, ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ, ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ DOPPLER

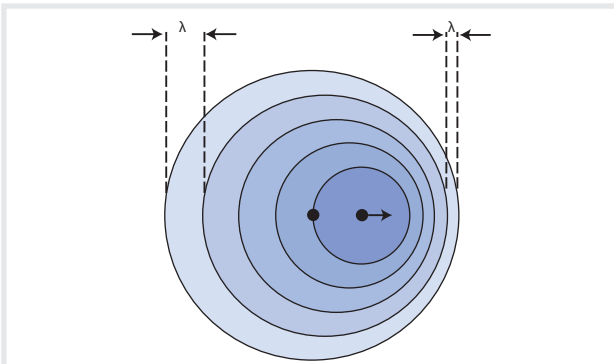
Ταχύτητα του ήχου, c, είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδονται τα ηχητικά κύματα. Μονάδα μέτρησης είναι το μέτρο ανά δευτερόλεπτο (m/s).

Η ταχύτητα του ήχου είναι η ίδια σε όλες τις συχνότητες, και για θερμοκρασίες δωματίου (20°C) είναι περίπου ίση με 344 m/s ή 1.238 Km/h. Η ταχύτητα του ήχου στα στερεά και τα υγρά διαφέρει από την ταχύτητα του ήχου στον αέρα, και εξαρτάται από το υλικό του μέσου. Σε υδρατμούς η ταχύτητα του ήχου είναι 450 m/s, στο νερό η ταχύτητα του ήχου είναι 1.000 m/s και στον σίδηρο 5.050 m/s.

Περίοδος T είναι η χρονική διάρκεια ενός κύκλου



Σχήμα 1.10. Σχηματική παράσταση φυσικών ιδιοτήτων του ήχου (S.R.L.).



Σχήμα 1.11. Φαινόμενο Doppler, οπτική απεικόνιση.

Μονάδα μέτρησης είναι το χερτζ (Hz) ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$).

Η συχνότητα εκφράζει τον ρυθμό επανάληψης των κύκλων μεταβολής του περιοδικού μεγέθους.

Μία χορδή που πάλλεται 440 φορές σε ένα δευτερόλεπτο θα παράγει στον ακροατή τον υποκειμενικό τόνο της νότας λα ($f = 440 \text{ Hz}$).

Όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα του ήχου, τόσο αναγνωρίζεται η ταλάντωση – ο παλμός, π.χ. στους ηλεκτροκινητήρες των 50 Hz γίνεται αντιληπτό το κύμα, ενώ σε μία σειράνα υψηλής συχνότητας ο ήχος γίνεται αντιληπτός ως συνεχής.

Η συχνότητα μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας όργανα ακουστικών μετρήσεων.

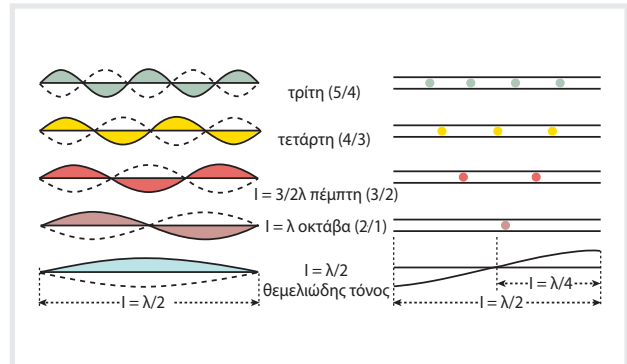
Οι συχνότητες της ανθρώπινης φωνής είναι περίπου όπως ακολουθούν:

- μπάσος, χαμηλότερη νότα, φωνήεν, 100 Hz
- σοπράνο, υψηλότερη νότα, 12.000 Hz
- αντρική φωνή, σύμφωνο σ, 3.000 Hz.

Όταν ένας δέκτης του ήχου είναι ακίνητος και η πηγή του ήχου κινητή, π.χ. θεατής και αυτοκίνητο αγώνων, τότε παρατηρείται αλλαγή της συχνότητας του ήχου στη θέση του θεατή από υψηλή προς χαμηλή. Αυτό συμβαίνει γιατί η ταχύτητα του αυτοκινήτου προστίθεται πάνω στην ταχύτητα του ήχου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **φαινόμενο Doppler**, σχ. 1.11.

1.4 ΟΚΤΑΒΑ, ΤΡΙΤΟΟΚΤΑΒΑ

Οι περισσότεροι ήχοι εμπεριέχουν ή αποτελούνται ή συντίθενται από διάφορες συχνότητες, χαμηλές, με-



Σχήμα 1.12. Ταλάντωση στις χορδές και τις στήλες αέρα.

σαίες και υψηλές, π.χ. μουσική. Έτσι λοιπόν τα ακουστικά προβλήματα αντιμετωπίζονται πάντα σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

Οκτάβα είναι κάθε ζώνη συχνοτήτων με αρχική συχνότητα f_1 και τελική f_2 , που ικανοποιούν τη σχέση:

$$f_2 / f_1 = 2$$

Η οκτάβα (oct) είναι η μονάδα μέτρησης του διαστήματος συχνοτήτων. Η οκτάβα παίρνει το όνομά της από την κεντρική της συχνότητα f_0 , που είναι ο γεωμετρικός μέσος των άκρων της f_1 και f_2 . Είναι δηλαδή:

$$f_0 = \sqrt{(f_1 \cdot f_2)}$$

Αν δίνεται η κεντρική συχνότητα f_0 μιας οκτάβας, τα άκρα της προσδιορίζονται από τους τύπους:

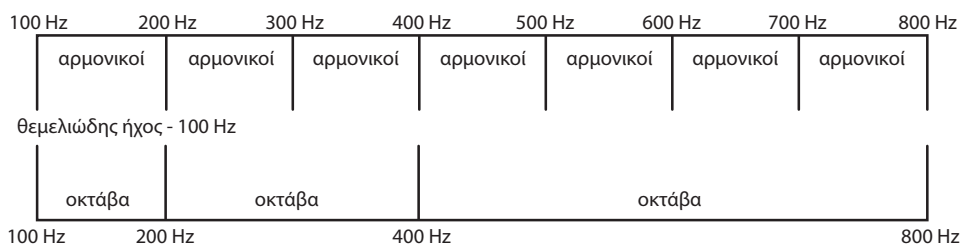
$$f_1 = 2^{-1/2} \cdot f_0, \quad f_2 = 2^{1/2} \cdot f_0$$

Ο λόγος των κεντρικών συχνοτήτων σε δύο διαδοχικές οκτάβες είναι ίσος με 2. Οκταβικό ηχητικό φάσμα είναι το ηχητικό φάσμα εκφρασμένο με την οκταβική στάθμη ηχητικής πίεσης.

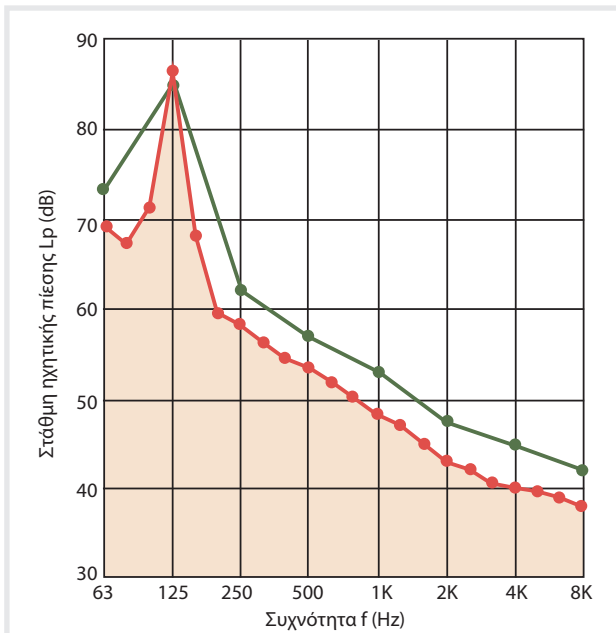
Οι κεντρικές συχνότητες του "ακουστού" ηχητικού φάσματος είναι οι 20, 40, 80, 160, 315, 630, 1.250, 2.500, 5.000, 10.000 και 20.000 Hz.

Οι κεντρικές συχνότητες από τις οκτάβες που χρησιμοποιούνται για την ακουστική χώρου είναι βασικά οι 125, 250, 500, 1.000, 2.000 και 4.000 Hz.

Οι αρμονικές συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια από τις θεμελιώδεις, σχ. 1.12, ενώ οι οκτάβες έχουν λογαριθμική σχέση, 100, 200, 400, 800, σχ. 1.13.



Σχήμα 1.13. Σύγκριση αρμονικών και οκτάβων. Ο θεμελιώδης ήχος είναι συχνότητας 100 Hz. Οι αρμονικοί έχουν γραμμική σχέση (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Οι οκτάβες λογαριθμική (1, 2, 4, 8).



Σχήμα 1.14. Ηχητικό φάσμα θορύβου μηχανής. Πάνω, ανάλυση οκτάβας και κάτω, ανάλυση τριτοοκτάβας. Οι συνθήκες μέτρησης είναι ίδιες (Harris).

Τριτοοκτάβα είναι κάθε ζώνη συχνοτήτων με αρχική συχνότητα f_1 και τελική f_2 που ικανοποιούν τη σχέση:

$$f_2/f_1 = \sqrt[3]{2} = 1,26$$

Οι κεντρικές συχνότητες του “ακουστού” ηχητικού φάσματος είναι οι 20, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000, 5.000, 6.300, 8.000, 10.000, 12.500, 16.000, 20.000 Hz.

Η καταγραφή και ανάλυση ακουστικού φάσματος σε τριτοοκτάβα, αντί της οκτάβας, διαθέτει μεγαλύτερη ανάλυση και είναι πολύ πιο κοντά στην πραγματικότητα, σχ. 1.14.

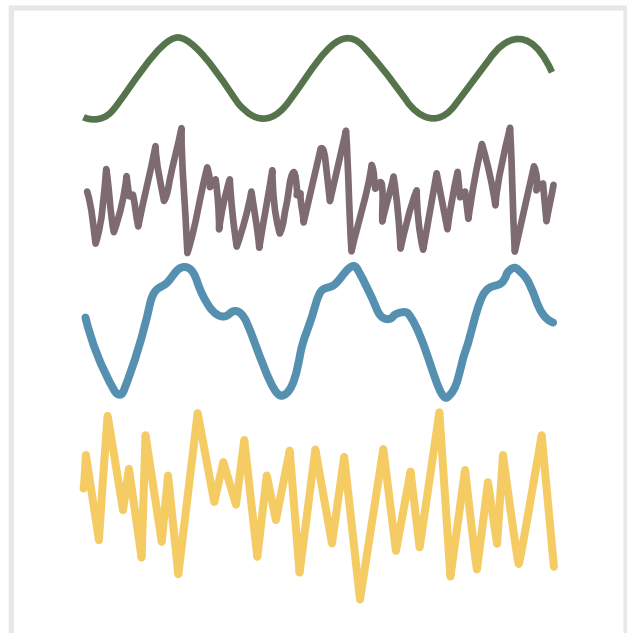
1.5 ΑΠΛΟΣ – ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΗΧΟΣ, ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Η υποκειμενική εκτίμηση της συχνότητας κάποιου ήχου είναι το ύψος του, και κάθε υποκειμενική αναγνώριση ήχου με συγκεκριμένο ύψος είναι ο τόνος (στη μουσική είναι το ημίτονο, η νότα, ο φθόγγος).

Απλός ήχος ή απλός (καθαρός) τόνος είναι ο ήχος που παράγεται από ημιτονοειδή μηχανική διαταραχή, όπως για παράδειγμα μία νότα που ακούγεται από την πλήξη μιας χορδής, σχ. 1.15. Ο απλός ήχος χαρακτηρίζεται από το πλάτος p_0 , τη συχνότητα f (ή την περίοδο T) και το μήκος κύματος λ . Η μαθηματική έκφραση ενός απλού ήχου, με τη μορφή επίπεδου κύματος είναι:

$$p = p_0 \sin [2\pi (t/T - x/\lambda)]$$

όπου: p η ηχητική πίεση, t ο χρόνος και x η θέση.



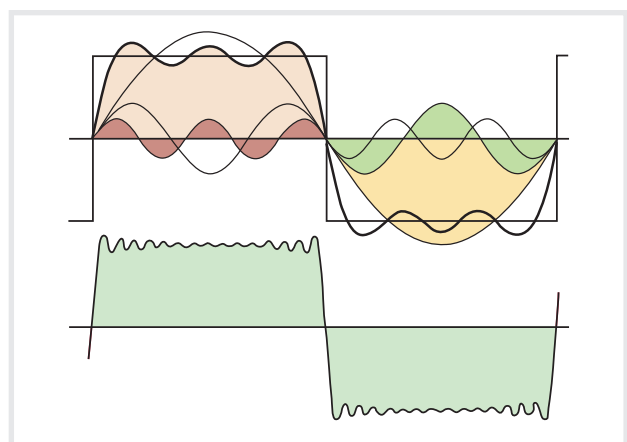
Σχήμα 1.15. Κυματομορφές: απλός τόνος, τυχαίος θόρυβος, σύνθετος ήχος, λευκός θόρυβος.

Σύνθετος ήχος είναι κάθε ήχος που δεν είναι απλός.

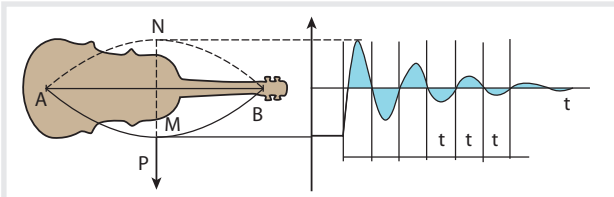
Σύνθετος τόνος είναι κάθε περιοδικός σύνθετος ήχος. Ο σύνθετος τόνος μπορεί να αναλυθεί σε δύο ή περισσότερους απλούς τόνους, σχ. 1.16.

Από αυτούς τους απλούς τόνους, ένας έχει τη μεγαλύτερη περίοδο T_1 (που είναι μάλιστα ίση με την περίοδο του σύνθετου τόνου) και επομένως τη μικρότερη συχνότητα f_1 . Αυτός ο απλός τόνος λέγεται θεμελιώδης ή πρώτος αρμονικός του σύνθετου τόνου, σχ. 1.17.

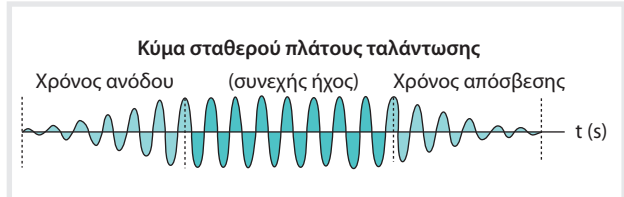
Οι υπόλοιποι απλοί τόνοι, που αποτελούν τον σύνθετο τόνο, έχουν συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της



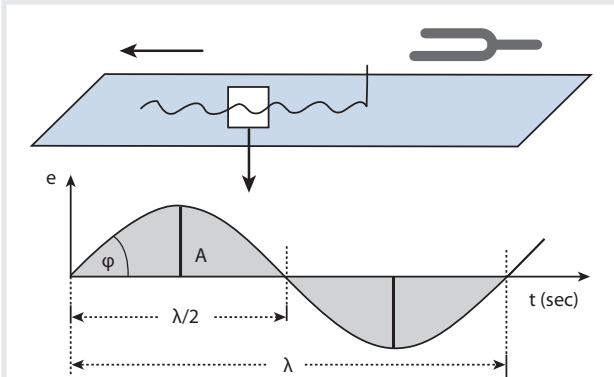
Σχήμα 1.16. Σύνθεση ενός σύνθετου τόνου που αποτελείται από πολλούς απλούς τόνους. Το εύρος της κυματομορφής ενός σύνθετου τόνου προκύπτει από την πρόσθεση του εύρους των απλών ημιτονοειδών κυματομορφών. Στο πάνω μέρος, συνδυασμός 3 απλών τόνων, και στο κάτω μέρος, συνδυασμός 15 απλών τόνων (δημιουργία τετράγωνου παλμού) (Burns).



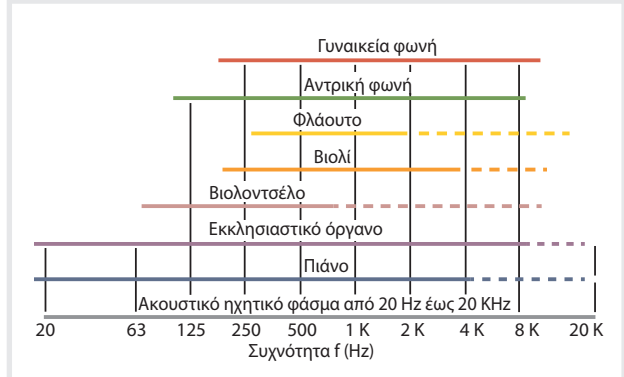
Σχήμα 1.17. Θεμελιώδης τόνος από μία χορδή ενός βιολιού. Μήκος χορδής AB, πλάτος ταλάντωσης NM και δύναμη P. Ο θεμελιώδης τόνος έχει συχνότητα $f = 1/t$.



Σχήμα 1.18. Αύξηση και ελάττωση του πλάτους με σταθερό μήκος κύματος.



Σχήμα 1.19. Αρμονική ταλάντωση ενός διαπασών. Μήκος κύματος λ , κόμβος, κορυφή, A.



Σχήμα 1.20. Απόκριση συχνότητας γυναικείας, αντρικής φωνής και μουσικών οργάνων. Με διακεκομμένη γραμμή οι αρμονικές (Doelle).

συχνότητας του θεμελιώδους και λέγονται ανώτεροι αρμονικοί του σύνθετου τόνου. Η αύξηση και ελάττωση του πλάτους με σταθερό μήκος κύματος απεικονίζεται στο σχήμα 1.18.

Μήκος κύματος, λ , ενός ημιτονοειδούς επίπεδου διαδιδόμενου κύματος είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο μέτωπα του κύματος που έχουν μεταξύ τους χρονική διαφορά ίση με μία περίοδο. Η παρακάτω μαθηματική σχέση ισχύει ανάμεσα στην ταχύτητα του ήχου c , τη συχνότητα f και το μήκος κύματος λ :

$$\lambda = c / f$$

Μονάδα μέτρησης είναι το μέτρο (m). Δηλαδή, μήκος κύματος είναι η απόσταση στην οποία διαδίδεται η διαταραχή σε χρόνο μιας περιόδου.

Το μήκος κύματος του ακουστού ηχητικού φάσματος 20 έως 20.000 Hz κυμαίνεται από 17 μέτρα έως 25 χιλιοστά του μέτρου με ταχύτητα του ήχου $c = 340$ m/s, σχ. 1.19.

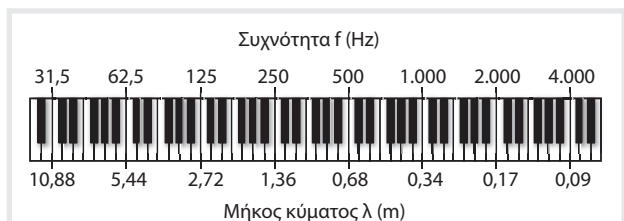
Το μήκος κύματος πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό αιθουσών ακροατηρίου, όπου το μέγεθος των ανακλαστήρων, των διαχυτών και των ηχοαπορροφητικών είναι άμεσα συνδεδεμένο με το εύρος συχνοτήτων των ηχητικών πηγών, σχ. 1.20.

Ένας ήχος με συχνότητα 100 Hz, ή αλλιώς 100 κύκλους το δευτερόλεπτο, διαθέτει μήκος κύματος $\lambda = 3,4$ m. Έτσι, ένας άλλος ήχος με συχνότητα 200 Hz (κύκλους το δευτερόλεπτο) διαθέτει μήκος κύματος 1,7 m. Η διάσταση αυτή αναφέρεται στην απόσταση των

δύο κορυφών της κυματομορφής ή αλλιώς ανάμεσα σε δύο κόμβους ή ανάμεσα σε δύο κοιλίες.

Το μήκος κύματος του μέσου ύψους των δωματίων, που είναι περίπου 3 m, είναι 113 Hz. Αυτός είναι ο λόγος που η ακουστική χώρου και η ηχοπροστασία ορίζουν ως φάσμα ενδιαφέροντος 100 Hz έως 4.000 Hz. Στη συχνότητα των 4.000 Hz το μήκος κύματος του ήχου είναι μόλις 8,5 cm. Σε τόσο μικρές διαστάσεις οι διαχυτές και οι ανακλαστήρες έχουν ελάχιστη απόδοση. Από την άλλη πλευρά, ένας ήχος συχνότητας 100 Hz, για να ανακλαστεί, απαιτεί μέγεθος ανακλαστήρα τουλάχιστον το μισό του μήκους κύματος, που είναι στην περίπτωση των 100 Hz ίσο με 1,70 m.

Το μήκος κύματος λ είναι συνδεδεμένος κρικός ανάμεσα στη μουσική και την ακουστική, σχ. 1.21. Ο φθόγγος Do έχει συχνότητα 261,63 Hz, μήκος κύματος $\lambda = 1,3$ m και απαιτεί μέγεθος ανακλαστήρα τουλάχιστον $1/2 \lambda$, που είναι 0,65 m. Ο επόμενος φθόγγος Do, σε μία οκτάβα, έχει συχνότητα 523,25 Hz, μήκος κύματος $\lambda = 0,65$



Σχήμα 1.21. Πιάνο: συχνότητα και μήκος κύματος, οκτάβα και μουσική οκτάβα.

m και απαιτεί μέγεθος ανακλαστήρα τουλάχιστον $1/2 \lambda$, που είναι 0,325 m, σχ. 1.21.

Το ανθρώπινο αφτί, που ακούει από $f = 20$ Hz έως $f = 20.000$ Hz, αντιστοιχεί σε μήκη κύματος λ , από $\lambda = 17$ m έως $\lambda = 0,017$ m.

1.6 ΗΧΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΗΧΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ – ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ – ΕΝΤΑΣΗ – ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΙΣΧΥΣ, ΗΧΟΔΙΑΔΟΣΗ, ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ, ΗΧΟΣΤΑΘΜΕΣ

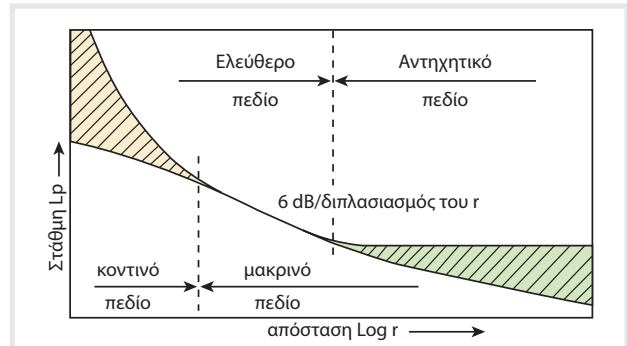
Ηχητικό πεδίο είναι ο χώρος όπου υπάρχουν ηχητικά κύματα, αλλά είναι και η ηχητική κατάσταση που δημιουργούν τα κύματα αυτά. Το ηχητικό πεδίο προσδιορίζεται από μία χωρική και χρονική κατανομή ενός χαρακτηριστικού μεγέθους του, π.χ. της ηχητικής πίεσης, της ηχητικής πυκνότητας κτλ.

Ελεύθερο ηχητικό πεδίο είναι το ηχητικό πεδίο σε ένα ομογενές και ισότροπο ελαστικό μέσο με τέτοια έκταση, ώστε οι περατωτικές του επιφάνειες έχουν αμελητέα επίδραση στο πεδίο, για την περιοχή συχνοτήτων που ενδιαφέρει, σχ. 1.22.

Ελεύθερο ηχητικό πεδίο με μετωπική πρόσπτωση είναι το ηχητικό πεδίο όπου ο ακροατής δέχεται ελεύθερα διαδιδόμενο επίπεδο ηχητικό κύμα, από μία ηχητική πηγή που βρίσκεται κατευθείαν μπροστά του.

Κοντινό ηχητικό πεδίο μιας ηχητικής πηγής, που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, είναι η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου της πηγής, στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι σε φάση. Η έκταση του κοντινού ηχητικού πεδίου εξαρτάται από τον τύπο της ηχητικής πηγής (μονοπολική, διπολική κτλ.) και από το μήκος κύματος. Στην περίπτωση χωρικά εκτεταμένης ηχητικής πηγής η έκταση του κοντινού πεδίου εξαρτάται και από τις γραμμικές διαστάσεις της πηγής. Μερικές φορές σημεία που βρίσκονται κοντά στην πηγή, σε σχέση με τις διαστάσεις της, λέγεται ότι βρίσκονται μέσα στο κοντινό ηχητικό πεδίο της πηγής. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. όταν το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό) η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα μπορεί να είναι σε φάση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, για διάκριση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο όρος “πλησιέστατο ηχητικό πεδίο”.

Μακρινό ηχητικό πεδίο μιας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου είναι η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι ουσιαστικά σε φάση και στην οποία η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι αντίστροφα ανάλογη με την απόσταση από την πηγή. Η έκταση του μακρινού πε-



Σχήμα 1.22. Διακύμανση της στάθμης ηχητικής πίεσης σε έναν θάλαμο. Στην περιοχή του κοντινού ηχητικού πεδίου πρέπει να αποφεύγονται οι τοποθετήσεις μικροφώνων στις μετρήσεις (Hassal).

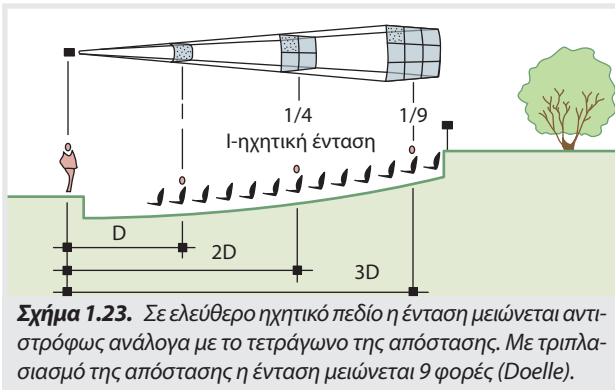
δίου εξαρτάται από τον τύπο της ηχητικής πηγής (μονοπολική, διπολική κτλ.) και από το μήκος κύματος. Στην περίπτωση χωρικά εκτεταμένης ηχητικής πηγής η έκταση του μακρινού πεδίου εξαρτάται και από τις γραμμικές διαστάσεις της πηγής. Για πρακτικούς σκοπούς, η περιοχή του μακρινού ηχητικού πεδίου μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται πέρα από την απόσταση $2a_2 / \lambda$ ή $2a$, όπου λ το μήκος κύματος και a η τυπική γραμμική διάσταση της ηχητικής πηγής.

Σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. όταν το μήκος κύματος είναι πολύ μεγάλο) σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με $2a$ η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα μπορεί να μην είναι σε φάση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, για διάκριση από το πραγματικό μακρινό πεδίο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο όρος “απόμακρο ηχητικό πεδίο”. Στην περιοχή του μακρινού ηχητικού πεδίου η στάθμη ηχητικής πίεσης ελαττώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης από την πηγή.

Άμεσο ηχητικό πεδίο σε χώρο όπου λειτουργεί ηχητική πηγή είναι η συνιστώσα του ηχητικού πεδίου που φθάνει σε κάθε σημείο του χώρου κατευθείαν από την ηχητική πηγή.

Πεδιακό μέγεθος, F, του ηχητικού πεδίου είναι κάθε μέγεθος που εκφράζει την τιμή του ηχητικού πεδίου. Πεδιακά μεγέθη είναι π.χ. η ηχητική πίεση, η ηχητική πυκνότητα κτλ. Η τιμή ενός πεδιακού μεγέθους χαρακτηρίζεται στιγμιαία, μέγιστη, ενεργός κτλ. Συνήθως όμως, αν δεν υπάρχει κανένας προσδιορισμός, υποδηλώνεται η “ενεργός τιμή” του μεγέθους.

Ηχητική πίεση, p, σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου είναι η διαφορά της στατικής πίεσης του μέσου από την ολική πίεση που υπάρχει στο σημείο αυτό. Μονάδα μέτρησης είναι το παस्कάλ (Pa). Η ηχητική πίεση είναι η κυμαινόμενη συνιστώσα της πίεσης στο υπόψη σημείο, και οφείλεται στην ύπαρξη ηχητικών κυμάτων. Η ηχητική πίεση μπορεί να είναι στιγμιαία, μέγιστη, ενεργός κτλ. Συνήθως, όταν αναφέρεται ο όρος χωρίς



κανένα προσδιορισμό, σημαίνει την “ενεργό ηχητική πίεση” (peff).

$$\text{Πίεση} = \text{Δύναμη σε επιφάνεια}$$

Η μέτρηση της ηχητικής πίεσης με τις μεγάλες διακυμάνσεις της μονάδας μέτρησης και η ανομοιομορφία της αντίδρασης του ανθρώπινου αφτιού στην πίεση, σε σχέση με την ένταση, οδήγησαν στο γεγονός να μετριέται η ηχητική πίεση σε λογαριθμική κλίμακα που ονομάζεται ντεσιμπέλ, προς τιμή του Graham Bell (dB, deci = δέκατο του Bell).

Ηχητική πυκνότητα, ρ, σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου είναι η διαφορά της στατικής πυκνότητας του μέσου από την ολική πυκνότητα που υπάρχει στο σημείο αυτό. Μονάδα μέτρησης είναι το χιλιόγραμμο ανά κυβικό μέτρο (kg/m^3).

Ηχητική ένταση, I, σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μία καθορισμένη διεύθυνση, είναι το πηλίκο της ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία στοιχειώδη επιφάνεια, διά του εμβαδού της επιφάνειας. Μονάδα μέτρησης είναι το βατ ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Η ηχητική ένταση μπορεί να είναι στιγμιαία, μέγιστη, μέση κτλ. Συνήθως, όταν αναφέρεται ο όρος χωρίς κανένα προσδιορισμό, σημαίνει τη “μέση ηχητική ένταση”. Στην περίπτωση επίπεδου ή σφαιρικού διαδιδόμενου ηχητικού κύματος είναι:

$$I = p^2 / \rho_s * c$$

όπου: p η ενεργός ηχητική πίεση του κύματος, ρ_s η στατική πυκνότητα του μέσου και c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο αυτό, σχ. 1.23.

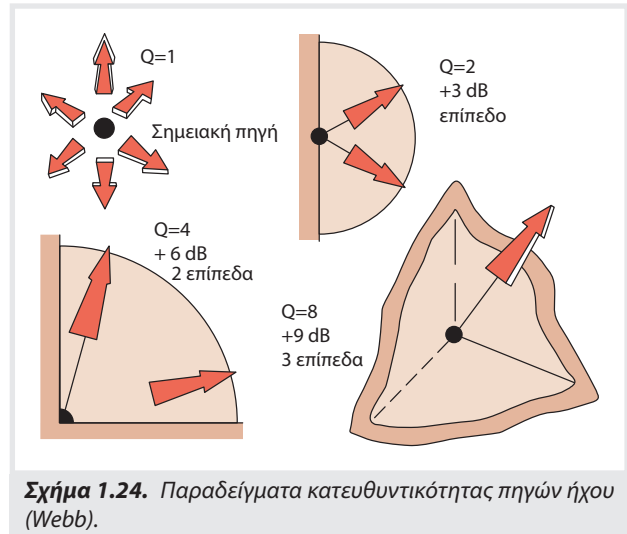
Σε σφαιρικό ηχητικό πεδίο (ήχος που διαδίδεται σφαιρικά γύρω από την πηγή) ισχύει:

$$I = P / 4\pi r^2$$

όπου: P η ηχητική ισχύς

$$I = 4P / [Sa / (1 - a)]$$

όπου: S είναι το εμβαδόν του συνόλου των εσωτερικών επιφανειών του χώρου και a είναι ο “μέσος” συντελεστής ηχοαπορρόφησης των επιφανειών του χώρου



$$I = \{PQ / 4\pi r^2\} + \{4P / [Sa / (1 - a)]\}$$

όπου: Q δείκτης κατευθυντικότητας ($Q = 8$ πηγή σε τρισδιάστατη γωνία, $Q = 4$ πηγή σε δισδιάστατη γωνία και $Q = 2$ πηγή κοντά σε επίπεδο), σχ. 1.24.

Ενεργειακό μέγεθος, E, του ηχητικού πεδίου είναι κάθε μέγεθος που εκφράζει την ενέργεια του ηχητικού πεδίου. Ενεργειακά μεγέθη είναι π.χ. η ηχητική ενέργεια, η ηχητική ισχύς, η πυκνότητα ηχητικής ενέργειας, κτλ.

Ηχητική ενέργεια, W, είναι η ενέργεια που περιέχει ένα ελαστικό μέσο λόγω της παρουσίας ηχητικού πεδίου. Η ενέργεια αυτή αποτελείται από δυναμική ενέργεια, λόγω των αποκλίσεων από τη στατική πίεση, και από κινητική ενέργεια, λόγω της ηχητικής σωματιδιακής ταχύτητας.

Ηχητική ενέργεια, W , είναι η ενέργεια που μεταφέρει ένα ηχητικό κύμα. Μονάδα μέτρησης είναι το τζάουλ (J).

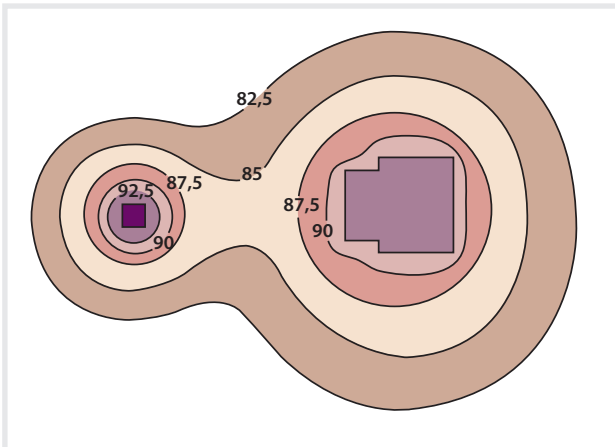
Ηχητική ισχύς, P, είναι:

α) ο ρυθμός με τον οποίο ακτινοβολείται ηχητική ενέργεια από μία ηχητική πηγή, και

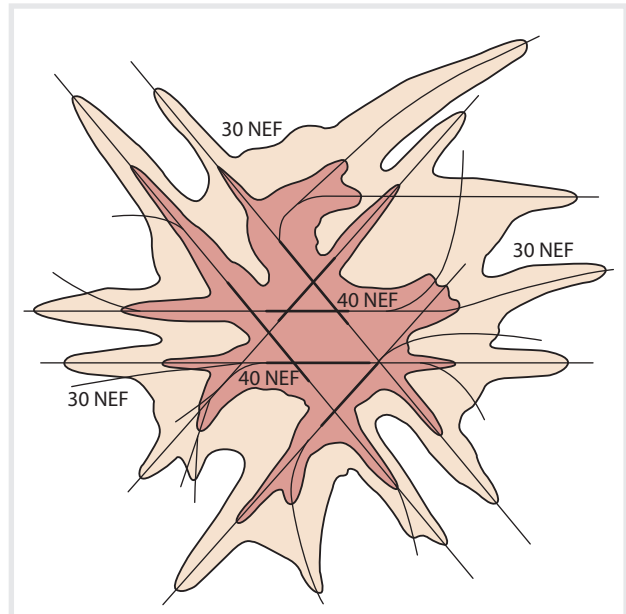
β) ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται ηχητική ενέργεια από ένα ηχητικό κύμα. Μονάδα μέτρησης είναι το βατ (W). Η ηχητική ισχύς μπορεί να είναι στιγμιαία, μέγιστη, μέση. Συνήθως, όταν αναφέρεται ο όρος χωρίς κανένα προσδιορισμό, σημαίνει τη “μέση ηχητική ισχύ” (P). Στο σχήμα 1.25 έχει χαρτογραφηθεί η ηχητική ισχύς σε ισοσταθμικές καμπύλες γύρω από θορυβώδη κτίρια.

Ηχοδιάδοση είναι η κυματική διαδικασία με την οποία μεταφέρεται ηχητική ενέργεια από ένα μέρος ενός ελαστικού μέσου σε ένα άλλο.

Διεύθυνση ηχοδιάδοσης είναι η διεύθυνση κατά την οποία ρέει η ηχητική ενέργεια που μεταφέρει το ηχητικό κύμα. Το σχήμα 1.26 παρουσιάζει τις καμπύλες έκθεσης θορύβου αεροσκαφών για τα αεροδρόμια, και



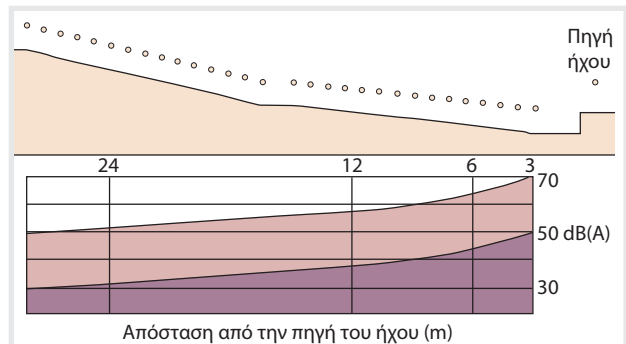
Σχήμα 1.25. Ισοσταθμικές καμπύλες ηχητικής ισχύος γύρω από θορυβώδη κτίρια.



Σχήμα 1.26. Ζώνες θορύβου για χρήση γης σε περιοχές γύρω από τα αεροδρόμια (NEF, noise exposure forecast). Οι ισοσταθμικές καμπύλες του θορύβου ακολουθούν τη μορφή των αεροδιαδρόμων. Οι χρήσεις γης ανάμεσα στη ζώνη 30 και 40 NEF πρέπει να είναι όσο το δυνατόν δευτερεύουσες, όπως π.χ. οι αποθήκες, και οι περιοχές κατοικίας να επιτρέπονται μετά τη ζώνη των 30 NEF (Hassal).



Σχήμα 1.27. Φωτογραφία αεροσκάφους πάνω από τις στέγες κατοικιών κατά την προσγείωσή του. Αεροπορικός θόρυβος.



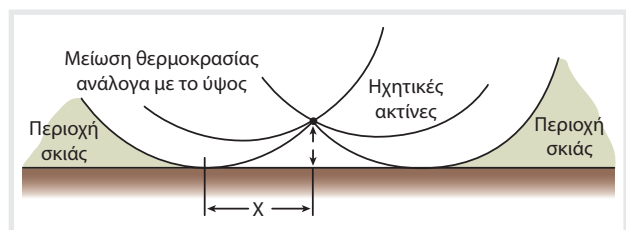
Σχήμα 1.28. Μείωση της ηχοστάθμης της ανθρώπινης φωνής σε συνάρτηση με την απόσταση και μόνο σε μία αίθουσα ακροατηρίου με 30 σειρές ακροατών. Υψηλής ηχοστάθμης ομιλία 70 dB(A) στη σκηνή μειώνεται κατά 20 dB(A) στην τελευταία σειρά. Ηχοστάθμη 50 dB(A), που θεωρείται κανονική ηχοστάθμη διαλόγου, μειώνεται στην τελευταία σειρά ακροατών στα 30 dB(A), που είναι χαμηλότερη τιμή από τον θόρυβο βάθους, όταν οι ακροατές διατηρούν απόλυτη ησυχία (Moore).

στο σχήμα 1.27 φωτογραφία αεροσκάφους πάνω από τις στέγες κατοικιών κατά την προσγείωσή του.

Ελεύθερα διαδιδόμενο ηχητικό κύμα είναι κύμα που διαδίδεται σε συνθήκες ισοδύναμες με τις συνθήκες διάδοσης σε απέραντο ομογενές (όχι όμως αναγκαστικά και ισότροπο) ελαστικό μέσο. Το ελεύθερα διαδιδόμενο κύμα είναι εξιδανικευμένη έννοια.

Η **ηχομείωση** της στάθμης σε σχέση με την απόσταση είναι κοινή λογική (ηχοαπορρόφηση από τον αέρα, μετατροπή σε θερμική ενέργεια). Για να προβλεφθεί η μείωση της στάθμης πρέπει να είναι γνωστό τι είδους είναι η ηχητική πηγή, δηλαδή αν είναι σημειακή, γραμμική ή επιφανειακή. Για κάθε διπλασιασμό της απόστασης η στάθμη έντασης σημειακής πηγής του ήχου μειώνεται κατά 6 dB, σχ. 1.28, και η γραμμική πηγή του ήχου μειώνεται κατά 3 dB.

Ο ήχος κατά τη διάδοσή του στον αέρα σε μεγάλες αποστάσεις επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και τον άνεμο, σχ. 1.29 έως 1.31.



Σχήμα 1.29. Διάδοση του ήχου στο ύπαιθρο. Περιοχές σκιάς δημιουργούνται από τα ηχητικά κύματα λόγω θερμοκρασιακών αλλαγών.